

*Здесь озера, кругом озера  
Голубой отражают свет,  
И широким лесным просторам  
Ни конца и ни края нет.*

*А. Иванов*



Первая международная конференция  
First International conference



Озера Евразии: проблемы и пути их решения

## Озера Евразии: проблемы и пути их решения Lakes of Eurasia: Problems and Solutions





KARELIAN RESEARCH CENTRE  
RUSSIAN ACADEMY OF SCIENCE  
NORTHERN WATER PROBLEMS INSTITUTE  
PETROZAVODSK STATE UNIVERSITY

**LAKES OF EURASIA:  
PROBLEMS AND SOLUTIONS**

**PROCEEDINGS  
1<sup>ST</sup> INTERNATIONAL CONFERENCE  
(September 11–15, 2017)**

PETROZAVODSK  
2017

КАРЕЛЬСКИЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР  
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК  
ИНСТИТУТ ВОДНЫХ ПРОБЛЕМ СЕВЕРА  
ПЕТРОЗАВОДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

**ОЗЕРА ЕВРАЗИИ:  
ПРОБЛЕМЫ И ПУТИ ИХ РЕШЕНИЯ**

**МАТЕРИАЛЫ  
1-й МЕЖДУНАРОДНОЙ КОНФЕРЕНЦИИ  
(11–15 сентября 2017 г.)**

ПЕТРОЗАВОДСК  
2017

УДК 556.55(4/5)(063)  
ББК 26.222.6  
О-46

**Редакционная коллегия:**

Н. Н. Филатов (отв. ред.), В. А. Румянцев, Т. И. Регеранд

**Рецензент**

докт. физ.-мат. наук, проф. В. Н. Зырянов

**О-46 Озера Евразии: проблемы и пути их решения.** Материалы 1-й Международной конференции (11–15 сентября 2017 г.). Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2017. 648 с.

В книге представлены результаты теоретических исследований, практического использования, охраны и управления ресурсами разнообразных озер Евразии. Рассмотрены Великие озера Евразии: Байкал, Каспий, Ладожское, Онежское, Телецкое, Чаны – и разнообразные озера Арктики и субарктики, бореальной и аридной зон. Основной акцент при организации конференции и подготовке сборника был сделан на то, чтобы рассмотреть наиболее актуальные вопросы лимнологии и возможные пути решения теоретических и практических проблем озер на обширной территории Евразии с учетом необходимости развития тесного международного сотрудничества. Важной задачей конференции является консолидация ученых разных стран Евразии, БРИКСа для получения новых научных знаний, объединение усилий для решения практических проблем трансграничных озерно-речных систем, обоснования возможного перераспределения водных ресурсов, обоснование рационального использования и охраны озер Евразии.

This volume of collected papers was compiled of the proceedings of the 1<sup>st</sup> International Conference “Lakes of Eurasia: Problems and Solutions”, Petrozavodsk, 11–15.09.2017. The volume presents the results of theoretical studies, practical use, conservation and resource management of various lakes of Eurasia. Great Eurasian lakes (Baikal, Caspian, Ladoga, Onego, Teletskoye, Chany) and diverse lakes of the arctic and subarctic regions, the boreal and arid zones are considered. The key idea in organizing the conference and preparing these proceedings was to address the most pressing issues of limnology and offer potential solutions for theoretical and practical problems of lakes in the vast territory of Eurasia, keeping in mind the need for close international cooperation. An important mission for the 1<sup>st</sup> conference is to consolidate the efforts of scientists from different Eurasian and BRICS countries in obtaining new knowledge and handling the real problems of transboundary lake-river systems, substantiating possible redistributions of water resources, sustainable management and conservation of Eurasian lakes.

*Организация конференции и издание материалов конференции осуществлены Институтом водных проблем Севера Российской академии наук и Петрозаводским университетом при финансовой поддержке Федерального агентства научных организаций (ФАНО), Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 17-05-20427), Российского научного фонда (грант № 14-17-00740-П «Озера России – диагноз и прогноз состояния экосистем при климатических и антропогенных воздействиях») и фонда «ЕЛЕМО» (Швейцария; проект «Ладожское озеро: жизнь подо льдом – взаимодействие процессов подо льдом в результате глобальных изменений»).*

ISBN 978-5-9274-0784-2

© Авторы докладов, 2017

© Карельский научный центр РАН, 2017

© Институт водных проблем Севера КарНЦ РАН, 2017

## СОДЕРЖАНИЕ

<b>ПРЕДИСЛОВИЕ</b> (Филатов Н. Н., Редгеранд Т. И.) . . . . .	19
<b>ОБЩИЕ ВОПРОСЫ ЛИМНОЛОГИИ ЕВРАЗИИ. НОВЫЕ МЕТОДЫ И ТЕХНОЛОГИИ. ТРАНСГРАНИЧНЫЕ ОЗЕРНО-РЕЧНЫЕ СИСТЕМЫ, ВОПРОСЫ ЗАКОНОДАТЕЛЬСТВА</b>	23
Аладин Н. В., Гонтарь В. И., Жакова Л. В., Плотников И. С., Смуров А. О. Прошлое и будущее Аральского моря . . . . .	23
Белов С. Ю. Инновационные методы мониторинга экосистем озер дистан- ционным зондированием в коротковолновом диапазоне радиоволн . . . . .	28
Голубков С. М. Влияние климатических колебаний на структуру и функ- ционирование экосистем континентальных водоемов: механизмы, послед- ствия, прогноз . . . . .	34
Греков И. М., Сырых Л. С., Кошелева Е. А., Назарова Л. Б., Субетто Д. А. Возможности применения геоинформационных баз данных в системах мо- ниторинга озер Евразии . . . . .	41
Дмитриев В. В. Здоровье водного объекта: аксиология, аксиометрия, оценка . . . . .	47
Жмилевский В. Д. Использование и правовой статус водных ресурсов . . . . .	54
Измайлова А. В. Пространственная неоднородность озерно-ресурсного по- тенциала России и основные тенденции изменений озерного фонда . . . . .	60
Калихман Т. П. Федеральный закон «Об охране озера Байкал»: история и трудности реализации . . . . .	67
Корнеенкова Н. Ю. Временная изменчивость озерных водных ресурсов ре- гионов недостаточного увлажнения . . . . .	74
Кураев А. В., Захарова Е. А., Rémy F., Костяной А. Г., Шимараев М. Н., Hall N. M. J., Сукнёв А. Я. Гигантские ледовые кольца и внутритермоклинные вихри на озерах Байкал и Хубсугул: перечень, структура воды в районах колец и механизм их формирования . . . . .	79
Kouraev A. V., Zakharova E., Filatov N. N., Baklagin S., Barbieux K., Merminod B., Pozdnyakov D. V., Kondrik D. A. Multiscale multispectral remote sensing of ice cover in lakes Onego and Ladoga using a combination of spaceborne, aerial drone and ground-based measurements . . . . .	81
Литинский П. Ю. Пространственно-временная модель наземных экосистем водосбора Онежского озера . . . . .	86
Максимович Н. Г., Мещерякова О. Ю., Деменев А. Д. Уникальность кар- стового озера Церик-Кель (Голубое озеро) в Кабардино-Балкарии . . . . .	92
Михайлова В. С., Вага Т. В. Изучение внутренних вод на уроках географии	98

Моисеенко Т. И. Изменчивость экосистем озер в условиях антропогенных нагрузок и закономерности их восстановления . . . . .	103
Нестеров Н. А., Румянцев В. А., Сорокин А. И., Гузиватый В. В. Сакральные места священной Ладоги и ее побережья . . . . .	109
Павлова М. Е. Возможности развития водного туризма на территории Мурманской области . . . . .	116
Поддубный С. А. Мелководья верхневолжских водохранилищ и их экологическое значение . . . . .	120
Поздняков Ш. Р., Румянцев В. А. Причины и пути разрешения острых социально-экологических проблем Ладожского озера . . . . .	124
Потахин С. Б. Историко-географические материалы как источник информации о климато-гидрологических аномалиях прошлого . . . . .	131
Пузанов А. В., Безматерных Д. М., Винокуров Ю. И., Кириллов В. В., Зиновьев А. Т. Современное состояние, экологические проблемы и перспективы изучения Телецкого озера (Республика Алтай) . . . . .	137
Романов А. Н., Хвостов И. В. Космический мониторинг минерализованных озер на юге Западной Сибири . . . . .	144
Сорокин А. И., Нестеров Н. А. Новый атлас главного озера среди Великих озер Европы . . . . .	151
Филатов Н. Н. Актуальные проблемы долгосрочного прогнозирования гидрологического режима и изменения экосистем озер Евразии . . . . .	158
Фролов А. В., Выручалкина Т. Ю. Особенности многолетних колебаний уровня озера Байкал и стока реки Ангары для режимов до и после заполнения Иркутского водохранилища . . . . .	164
Фрумин Г. Т., Фетисова Ю. А. Трансграничные водные объекты: проблемы и пути решения . . . . .	171
Чернов И. А., Толстиков А. В. О возможности применения вычислительного комплекса JASMINE для моделирования крупного озера . . . . .	177
Шаров Н. В. Геофизика и среда обитания . . . . .	182
Десинов Л. В., Десинов С. Л., Юрина О. А., Козлова М. И. Географическое образование в программе «Ураган» с участием космонавтов МКС . . . . .	188
<b>ГИДРОЛОГИЧЕСКИЕ И ГИДРОФИЗИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В ОЗЕРАХ. ВЛИЯНИЕ РЕГИОНАЛЬНОГО КЛИМАТА . . . . .</b>	<b>193</b>
Бабкин А. В., Мадибеков А. С., Мусакулкызы А., Чередниченко А. В. Скрытые периоды колебаний и долгосрочное прогнозирование уровня воды озера Маркаколь . . . . .	193
Баклагин В. Н. Исследование многолетнего ледового режима Онежского озера . . . . .	199

Богданов С. Р., Волков С. Ю., Здоровеннова Г. Э., Здоровеннов Р. Э., Пальшин Н. И., Тержевик А. Ю. Волновая активность в мелководном озере подо льдом . . . . .	205
Букатов А. Е., Завьялов Д. Д., Завьялова О. С. Зимняя термодинамика водоема на примере северо-восточной части Азовского моря . . . . .	212
Гавриленко Г. Г., Здоровеннова Г. Э., Здоровеннов Р. Э., Пальшин Н. И., Тержевик А. Ю. Особенности весеннего перемешивания в бореальном озере под влиянием различных метеорологических условий . . . . .	217
Ефремова Т. В., Пальшин Н. И. Ледовая фенология и термическая структура озер северо-запада России в период ледостава (по данным многолетних наблюдений) . . . . .	222
Зверев И. С., Ушаков К. В., Шипунова Е. А., Голосов С. Д., Ибраев Р. А. Оценка влияния основных притоков Ладожского озера на формирование водной массы бухты Петрокрепость (исток р. Невы) по результатам математического моделирования . . . . .	228
Здоровеннова Г. Э., Здоровеннов Р. Э., Гавриленко Г. Г. Особенности динамики температуры малого озера в начальный период ледостава . . . . .	234
Иванова И. Н., Самолубов Б. И. Циркуляции и стратифицированные потоки в заливах . . . . .	240
Kirillin G., Alymkulov S., Aslamov I., Boike J., Granin N., Izhitskiy A., Kurbaniyazov A., Shatwell T., Wen L., Zavialov P. Hydrophysical regime of lakes in Central Asia, Tibet, and Eurasian Arctic: major drivers and climatic trends . . . . .	246
Кураев А. В., Науменко М. А., Буднев Н. М., Шимараев М. Н., Троицкая Е., Гузиватый В. В., Каретников С. Г., Захарова Е. А., Rémy F., Ловцов С. В., Pius B., Przybylak R., Marszelewski W., Сукнёв А. Я. Отклик гидрофизических процессов различных типов озер Евразии на экстремальные климатические условия (проект ERALECC программы ERA.NET RUS PLUS S&T) . . . . .	253
Литвиненко А. В., Филатов Н. Н., Богданова М. С., Карпечко В. А. Антропогенное преобразование озерно-речной системы реки Нижний Выг (Республика Карелия) . . . . .	256
Малинин В. Н., Гордеева С. М. Климатические факторы межгодовых колебаний и долгосрочный прогноз уровня Каспийского моря . . . . .	261
Манилюк Ю. В. Особенности сейшевых колебаний в бассейне с открытым входом . . . . .	268
Науменко М. А., Гузиватый В. В., Ловцов С. В., Каретников С. Г., Буднев Н. М., Кураев А. В., Троицкая Е. С., Шимараев М. Н. Вариации термического режима южной части озера Байкал по непрерывным измерениям температуры воды с 2000 по 2016 г. . . . .	275
Науменко М. А., Каретников С. Г. Особенности климатических изменений температур воздуха Ладожского озера и озера Байкал за последние 70 лет . . . . .	281

Пальшин Н. И., Здоровеннова Г. Э., Богданов С. Р., Волков С. Ю., Ефремова Т. В., Здоровеннов Р. Э., Тержевик А. Ю. Расчет геострофических течений в малом озере в период ледостава . . . . .	287
Савкин В. М., Кондакова О. В. Особенности гидрологического режима при- родно-техногенной системы озера Чаны . . . . .	290
Фролов А. В. Об условиях существования бимодальности плотности рас- пределения вероятности уровня Каспия . . . . .	296
Чекмарева Е. А. Гидролого-гидрохимическая характеристика системы Ор- шинско-Петровских озер Тверской области . . . . .	301
<b>ГИДРОХИМИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВОДЫ И ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЙ . . . . .</b>	<b>307</b>
Астраханцева О. Ю. Исследование структурной и функциональной иерар- хии вод озера Байкал при химическом взаимодействии вещества вод озера Байкал с веществом потоков природной составляющей окружающей среды . . . . .	307
Белкина Н. А. Особенности формирования химического состава современ- ных донных отложений водоемов бассейна Онежского озера . . . . .	314
Бородулина Г. С. Хлоридные воды Онежской структуры . . . . .	320
Валиев В. С., Иванов Д. В., Зиганшин И. И., Шамаев Д. Е. Использование вероятностных оценок аналитических рядов данных для сравнительной характеристики содержания металлов в донных отложениях озер . . . . .	327
Гречушникова М. Г., Ефимова Л. Е., Ломова Д. В., Саввичев А. С. Содер- жание метана в озерах Керженского заповедника . . . . .	335
Гусева М. А., Петрова Т. Н. Межгодовая и сезонная динамика основных гидрохимических показателей в устье реки Вуоксы . . . . .	341
Даувальтер В. А., Кашулин Н. А. Химический состав донных отложений трансграничной системы озеро Инари – река Пасвик . . . . .	347
Земцова К. И., Вага Т. В. Органолептический анализ образцов подземных вод г. Петрозаводска . . . . .	353
Зобкова М. В., Ефремова Т. А., Лозовик П. А., Сабылина А. В. Баланс орга- нического вещества в озерах Карелии . . . . .	358
Кондратьев С. А., Каретников С. Г., Гузиватый В. В. Оценка биогенной на- грузки на трансграничное с Белоруссией озеро Синьша по модельным расчетам . . . . .	364
Лозовик П. А., Галахина Н. Е., Кравченко И. Ю. Нормирование допустимого антропогенного воздействия на водные объекты при евтрофировании, загрязнении и закислении вод . . . . .	370
Лозовик П. А., Кравченко И. Ю., Галахина Н. Е., Рыжаков А. В. Формиро- вание химического состава воды озер гумидной зоны . . . . .	376

Ляшенко О. А., Светашова Е. С., Екимова С. Б., Пономаренко А. М. Содержание тяжелых металлов и нефтяных углеводородов в воде Ладожского озера .....	383
Медведев А. С., Слуковский З. И., Новицкий Д. Г. Техногенный след в геохимии современных донных отложений малых урбанизированных озер Карелии .....	388
Rizhinashvili A. L. What group of humic substances (humic or fulvic acids) determines colour of water in unpolluted water bodies? .....	393
Слуковский З. И., Складнев Д. А., Макарова Е. М., Теканова Е. В., Калининкина Н. М., Садовничий Р. В. Геохимические особенности донных отложений склоновых и глубоководных участков Онежского озера .....	399
Солотчин П. А., Солотчина Э. П., Склярёв Е. В. Минералогия донных осадков малых озер аридных зон Байкальского региона – перспективный подход к реконструкциям климата голоцена .....	406
Сороковикова Л. М., Синюкович В. Н., Томберг И. В. Элементы прогноза качества вод Шурэнского водохранилища на р. Селенге (Монголия) .....	412
Страховенко В. Д., Овдина Е. А., Даниленко И. В., Субетто Д. А., Белкина Н. А., Ефременко Н. А. Минералого-геохимическая характеристика процесса современного седиментогенеза Онежского озера .....	418
Томберг И. В., Копырина Л. И., Бессудова А. Ю., Фирсова А. Д., Башенхаева М. В., Захарова Ю. Р., Горина Е. О. Гидрохимия и фитопланктон озер Лабьнкыр и Ворота (Республика Саха) .....	426
<b>ЭКОСИСТЕМЫ ОЗЕР. ГИДРОБИОЛОГИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ</b> .....	433
Березина Н. А. Чужеродные и аборигенные амфиподы в водных экосистемах севера европейской России .....	433
Болотова Н. Л. Антропогенные сукцессии мелководных северных озерных экосистем приледникового происхождения .....	438
Воякина Е. Ю. Пространственная неоднородность структурных характеристик фитопланктона в период максимального прогрева воды Ладожского озера в районе Валаамского архипелага .....	445
Высоцкая Р. У., Буэй Е. А., Ильмаст Н. В. Лизосомальные ферменты в тканях окуня <i>Perca fluviatilis</i> L. из акваторий Онежского озера с разной антропогенной нагрузкой .....	450
Гамбарян Л. Р., Мкртчян Ж. Г., Мамян А. С., Хачикян Т. Г. Многолетнее изучение микроводорослей реки Гаварагет (водосборный бассейн озера Севан) .....	454
Григорьева Н. Ю., Чистякова Л. В. Перспективы использования микроспектроскопии для мониторинга цианобактериального «цветения» открытых водоемов .....	461

Дзюбук И. М., Клюкина Е. А. К оценке динамики состояния рыбного населения малых озер Карелии методами математической статистики . . . . .	466
Ермолаева Н. И. Проблемы использования зоопланктона как индикатора нефтяного загрязнения пресноводных экосистем на примере озера Самоглор (ХМАО) . . . . .	473
Ермолаева Н. И., Зарубина Е. Ю., Страховенко В. Д., Овдина Е. А., Романов Р. Е., Пузанов А. В. Влияние абиотических факторов на продуктивность малых озер юга Западной Сибири . . . . .	479
Зарубина Е. Ю., Соколова М. И. Сукцессии растительного покрова периодически пересыхающих озер юга Обь-Иртышского междуречья . . . . .	486
Зиннатова Э. А., Фролова Л. А. Анализ рецентных остатков Cladocera (Branchiopoda, Crustacea) в донных отложениях озер бассейна реки Хатанги . . . . .	492
Зуев Ю. А., Титов С. Ф., Зуева Н. В. Комплексные гидробиологические исследования трансграничных рек Селезневки и Малиновки . . . . .	496
Иззатуллаев З. И. Моллюски пресных озер Памира, их распространение, вопросы происхождения и зоогеографические связи данной фауны . . . . .	501
Ильмаст Н. В., Стерлигова О. П., Кучко Я. А. Рыбохозяйственное использование малых водоемов Карелии (на примере Урозера) . . . . .	506
Июфина И. В. Функциональные характеристики микопланктона Ладожского озера . . . . .	511
Калинкина Н. М., Теканова Е. В., Сидорова А. И., Белкина Н. А. Современное состояние Онежского озера и проблемы биомониторинга его экосистемы . . . . .	517
Комиссаров А. Б. Характеристика зимнего фитопланктона озера Шлино . . . . .	523
Куличенко А. Ю. Макрозообентос – идентификатор состояния малых озер юго-восточного Приладожья . . . . .	529
Курашов Е. А., Барбашова М. А., Русанов А. Г., Дудакова Д. С., Трифонова М. С., Родионова Н. В., Алешина Д. Г. Роль чужеродных видов в трансформации экосистемы Ладожского озера . . . . .	535
Лесонен М. А., Шустов Ю. А. Питание речного окуня ( <i>Perca fluviatilis</i> L.) в зоне форелевого хозяйства Кондопожской губы Онежского озера . . . . .	542
Овсеян А. А., Гамбарян Л. Р., Мамян А. С. Некоторые сведения о «цветении» воды озера Севан синезелеными водорослями . . . . .	547
Сидорова А. И. Роль инвазионной амфиоды <i>Gmelinoides fasciatus</i> (Stebbing) на разных типах литорали Онежского озера . . . . .	550
Суслопарова О. Н., Ляшенко О. А., Огородникова В. А., Зуев Ю. А., Тамулёнис А. Ю. Межгодовые изменения основных компонентов экосистемы (фитопланктон, зоопланктон, макрозообентос) южной Ладоги в период 2000–2016 гг. . . . .	557
Фомина Ю. Ю. Сезонная динамика зоопланктона и ее межгодовая изменчивость в Петрозаводской губе Онежского озера . . . . .	464

Цыденов Б. О. Влияние ветра на распределение биомасс планктона в период прогревания водоема .....	569
Черепанова Н. С., Широков В. А., Георгиев А. П. Особенности рыбопромыслового использования сига и судака в некоторых водоемах Республики Карелия .....	575
Шаров А. Н. Фитопланктон крупных озер северо-запада России в условиях климатической изменчивости. ....	580
<b>ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ И ПАЛЕОЛИМНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ОЗЕР</b> .....	585
Гриппа С. П. Колебания уровня Онежского озера за последние 600 лет (по дендрохронологическим данным) .....	585
Ибрагимова А. Г., Фролова Л. А., Греков И. М., Сырых Л. С. Изменение состава сообществ Cladocera (Branchiopoda, Crustacea) в озере Антюх-Ламбина (Кольский полуостров, Мурманская область) в голоцене .....	592
Мясникова Н. А., Субетто Д. А., Сырых Л. С., Греков И. М. Создание палеолимнологической базы данных севера Евразии как основы для реконструкции природно-климатических изменений прошлого .....	598
Новик А. А. Хроностратиграфический анализ озерного осадконакопления региона Балтийских Поозерий в послеледниковый период .....	602
Рыбалко А. Е., Токарев М. Ю., Субетто Д. А., Локтев А. С., Алешин М. Ю., Терехина Я. Е., Костромина Н. А. Великие озера Европы – история развития, особенности геологического строения и их влияние на формирование современной геоэкологической обстановки .....	609
Сапелко Т. В., Терехов А. В., Субетто Д. А. Количественные и качественные оценки палеоклиматических изменений по результатам палинологического анализа и их роль в реконструкции развития озерных экосистем .....	616
Субетто Д. А. Современный уровень палеолимнологических исследований северной Евразии .....	622
Сырых Л. С., Назарова Л. Б., Субетто Д. А., Греков И. М. Изменение климатических обстановок юго-востока полуострова Таймыр (бассейн реки Хатанги) за последние 7000 лет .....	627
Федотов А. П., Енущенко И. В. Реконструкция летних температур в Восточной Сибири на основе анализа видового состава хирономид из кернов донных осадков озер .....	632
Шелехова Т. С., Лаврова Н. Б. Палеогеографические условия осадконакопления на Карельском и Поморском берегах Белого моря .....	638
Ядрихинский И. В., Пестрякова Л. А., Городничев Р. М. Изученность полигональных водоемов севера Евразии, Канады и Аляски .....	645

## CONTENTS

<b>FOREWORD</b> (N. N. Filatov, T. I. Regerand) . . . . .	21
<b>GENERAL ISSUES OF LIMNOLOGY IN EURASIA. NEW METHODS AND TECHNOLOGY. TRANSBOUNDARY LAKE-RIVER SYSTEMS, LEGISLATION</b> . . . . .	23
N. V. Aladin, V. I. Gontar, L. V. Zhakova, I. S. Plotnikov, A. O. Smurov. Past and future of the Aral Sea . . . . .	23
S. Yu. Belov. Innovative methods for monitoring lake ecosystems by remote sensing in the short-wave range of radio waves . . . . .	28
S. M. Golubkov. Effects of climate oscillations on the ecosystem structure and functioning of continental water bodies: mechanisms, consequences, forecasting . . . . .	34
I. M. Grekov, L. S. Strykh, E. A. Kosheleva, L. B. Nazarova, D. A. Subetto. Applications of GIS databases in monitoring systems for Eurasian lakes . . . . .	41
V. V. Dmitriev. The health of a water body: axiology, axiometry, assessment . . . . .	47
V. D. Zhmylevskii. Uses and legal status of water resources . . . . .	54
A. V. Izmailova. Spatial heterogeneity of Russia's lake resource potential and the main trends of change in lake resources . . . . .	60
T. P. Kalikhman. Federal law "On protection of Lake Baikal": implementation history and challenges . . . . .	67
N. Yu. Korneenkova. Temporal variability of lake water resources in low-moisture regions . . . . .	74
A. V. Kouraev, E. A. Zakharova, F. Rémy, A. G. Kostianoy, M. N. Shimaraev, N. M. J. Hall, A. Ya. Suknev. Giant ice rings and interthermocline eddies on lakes Baikal and Hovsgol: inventory, water structure in the regions of ice rings and mechanism of their formation . . . . .	79
A. V. Kouraev, E. Zakharova, N. N. Filatov, S. Baklagin, K. Barbieux, B. Merminod, D. V. Pozdnyakov, D. A. Kondrik. Multiscale multispectral remote sensing of ice cover in lakes Onego and Ladoga using a combination of spaceborne, aerial drone and ground-based measurements . . . . .	81
P. Yu. Litinsky. Spatio-temporal model of terrestrial ecosystems in Lake Onego catchment . . . . .	86
N. G. Maksimovich, O. Yu. Meshcheriakova, A. D. Demenev. The uniqueness of the karstic lake Tserik-Kel (Blue Lake) in the Kabardino-Balkaria (Russia) . . . . .	92
V. S. Mikhailova, T. V. Vaga. Studying inland waters at geography lessons . . . . .	98
T. I. Moiseenko. Variability of lake ecosystems under human impacts and regularities of their recovery . . . . .	103

N. A. Nesterov, V. A. Rumyantsev, A. I. Sorokin, V. V. Guzivatyi. The sacred places of Holy Ladoga and its coast . . . . .	109
M. E. Pavlova. Possibilities of developing water tourism in the Murmansk Region . . . . .	116
S. A. Poddubny. Shallow areas in the upper Volga reservoirs and their ecological implications . . . . .	120
Sh. R. Pozdnyakov, V. A. Rumyantsev. Causes of and potential solutions for pressing socio-ecological problems of Lake Ladoga . . . . .	124
S. B. Potakhin. Historical-geographical materials as a source of information on past climatic and hydrological anomalies . . . . .	131
A. V. Puzanov, D. M. Bezmaternyh, Yu. I. Vinokurov, V. V. Kirillov, A. T. Zinoviev. Current state, environmental problems and prospects for studying Lake Teletskoye (Republic of Altai) . . . . .	137
A. N. Romanov, I. V. Khvostov. Satellite monitoring of mineralized lakes in the south of West Siberia . . . . .	144
A. I. Sorokin, N. A. Nesterov. The new atlas of Lake Ladoga . . . . .	151
N. N. Filatov. Current problems of forecasting the hydrological regime and changes in ecosystems of Eurasian lakes . . . . .	158
A. V. Frolov, T. Yu. Vyrychalkina. Peculiarities of long-term fluctuations of Lake Baikal water levels and the Angara River runoff before and after filling of the Irkutskoye reservoir . . . . .	164
G. T. Frumin, Yu. A. Fetisova. Transboundary water bodies: problems and solutions . . . . .	171
I. A. Chernov, A. V. Tolstikov. On the applicability of the numerical model JASMINE for simulation of a large lake . . . . .	177
N. V. Sharov. Geophysics and environment . . . . .	182
L. V. Desinov, S. L. Desinov, O. A. Yrina, M. I. Kozlova. Geographical education within Uragan program with participation of ISS cosmonauts . . . . .	188
<b>HYDROLOGICAL AND HYDROPHYSICAL PROCESSES IN LAKES. REGIONAL CLIMATE EFFECTS . . . . .</b>	<b>193</b>
A. V. Babkin, A. S. Madibekov, A. Mussakulkyzy, A. V. Cherednichenko. Latent periods of fluctuation and long-range forecasting of the water level of Lake Markakol . . . . .	193
V. N. Baklagin. Study of the long-term ice regime of Lake Onego . . . . .	199
S. R. Bogdanov, S. Yu. Volkov, G. E. Zdorovenova, R. E. Zdorovenov, N. I. Palshin, A. Yu. Terzhevnik. Wave activity in an ice-covered shallow lake . . . . .	205
A. E. Bukatov, D. D. Zav'yalov, O. S. Zav'yalova. Wintertime thermodynamics of a water body, example of the north-eastern part of the Sea of Azov . . . . .	212

G. G. Gavrilenko, G. E. Zdorovenнова, R. E. Zdorovenнов, N. I. Palshin, A. Yu. Terzhevik. The features of spring mixing in a boreal lake under a variety of weather conditions . . . . .	217
T. V. Efremova, N. I. Palshin. Ice phenology and thermal structure lakes of Northwestern Russia during the ice cover period (long-term observational data) . . . . .	222
I. S. Zverev, K. V. Ushakov, E. A. Shipunova, S. D. Golosov, R. A. Ibrayev. Effect of the main confluents of Lake Ladoga on the formation of water mass of the Petrokrepost' bay – the effluent of the Neva River (upon the results of mathematical modeling) . . . . .	228
G. E. Zdorovenнова, R. E. Zdorovenнов, G. G. Gavrilenko. Features of temperature dynamics of a small lake in the initial ice period . . . . .	234
I. N. Ivanova, B. I. Samolyubov. Circulation and stratified flows in bays . . . . .	240
G. Kirillin, S. Alymkulov, I. Aslamov, J. Boike, N. Granin, A. Izhitskiy, A. Kurbaniyazov, T. Shatwell, L. Wen, P. Zavialov. Hydrophysical regime of lakes in Central Asia, Tibet, and Eurasian Arctic: major drivers and climatic trends . . . . .	246
A. V. Kouraev, M. A. Naumenko, N. M. Budnev, M. N. Shimaraev, E. Troitskaya, V. V. Guzviatiy, S. G. Karetnikov, E. A. Zakharova, F. Rémy, S. V. Lovtsov, B. Pius, R. Przybylak, W. Marszelewski, A. Ya. Suknev. The response of hydrophysical processes of different types of lakes in Eurasia at the extreme climatic conditions (ERA.NET RUS PLUS S&T PROJECT ERALECC) . . . . .	253
A. V. Litvinenko, N. N. Filatov, M. S. Bogdanova, V. A. Karpechko. Anthropogenic transformation of the Nizhnii Vyg lake-river system (Republic of Karelia) . . . . .	256
V. N. Malinin, S. M. Gordeeva. Climatic factors of interannual variations and long-term forecast of the Caspian Sea level . . . . .	261
Yu. V. Manilyuk. The properties of seiche oscillations in a basin with an open boundary . . . . .	268
M. A. Naumenko, V. V. Guzviaty, S. V. Lovtsov, S. G. Karetnikov, N. M. Budnev, A. V. Kuraev, E. S. Troitskaya, M. N. Shimaraev. Variations of the thermal regime of the southern part of Lake Baikal according to continuous measurements of water temperature from 2000 to 2016 . . . . .	275
M. A. Naumenko, S. G. Karetnikov. Some features of climatic changes of air temperatures of Lake Ladoga and Lake Baikal for the last 70 years . . . . .	281
N. I. Palshin, G. E. Zdorovenнова, S. R. Bogdanov, S. Yu. Volkov, T. V. Efremova, R. E. Zdorovenнов, A. Yu. Terzhevik. Calculation of geostrophic flows in a small lake during ice-period . . . . .	287
V. M. Savkin, O. V. Kondakova. Peculiarities of the hydrological regime of the Chany Lake natural-technogenic system . . . . .	290
A. V. Frolov. Conditions for existence of the Caspian Sea level bimodal probability density function . . . . .	296
E. A. Chekmareva. Hydrological and hydrochemical characteristics of the Orshinsko-Petrovskiy lakes system, Tver Region . . . . .	301

<b>HYDROCHEMICAL STUDIES OF WATER AND BOTTOM SEDIMENTS</b> .....	307
O. Yu. Astrakhantseva. A study of the structural and functional organization of the chemical interaction of Lake Baikal waters with substances in the flows of matter in the natural environment .....	307
N. A. Belkina. Formation features of the chemical composition of modern sediments in lakes of the Onego Lake catchment .....	314
G. S. Borodulina. Chloride groundwater of the Onega structure .....	320
V. S. Valiev, D. V. Ivanov, I. I. Ziganshin, D. E. Shamaev. Application of probabilistic estimates of analytical data series for comparative description of metal contents in lake sediments .....	327
M. G. Grechushnikova, L. E. Efimova, D. V. Lomova, A. S. Savvichev. Methane concentrations in lakes of Kerzhensky biosphere reserve .....	335
M. A. Guseva, T. N. Petrova. Among-year and seasonal dynamics of basic hydrochemical parameters in the Vuoksi River estuary .....	341
V. A. Dauvalter, N. A. Kashulin. Chemical composition of sediments in the cross-border system Lake Inari – the Pasvik River .....	347
K. I. Zemtsova, T. V. Vaga. Organoleptic analysis of underground waters samples from Petrozavodsk .....	353
M. V. Zobkova, T. A. Efremova, P. A. Lozovik, A. V. Sabylina. Organic matter balance in Karelian lakes .....	358
S. A. Kondratiev, S. G. Karetnikov, V. V. Guzivatyi. Estimation of the biogenic load on a transboundary (Russia and Belarus) lake Sin'sha by model calculations .....	364
P. A. Lozovik, N. E. Galakhina, I. Yu. Kravchenko. The rationing of permissible human impact on water objects by eutrophication, pollution and acidification of waters .....	370
P. A. Lozovik, I. Yu. Kravchenko, N. E. Galakhina, A. V. Ryzhakov. Formation of the chemical composition of lake waters in the humid zone .....	376
O. A. Lyashenko, E. A. Svetashova, S. B. Yekimova, A. M. Ponomarenko. The levels of heavy metals and petroleum hydrocarbons in Lake Ladoga water .....	383
S. Medvedev, Z. I. Slukovsky, D. G. Novitsky. The footprints of technogenesis in sediments of Karelian lakes .....	388
A. L. Rizhinashvili. What group of humic substances (humic or fulvic acids) determines colour of water in unpolluted water bodies? .....	393
Z. I. Slukovsky, D. A. Skladnev, E. M. Makarova, E. V. Tekanova, N. M. Kalinkina, R. V. Sadovnichy. The geochemical characteristics of the bottom sediments of slope and deep-water sites of Lake Onego .....	399

P. A. Solotchin, E. P. Solotchina, E. V. Sklyarov. Mineralogy of bottom sediments from shallow lakes of the Baikal region arid zones – a promising approach to the reconstruction of holocene climate . . . . .	406
L. M. Sorokovikova, V. N. Sinyukovich, I. V. Tomberg. Forecast of water quality in Shurenskoye reservoir (Selenga River, Mongolia) . . . . .	412
V. D. Strakhovenko, E. A. Ovdina, I. V. Danilenko, D. A. Subetto, N. A. Belkina, N. A. Efremenko. Mineralogical and geochemical characteristics of the modern sediment formation process in Lake Onego . . . . .	418
I. V. Tomberg, L. I. Kopyrina, A. U. Bessudova, A. D. Firsova, M. V. Bashenkhayeva, Yu. R. Zakharova, E. O. Gorin. Hydrochemistry and phytoplankton of lakes Labyntyk and Vorota (Republic of Sakha) . . . . .	426
<b>LAKE ECOSYSTEMS. HYDROBIOLOGICAL STUDIES . . . . .</b>	<b>433</b>
N. A. Berezina. Alien and native species of Amphipods in continental waters of North European Russia . . . . .	433
N. L. Bolotova. Anthropogenic successions of shallow-water northern lake ecosystems of periglacial genesis . . . . .	438
E. Yu. Voyakina. Spatial heterogeneity of the structural characteristics of phytoplankton of Lake Ladoga around the Valaam Archipelago in the peak warm-up period . . . . .	445
R. U. Vysotskaya, E. A. Buoy, N. V. Ilmast. Lysosomal enzymes in the tissues of perch <i>Perca fluviatilis</i> L. inhabiting areas of Lake Onego with different anthropogenic loads . . . . .	450
L. R. Gambar'an, Zh. G. Mkrtychan, A. S. Mam'an, T. G. Hachik'an. Long-term study of microalgae of the Gavaraget River (Lake Sevan catchment) . . . . .	454
N. Yu. Grigoryeva, L. V. Chistyakova. Prospects of using microscopic spectroscopy for monitoring cyanobacterial blooms in surface water bodies . . . . .	461
M. Dzyubuk, E. A. Klyukina. Assessment of changes in the fish population of small lakes of Karelia by methods of mathematical statistics . . . . .	466
N. I. Yermolaeva. Problems of using zooplankton as an indicator of oil pollution of freshwater ecosystems (example of Lake Samotlor) . . . . .	473
N. I. Yermolayeva, E. Yu. Zarubina, V. D. Strakhovenko, E. A. Ovdina, R. E. Romanov, A. V. Puzanov. The effect of abiotic factors on the productivity of small lakes in the South of Western Siberia . . . . .	479
E. Yu. Zarubina, M. I. Sokolova. Successions of the plant cover of ephemeral lakes in the southern part of the Ob-Irtysh interfluvium . . . . .	486
E. A. Zinnatova, L. A. Frolova. Analysis of recent Cladocera (Branchiopoda, Crustacea) remains from bottom sediments of lakes in the Khatanga River catchment . . . . .	492
Yu. A. Zuyev, S. F. Titov, N. V. Zuyeva. Integrated hydrobiological study of transboundary rivers Seleznevka and Malinovka . . . . .	496

Z. I. Izzatullayev. Mollusks of Pamir freshwater lakes, their distribution, origin and zoogeographical linkages . . . . .	501
N. V. Ilmast, O. P. Sterligova, Ya. A. Kuchko. The use of Karelia's small water bodies for fish farming (exemplified by Lake Urozero) . . . . .	506
I. V. Iofina. Functional characteristics of aquatic fungi of Lake Ladoga . . . . .	511
N. M. Kalinkina, E. V. Tekanova, A. I. Sidorova, N. A. Belkina. The current state of Lake Onego and problems of ecosystem biomonitoring . . . . .	517
A. B. Komissarov. Characteristics of Lake Shlino phytoplankton in winter . . . . .	523
A. Yu. Kulichenko. Using macrozoobenthos community structure for assessment of the ecological status of three lakes in Nizhne-Svirsky Strict Nature Reserve . . . . .	529
E. A. Kurashov, M. A. Barbashova, A. G. Rusanov, D. S. Dudakova, M. S. Trifonova, N. V. Rodionova, D. G. Aleshina. The role of alien species in the transformation of Lake Ladoga ecosystem . . . . .	535
M. A. Lesonen, Yu. A. Shustov. Feeding habits a perch ( <i>Perca fluviatilis</i> L.) in the trout farming of the Kondopoga bay of Onega Lake . . . . .	542
A. A. Ovsepyan, L. R. Gambaryan, A. A. Mamyan. Some information about blue-green algal blooms in Lake Sevan . . . . .	547
A. I. Sidorova. Role of the invasive species <i>Gmelinoides fasciatus</i> (Stebbing) in different types of the littoral zone of Lake Onego . . . . .	550
O. N. Susloparova, O. A. Liashenko, V. A. Ogorodnikova, Yu. A. Zuyev, A. Yu. Tamulenis. Interannual changes of the main ecosystem components (phytoplankton, zooplankton, macrozoobenthos) in the southern Ladoga in 2000–2016 . . . . .	557
Yu. Yu. Fomina. Seasonal dynamics of zooplankton and its interannual variability in Petrozavodskaya Bay of Lake Onego . . . . .	564
B. O. Tsydenov. The effect of wind on plankton distribution during the heating of a lake . . . . .	569
N. S. Cherepanova, V. A. Shirokov, A. P. Georgiev. Specific characteristics of whitefish and zander fisheries in some water bodies of the Republic of Karelia . . . . .	575
A. N. Sharov. Phytoplankton of large lakes of northwest Russia under climate variability . . . . .	580
<b>GEOLOGICAL AND PALEOLIMNOLOGICAL CHARACTERISTICS OF LAKES . . . . .</b>	<b>585</b>
S. P. Grippa. Water level fluctuations of Lake Onego during the last 600 years according to dendrochronological proxy records . . . . .	585
A. G. Ibragimova, L. A. Frolova, I. M. Grekov, L. S. Syrykh. The change in Cladocera (Branchiopoda, Crustacea) composition of the lake Antyukh-Lambina (Kola peninsula, Murmansk Region) in the holocene . . . . .	592

N. A. Myasnikova, D. A. Subetto, L. S. Syrykh, I. M. Grekov. North Eurasia paleolimnological database as the basis for past climate and environmental reconstructions . . . . .	598
A. A. Novik. Chronostratigraphic analysis of lake sedimentation in Baltic Lake districts in the post-glacial period . . . . .	602
A. E. Rybalko, M. Yu. Tokarev, D. A. Subetto, A. S. Loktev, M. Yu. Aleshin, Ya. E. Terekhina, N. A. Kostromina. The Great Lakes of Europe – the history of development, the features of geological structure and their effect on the formation of the modern geo-ecological situation . . . . .	609
T. V. Sapelko, A. V. Terekhov, D. A. Subetto. Quantitative and qualitative estimation of paleoclimatic changes based on the results of pollen data, and their role in reconstructing the evolution of lacustrine ecosystems . . . . .	616
D. A. Subetto. Modern state of paleolimnological studies in Northern Eurasia . . . . .	622
L. S. Syrykh, L. B. Nazarova, D. A. Subetto, I. M. Grekov. The change of the climatic conditions on the Taymyr Peninsula (Khatanga River basin) over the last 7 ka . . . . .	627
A. P. Fedotov, I. V. Enushchenko. Reconstruction of summer temperatures in East Siberia (Russia), inferred from chironomid analyses of lake bottom sediments . . . . .	632
T. S. Shelekhova, N. B. Lavrova. Paleogeographic conditions of sedimentation on the White Sea Karelian and Pomor coasts . . . . .	638
I. V. Yadrikhinskiy, L. A. Pestryakova, R. M. Gorodnichev. Current state of knowledge on polygonal water bodies of Northern Eurasia, Canada and Alaska . . . . .	645

## ПРЕДИСЛОВИЕ

Основная идея 1-й Международной конференции «Озера Евразии: проблемы и пути их решения» заключается в создании научной платформы для обсуждения наиболее важных фундаментальных и практических проблем многочисленных водных объектов Евразии с учетом их разнообразия, трансграничного значения, возможного перераспределения водных ресурсов, строительства гидротехнических сооружений, изменений климата. Особое внимание уделяется проблемам совершенствования прогноза экосистем для долгосрочного планирования экономической деятельности. В Евразии уже осуществляются и планируется осуществить ряд крупных проектов по перераспределению водных ресурсов озерно-речных систем, что может затронуть интересы многих стран континента. Необходимо отметить, что наиболее оптимальные решения рассматриваемых научных проблем, связанных с изучением, использованием и охраной водных объектов, находятся в прямой зависимости от экономической и политической стабильности как внутри каждой отдельной страны, так и Евразии в целом, от гармонизации подходов к охране и рациональному использованию ресурсов.

Перспективным с точки зрения развития научной интеграции на территории Евразии является проведение в рамках данной конференции Школы-практики молодых ученых. Аспирантам и студентам предоставляется уникальная возможность участия в этом крупном мероприятии, на которой выступят с лекциями ведущие ученые, исследователи, практики и преподаватели ведущих университетов.

«Мир меняется, идет технологическая революция, и нужно не создавать замкнутые пространства, а наоборот, встречать ее вместе», – заявил президент Владимир Путин, выступая с трибуны Петербургского международного экономического форума в 2017 г. Глава государства объявил о проекте «Большая Евразия», который открыт для всех – как для Китая, так и для ЕС.

Развитие евразийской интеграции не может осуществляться без особого внимания к вопросам окружающей среды этой территории и особенно ее водным объектам, таким как самое крупное в мире озеро – Каспий, самое глубокое – Байкал, Великие озера Европы – Ладожское и Онежское, а также многие другие, имеющие трансграничное значение, как, например, Псковско-Чудское, Ханка, Или-Балхашская система, Арал и др.

Для гармоничного процесса международного развития Евразии актуальным на сегодняшний момент является изучение фундаментальных проблем и решение практических вопросов в тесном сотрудничестве ученых многих стран.

На конференции «Озера Евразии: проблемы и пути их решения» в Петрозаводске в тесном сотрудничестве ученых обсуждаются следующие основные направления:

- Трансграничные озерно-речные системы. Проблемы и пути решения совместного использования.
- Пути решения проблем прогноза внутривековых изменений гидрологического режима и экосистем.
- Перспективные методы моделирования экосистем для поддержки принятия управленческих решений.
- Совершенствование правовых основ для сохранения ресурсов озер. Опыт и перспективы разработки законодательных актов для сохранения озерных систем.
- Зимняя лимнология.
- Вселенцы и их роль в изменении экосистем озер.
- Инновационные методы мониторинга озер.
- Формирование химического состава воды озер и нормирование допустимого антропогенного воздействия на них.
- Современные проблемы палеолимнологии.

В сборник включены наряду с работами специалистов студенческие статьи.

ИВПС КарНЦ РАН выражает благодарность за содействие в организации и проведении данной конференции ОНЗ РАН, ФАНО России, Петрозаводскому государственному университету (программа развития ПетрГУ как опорного университета), Российскому фонду фундаментальных исследований (грант № 17-05-20427), Российскому научному фонду (грант № 14-17-00740-П «Озера России – диагноз и прогноз состояния экосистем при климатических и антропогенных воздействиях»), Исследовательскому фонду «Fondation pour l'Etude des Eaux du Lemан» (Швейцария, проект «Ладожское озеро: жизнь подо льдом – взаимодействие процессов подо льдом в результате глобальных изменений»).

Материалы конференции также представлены на сайте ИВПС КарНЦ РАН <http://water.krc.karelia.ru/>.

## FOREWORD

The key mission of the 1<sup>st</sup> International Conference “Lakes of Eurasia: Problems and Solutions” was to establish a scientific platform for discussion of major basic and applied problems of relevance for the numerous waterbodies of Eurasia, keeping in mind their transboundary significance, possible redistribution of water resources, hydropower engineering, climate changes. Special attention will be given to enhancement of ecosystem prediction for long-term planning of economic activities. Eurasia already has several large ongoing or upcoming projects for redistribution of the water resources of lake-river systems, potentially affecting the interests of many countries on the continent. It is important to remember that the most optimal solutions for the scientific problems related to the study, management and conservation of waters are directly dependent on economic and political stability both inside each country and in Eurasia at large, on how well we manage to harmonize approaches to conservation and sustainable use of resources.

A promising initiative for the development of scientific integration in Eurasia is the inclusion in the 1<sup>st</sup> International Conference “Lakes of Eurasia: Problems and Solutions” of the Young Scientists’ Workshop. University-level and PhD students got the unique chance to take part in this major event, where leading scholars, researchers, practitioners and professors from Russian and foreign universities gave lectures.

Quoting the speech of President Vladimir Putin at the St. Petersburg International Economic Forum 2017 announcing the start of the “Greater Eurasia” project, “The World is changing, technological revolution is at the door, and instead of creating closed spaces we should meet it together”. The Eurasian integration project cannot proceed unless attention is paid to environmental matters in the territory, especially its waters, including objects such as the world’s biggest lake – the Caspian, deepest lake – Baikal, European great lakes Ladoga and Onego, as well as those of cross-border significance, such as Peipus, Khanka/Xingkai, Ili-Balkhash watershed, Aral, and many others.

A balanced international development of Eurasia today requires that basic problems are studied and practical challenges are addressed in close collaboration of scientists from many countries.

At the 1<sup>st</sup> International Conference “Lakes of Eurasia: Problems and Solutions” in Petrozavodsk on 11–15.09.2017 scientists jointly discussed the following major themes:

- Transboundary lake-river systems. Problems and solutions for shared use.
- Approaches to handling problems in prediction of intra-centennial variations in the hydrological regime and ecosystems.
- Promising ecosystem modeling methods for decision-making support.
- Overcoming flaws and bridging gaps in legislation for conservation of lake resources. Experience and prospects of working out laws and regulations for conservation of lake systems.
- Winter limnology.
- Alien species and their role in lake ecosystem change.
- Innovative methods of lake monitoring.
- Formation of the chemical composition of lake water, and setting standards for permissible human impact on lakes.
- Current problems in paleolimnology.

NWPI KarRC RAS is grateful for support in organizing and implementing the 1<sup>st</sup> International Conference “Lakes of Eurasia: Problems and Solution” to RAS Branch of Earth Sciences, Russian FASO, programme of development PetrSU, Russian Foundation for Basic Research (grant № 17-05-20427), Russian Science Foundation (grant “Lakes of Russia – diagnosis and prediction of ecosystem condition under climatic and human impacts”), «Fondation pour l’Etude des Eaux du Lemman» (Switzerland; «Lake Ladoga: life under ice – interplay of under-ice processes by global change»).

An electronic version of the conference proceedings can be accessed through NWPI KarRC RAS website <http://water.krc.karelia.ru/>.

# **ОБЩИЕ ВОПРОСЫ ЛИМНОЛОГИИ ЕВРАЗИИ. НОВЫЕ МЕТОДЫ И ТЕХНОЛОГИИ. ТРАНСТРАНИЧНЫЕ ОЗЕРНО-РЕЧНЫЕ СИСТЕМЫ, ВОПРОСЫ ЗАКОНОДАТЕЛЬСТВА**

## **ПРОШЛОЕ И БУДУЩЕЕ АРАЛЬСКОГО МОРЯ**

**Н. В. Аладин, В. И. Гонтарь, Л. В. Жакова, И. С. Плотников,  
А. О. Смуров**

*Зоологический институт РАН*

Аральское море – бессточное соленое озеро в пустынной зоне Средней Азии в Туранской низменности у восточной кромки плато Устюрт. В это озеро впадают только две реки – Сырдарья на северо-востоке и Амударья на юге [Бортник, Чистяева, 1990].

В Арале выделяют две главные его части: северную – Малое море, или Малый Арал, и южную – Большое море, или Большой Арал. Их связывали два пролива: узкий, мелководный пролив Аузы-Кокарал и широкий и глубокий пролив Берга. В свою очередь, эти части включают по несколько меньших котловин. При такой морфологии [Бортник, Чистяева, 1990] Аральское море при снижении уровня может разделяться на отдельные остаточные водоемы.

Несколько веков, вплоть до 1960-х гг., состояние Аральского моря было условно-стабильным. В конце 1950-х гг. его уровень находился на отметке +53,4 м, площадь достигала 67 499 км<sup>2</sup> при объеме воды 1089 км<sup>3</sup> и средней глубине 16 м. Площадь Малого моря составляла 6118 км<sup>2</sup>, объем – 82 км<sup>3</sup>, средняя глубина – 13,5 м, максимальная достигала 29,5 м. Площадь Большого Арала составляла 61 381 км<sup>2</sup>, объем – 1007 км<sup>3</sup>, средняя глубина – 16,5 м. Подводная гряда разделяет его на глубоководную западную часть (максимальная глубина 69 м) и обширную восточную (максимальная глубина 28 м). Арал был солоноватоводным со средней соленостью 10 ‰ [Бортник, Чистяева, 1990].

Объем воды в Аральском море и, соответственно, площадь и уровень поверхности определяются водным балансом. Он складывается из стока рек Амударьи и Сырдарьи, основного источника воды, небольшого коли-

чества атмосферных осадков, притока подземных вод – приходная составляющая, очень значительного испарения с поверхности, а также небольшой фильтрации вод в берега и дно – расходная составляющая [Бортник, Чистяева 1990; Micklin, 2010, 2014a, b].

Уровень Аральского моря никогда не оставался стабильным, так как на водный баланс влияли изменения климата, от которых напрямую зависел объем стока рек Амударья и Сырдарья. В бассейнах этих рек развито орошаемое земледелие, оказывающее сильное влияние на их сток на протяжении многих веков [Бортник, Чистяева, 1990].

В 1960-х гг. в Аральском море обитало около 200 видов свободноживущих беспозвоночных, среди которых преобладали пресноводные виды. Рыбы были представлены 32 видами, большей частью пресноводными [Plotnikov et al., 2014a, b].

В 1960 г. началось постепенное высыхание Аральского моря, ставшее следствием сокращения стока рек Амударья и Сырдарья из-за увеличения безвозвратного изъятия речной воды [Бортник, Чистяева, 1990]. Приток речной воды резко сократился, равновесие нарушилось, и возник дефицит водного баланса. Началось быстрое падение уровня, сокращение площади поверхности и рост солености [Micklin, 2010, 2014a].

Высыхание Аральского моря привело к серьезным негативным последствиям для всей его биоты. Из-за роста солености катастрофически сократилось биоразнообразие. Исчезли пресноводные и солоноватоводные виды. В фауне свободноживущих беспозвоночных к концу 1980-х гг. осталось только небольшое число широко эвригалинных видов [Plotnikov et al., 2014b; Плотников, 2016]. К началу 1980-х гг. исчезли составлявшие основу промысла пресноводные рыбы [Ermakhanov et al., 2012].

В конце 1980-х гг. пересох пролив Берга (пролив Аузы-Кокарал пересох раньше). Аральское море разделилось в 1987 г. на два водоема со своими гидрологическими режимами – Малый (Северный) и Большой (Южный) Арал. В первый впадает Сырдарья, во второй – Амударья. Средняя соленость выросла с 10 до 30 ‰ [Aladin et al., 2008]. После разделения Аральского моря избыток воды стал перетекать из Малого в Большой Арал. На обсохшем дне пролива стекающая вода промыла канал на месте занесенного песком судоходного фарватера [Аладин, Плотников, 1995]. Чтобы удержать в Малом море стекающую из него воду, поднять его уровень и снизить соленость, в 1992 г. в проливе Берга была сооружена земляная плотина. Уровень Малого Арала повысился более чем на 1 м, рост солености прекратился, и она постепенно стала снижаться. Это создало условия для сохранения Малого Арала и последующего восстановления биоразнообразия. Данная плотина была ненадежной и не имела водопропускного устройства для сброса воды и предотвращения подъема уровня Малого Арала выше безопасной отметки. Из-за этого весной происходил прорыв плотины, но ее восстанавливали. В апреле 1999 г., когда плотина была сильно повреждена, ее уже не стали восстанавливать.

В 2004–2005 гг. на месте этой плотины построена новая капитальная плотина, чтобы поднять уровень зарегулированного Малого Арала до отметки +42–43 м. Она имеет водослив для пропуска излишков воды. Когда идет сток через плотину, остаточные водоемы Большого Арала stanovjatsя на некоторое время связанными между собой [Аладин, Плотников, 2008; Aladin et al., 2008; Аладин, 2012].

Площадь Малого Арала после подъема его уровня до расчетного достигла 3487 км<sup>2</sup>, а объем – 27 км<sup>3</sup>. К настоящему времени средняя соленость в Малом (Северном) Аральском море значительно снизилась и составляет менее 10 ‰ [Micklin, 2010]. В дальнейшем она может стать еще ниже.

Снижение солености и образование сильно опресненной зоны около дельты Сырдарьи сделало возможным обратное вселение в Малое море естественным путем многих видов пресноводных и солоноватоводных беспозвоночных, а также пресноводных промысловых рыб, выпавших из фауны Арала из-за осолонения. Это виды, обитающие в рефугиумах – Сырдарье и расположенных в ее низовьях и связанных с ней озерах, или же виды беспозвоночных, имеющие долго сохраняющие жизнеспособность покоящиеся яйца. К настоящему времени [Плотников, 2016] в Малом Арале вновь появились многие виды пресноводных и солоноватоводных беспозвоночных. Однако сильное снижение солености становится неблагоприятным для прежде многочисленных представителей морской фауны и солелюбивых видов. Стало возможным возвращение в Малый Арал и процветание ценных аборигенных промысловых пресноводных видов рыб, что позволило возродить промышленное рыболовство.

Высыхание Большого Арала и рост его солености продолжались, и к концу 1990-х гг. он превратился в гипергалинный водоем. В 2000 г. соленость превысила 60 ‰, а к 2004 г. достигла 100 ‰. Продолжающееся падение уровня привело к образованию остаточных водоемов. В начале 2003 г. Большое море разделилось на глубокий Западный и мелководный Восточный Большой Арал, соединенные неширокой протокой [Завьялов и др., 2006]. К 2006 г. от Восточного Большого Арала отделилась его наиболее глубокая часть – залив Тше-Бас. Во всех них исчезли рыбы, и выжило только несколько видов свободноживущих беспозвоночных. Туда вселился ряд галобионтов, в том числе рачок *Artemia* [Плотников, 2016].

За счет воды, стекающей из Малого Арала через Кок-Аральскую плотину в направлении остаточных водоемов Большого Аральского моря, образовалось большое мелководное озеро – Центральный Арал [Micklin, 2016]. Он очень нестабилен. На протяжении года его площадь сильно изменяется. За зиму и весну она увеличивается, соленость снижается. Летом и осенью площадь быстро сокращается, соленость растет, и в отдельные годы озеро может даже полностью высохнуть.

Кроме существующей Кок-Аральской плотины можно построить еще одну плотину к югу от полуострова Куланды, регулирующую сток из Центрального Арала. Это позволило бы сделать Центральный Арал рыбопромысловым водоемом.

Что может ожидать Арал в будущем? Полностью высохнуть он не может. Даже если сток Амударьи и Сырдарьи сократится до нуля, то для его подпитки все равно останутся грунтовые, талые и дождевые воды, а также дренажные воды с орошаемых земель. Их хватит для сохранения хотя бы части Малого Арала и остатка западного бассейна Большого Арала, которые будут гиперсолеными водоемами [Micklin, 2010, 2016].

Для поддержания Малого Арала в его современном состоянии (уровень +42 м, площадь 3200 км<sup>2</sup>) достаточно в среднем около 2,6 км<sup>3</sup>/год стока Сырдарьи. Еще 0,6–0,7 км<sup>3</sup>/год речной воды нужно для поддержания стока через Кок-Аральскую плотину, регулирующего соленость. В 1992–2011 гг. среднегодовой сток Сырдарьи оценивается в 5,9 км<sup>3</sup>, что более чем достаточно для стабильности Малого Арала [Micklin, 2016].

В обозримом будущем возвращение Аральского моря к его состоянию в 1960 г. крайне маловероятно. Даже если объем речного стока увеличится до прежних 56 км<sup>3</sup>/год, то для полного восстановления этого озера потребуются очень большой срок, порядка 100 лет. Однако весьма перспективны сценарии дальнейшего частичного восстановления Арала [Micklin, 2016].

Можно поднять до отметки +50 м уровень только части Малого моря – залива Большой Сарычеганак. Для этого необходимо перенаправить часть стока Сырдарьи в этот залив по каналу, а в горле залива построить плотину с водосбросом. Если ежегодно подавать в это водохранилище 1 км<sup>3</sup> воды, то оно может наполниться примерно за 10 лет, а если 1,5 км<sup>3</sup> – то за 6 лет. Для компенсации потерь воды в канале потребуется еще ежегодно около 0,2 км<sup>3</sup>. Этот водоем будет почти пресноводным с соленостью менее 2 ‰ [Micklin, 2016]. В нем сформируется фауна пресноводного типа. Он начнет заселяться пресноводными гидробионтами за счет их выноса в этот водоем речной водой, самостоятельной миграции, а также заноса их покоящихся стадий водоплавающими птицами или ветром с пресных или слабо минерализованных водоемов. При этом нынешние его обитатели должны будут исчезнуть из-за низкой для них солености [Плотников, 2016].

Альтернативой может стать реконструкция Кок-Аральской плотины. Ее можно сделать более высокой и поднять уровень всего Малого Арала до отметки +48 м, увеличив его объем и площадь. Для этого необходим сток Сырдарьи не менее 4 км<sup>3</sup>/год. Наполнение до нового уровня продлится долго: при среднегодовом речном стоке 5,0 км<sup>3</sup> – не менее 15 лет, а при 5,5 км<sup>3</sup> – до 12–13 лет. Средняя соленость по мере его наполнения будет меняться и стабилизируется на 6 ‰. Солонатоводным станет почти весь Малый Арал, а сильно опресненной будет только акватория рядом с дельтой Сырдарьи.

Тем не менее не все так хорошо [Micklin, 2016]. Из-за глобального потепления сокращаются ледники и снежники в горах Тянь-Шаня – главный источник воды для Сырдарьи (это верно и для Амударьи, истоки которой находятся на Памире). Со временем их ускорившееся таяние

увеличит речной сток. Но в итоге масса льда и снега так уменьшится, что сток начнет снижаться. Таким образом, предположения, основанные на данных по стоку Сырдарьи за 1992–2011 гг., могут оказаться излишне оптимистичными.

Прогноз возможного будущего остаточных водоемов Большого Аральского моря не внушает оптимизма. Восточный Большой Арал зависит от сброса воды из Малого Арала через Кок-Аральскую плотину и далее Центральный Арал и стока Амударьи, который крайне нестабилен и в настоящее время не каждый год достигает моря. Состояние этого остаточного водоема может меняться от сухого солончака до обширного мелководного гипергалинного озера. К концу 2009 г. он почти полностью высох, но в начале лета и осенью неожиданно многоводного 2010 г. в него поступили большие объемы воды из Амударьи, а также из Малого Арала. Хотя водоем вновь наполнился водой, в последующие годы он снова высох.

Фауна Восточного Большого Арала, представленная до его высыхания, вероятнее всего, только артемией, сможет восстановиться и после ее гибели из цист, оставшихся на обсохшем дне или заносимых ветром с других водоемов, когда сюда вновь придет вода [Плотников, 2016].

Западный Большой Арал зависит от притока грунтовых, дождевых и талых вод, а также сезонного стока из восточного бассейна, получающего воду из Малого Арала. Уровень этого остаточного водоема в августе 2015 г. находился между отметками +24 и +25 м, а площадь составляла ~3000 км<sup>2</sup>. При сохранении существующей ситуации высыхание будет продолжаться, и стабилизация может наступить на отметке около +21 м при площади 2560 км<sup>2</sup>. Но нельзя исключить, что процесс будет продолжаться до тех пор, пока эта часть Аральского моря не превратится в водоем, подобный Большому Соленому озеру в США, Мертвому морю на Ближнем Востоке и озеру Урмия в Иране (соленость >300 ‰) [Micklin, 2014b, 2016]. Тогда и так уже крайне низкое биоразнообразие его фауны еще снизится, и в ней может остаться только артемия, но и она исчезнет при приближении солености к 350 ‰.

Бывший залив Тше-Бас, превратившийся в остаточный водоем, сейчас зависит от притока грунтовых, дождевых и талых вод, а также сезонного стока из Центрального Арала, подпитываемого стоком из Малого Арала. При сохранении существующего режима этот водоем может оставаться стабильным.

Для Западного Большого Арала предполагается перенаправление стока Амударьи из Восточного Большого Арала в Западный. По этому сценарию требуется среднегодовой сток Амударьи около 12,5 км<sup>3</sup>, тогда как за 1990–2011 гг. он в среднем составил только около 5,4 км<sup>3</sup>/год. Следовательно, требуется чуть больше чем его удвоение [Micklin, 2016].

Будущее Западного и Восточного Большого Арала будет определять, в первую очередь, то, сколько воды даст Амударья, и будет ли восстановлен ее сток в Арал.

## Литература

*Аладин Н. В.* Плотины жизни или плотина длиною в жизнь. Часть первая. «Пролог» или Первая Пятилетка (1988–1992 гг.) // Астраханский вестник экологического образования. 2012. Т. 3, № 21. С. 206–216.

*Аладин Н. В., Плотников И. С.* Высыхание Аральского моря и возможные пути реабилитации и консервации его северной части // Тр. Зоол. ин-та РАН. 1995. Т. 262. С. 3–16.

*Аладин Н. В., Плотников И. С.* Современная фауна остаточных водоемов, образовавшихся на месте бывшего Аральского моря // Тр. Зоол. ин-та РАН. 2008. Т. 312, № 1/2. С. 145–154.

*Бортник В. И., Чистяева С. П.* (ред.). Аральское море. Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР, 7. Л.: Гидрометеоздат, 1990. 196 с.

*Завьялов П. О., Арашкевич А. Г., Грабовский А. Б. и др.* Квазисиноптические экспедиционные исследования в западном и восточном бассейнах Аральского моря (октябрь 2005 г.) // Океанология. 2006. Т. 46, № 5. С. 750–754.

*Плотников И. С.* Многолетние изменения фауны свободноживущих водных беспозвоночных Аральского моря. СПб.: ЗИН РАН, 2016. 168 с.

*Aladin N., Micklin P., Plotnikov I.* Biodiversity of the Aral Sea and its importance to the possible ways of rehabilitating and conserving its remnant water bodies // Environmental problems of central Asia and their economic, social and security impacts. 2008. P. 73–98.

*Ermakhanov Z. K., Plotnikov I. S., Aladin N. V., Micklin P.* Changes in the Aral Sea Ichthyofauna and Fishery During the Period of Ecological Crisis // Lakes & Reservoirs: Research and Management. 2012. N 17. P. 3–9.

*Micklin P.* The past, present, and future Aral Sea // Lakes & Reservoirs: Research and Management. 2010. N 15. P. 193–213.

*Micklin P.* Aral Sea Basin Water Resources and the Changing Aral Water Balance // The Aral Sea: The Devastation and Partial Rehabilitation of a Great lake. Springer, 2014a. P. 111–137.

*Micklin P.* Efforts to Revive the Aral Sea // The Devastation and Partial Rehabilitation of a Great Lake. Springer, 2014b. P. 361–379.

*Micklin P.* The Future Aral Sea: hope and despair // Environmental Earth Science. 2016. T. 75, N 9. P. 1–15.

*Plotnikov I. S., Aladin N. V., Ermakhanov Z. K., Zhakova L. V.* Biological Dynamics of the Aral Sea Before Its Modern Decline (1900–1960) // The Devastation and Partial Rehabilitation of a Great Lake. Springer, 2014a. P. 41–76.

*Plotnikov I. S., Aladin N. V., Ermakhanov Z. K., Zhakova L. V.* The New Aquatic Biology of the Aral Sea // The Devastation and Partial Rehabilitation of a Great Lake. Springer, 2014b. P. 137–170.

## PAST AND FUTURE OF THE ARAL SEA

**N. V. Aladin, V. I. Gontar, L. V. Zhakova, I. S. Plotnikov, A. O. Smurov**

*Zoological Institute RAS*

The paper shows the modern anthropogenic regression of the Aral Sea and its consequences. The possible future of this saline closed lake, turned into a group of residual reservoirs, and possible scenarios for their rehabilitation and partial restoration are considered.

# ИННОВАЦИОННЫЕ МЕТОДЫ МОНИТОРИНГА ЭКОСИСТЕМ ОЗЕР ДИСТАНЦИОННЫМ ЗОНДИРОВАНИЕМ В КОРОТКОВОЛНОВОМ ДИАПАЗОНЕ РАДИОВОЛН

С. Ю. Белов

*Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова*

Мониторинг поверхности земли методом дистанционного зондирования в коротковолновом диапазоне радиоволн может позволить оперативно выявлять некоторые геофизические параметры экосистем озер. Данный диапазон позволяет диагностировать и подповерхностный слой земли, поскольку параметр рассеяния формируется и неоднородностями диэлектрической проницаемости подповерхностных структур. Данным методом при организации мониторингового зондирования возможно выявлять области изменения экосистем озер. В работе представлен новый некогерентный метод оценки параметра сигнал/шум. Выполнен сравнительный анализ и показано, что по аналитической (относительной) точности определения этого параметра новый метод на порядок превосходит широко используемый стандартный и одного порядка с известной когерентной методикой. Анализ аналитических погрешностей оценки этого параметра позволил рекомендовать новый метод вместо стандартного.

## Введение

В работе предложен новый некогерентный метод оценки параметра сигнал/шум. Выполнен сравнительный анализ и показано, что по аналитической (относительной) точности определения этого параметра новый метод на порядок превосходит широко используемый стандартный [Белов, 2016ж] и одного порядка с известной когерентной методикой [Белов, 2016б]. Анализ аналитических погрешностей оценки этого параметра позволил рекомендовать новый метод вместо стандартного. Конкретизация осуществлена на примере рассмотрения ионосферного случая [Belov, Belova, 2016b].

Параметр  $\beta_K$  возвращенного, частично рассеянного ионосферного сигнала представляет интерес как важная характеристика «возмущенности», «мутности» статистически неоднородной ионосферной плазмы, показатель надежности работы ионосферных каналов связи, а также диагностических каналов [Белов, Белова, 2016б]. Оперативная и надежная оценка параметра  $\beta_K$  имеет общезначимый интерес (радиофизика, геофизика, оптика и т. д.) [Белов, Белова, 2015а; Belov et al., 2016]. Данный диапазон позволяет диагностировать и подповерхностный слой земли (толщины порядка длины волны падающего излучения), поскольку параметр рассеяния формируется также и неоднородностями диэлектрической проницаемости подповерхностных структур [Белов, Белова, 2015б; Belov, Belova, 2016а].

Проблема измерения и учета рассеивающей способности земной поверхности в коротковолновом диапазоне радиоволн важна для решения ряда задач, например, при диагностике свойств среды с помощью методов, использующих этот радиодиапазон, когда на трассе происходит промежуточное отражение (рассеяние) от земной поверхности, что представляет интерес для геологоразведочных и экологических исследований [Белов, 2016а, в; Белова, Белов, 2016], а также при изучении фундаментальных проблем и решении практических вопросов охраны окружающей среды и особенно водных объектов и экосистем озер.

### Методы расчета (когерентный и некогерентный)

В фиксированной точке приёма на поверхности земли (в скалярном приближении) ионосферный сигнал, узкополосный случайный процесс  $\mathcal{E}(t)$  представляет собой суперпозицию «зеркальной»  $\mathcal{E}_0(t)$  и рассеянной  $\mathcal{E}_P(t)$  по нормальному закону компонент [Белов, Белова, 2016а]:

$$\begin{aligned} \mathcal{E}(t) &= \mathcal{E}_0(t) + \mathcal{E}_m(t) = E_{00} \cdot e^{i(\omega_0 t - \varphi(t))} + \mathcal{E}_m(t) = \\ &= R(t) \cdot e^{i(\omega_0 t - \Phi(t))} = [E_c(t) + i \cdot E_s(t)] \cdot e^{i\omega_0 t}, \end{aligned} \quad (1)$$

где  $\varphi(t)$ ,  $\Phi(t)$ ,  $R(t)$ ,  $E_m(t)$ ,  $m = c, s$  – медленные на периоде  $T = \frac{2 \cdot \pi}{\omega_0}$

случайные процессы;  $E_{00} = Const$ .

Параметр рассеяния определяется отношением:

$$\beta_k^2 = \frac{\text{мощность зеркальной компоненты}}{\text{мощность рассеянной компоненты}} = \frac{E_{00}^2}{2 \cdot \mathcal{E}_T^2}. \quad (2)$$

Здесь и ниже черта «—» означает статистическое усреднение.  $E_C(t) = R(t) \cdot \cos \Phi(t)$  и  $E_S(t) = R(t) \cdot \sin \Phi(t)$  – низкочастотные квадратуры ионосферного сигнала,  $R(t)$  – огибающая,  $\Phi(t)$  – суммарная фаза.

При этом индекс  $K = E4, R2, R4$  означает экспериментально регистрируемые первичные случайные процессы и соответствующий метод их регистрации:  $E4$  – когерентный;  $R2, R4$  – некогерентные амплитудные.

Достаточно широко используется для оценки  $\beta_K$  (2) стандартный некогерентный  $R2$ -метод, основанный на соотношении [Белов, 2016ж]:

$$\frac{\overline{R^2}}{(\overline{R})^2} = f(\beta_{R2}) = \frac{4}{\pi} \cdot \frac{(1 + \beta_{R2}^2) \cdot \exp(\beta_{R2}^2)}{[(1 + \beta_{R2}^2) \cdot I_0(\beta_{R2}^2/2) + \beta_{R2}^2 \cdot I_1(\beta_{R2}^2/2)]^2}. \quad (3)$$

$I_n(x)$  – функция Бесселя  $n$ -го порядка от чисто мнимого аргумента [Альперт, 1960].

Используя когерентный  $E4$ -метод,  $\beta_{E4}$  оценивается по эксцессу  $\gamma_{E4}$  квадратур [Белов, 2016д]:

$$\gamma_{E4}(\beta_{E4}) = \frac{\overline{E_m^4}}{(\overline{E_m^2})^2} - 3 = -\frac{3}{2} \cdot \frac{\beta_{E4}^4}{(1 + \beta_{E4}^2)^2}; \quad m = c, s. \quad (4)$$

Следует заметить, что измеряемыми первичными параметрами являются отношения моментов  $\overline{R^2}/(\overline{R})^2$ ,  $\overline{E_m^4}/(\overline{E_m^2})^2$  соответственно. Естественно, соотношения (3), (4) получены с учетом определенных моделей структуры ионосферного сигнала [Белов, 2015]. Исследования показали, что вероятностные свойства ионосферного сигнала (1) отражений первой кратности достаточно хорошо описываются моделью Райса со смещенным спектром (РС-модель), на основе которой получены выражения (3), (4). Заметим, что выражение (4) когерентной методики *E4* обеспечивает на порядок более высокую относительную аналитическую точность оценки параметра  $\beta_K$  [Белов, 2016г].

В настоящей работе предлагается новый некогерентный *R4*-метод определения  $\beta_{R4}$  по эксцессу  $\gamma_{R4}$  огибающей для РС-модели:

$$\gamma_{R4}(\beta_{R4}) = \frac{\overline{R^4}}{(\overline{R^2})^2} - 3 = \gamma_{R4}(\beta_{R4}) = -1 - \frac{\beta_{R4}^4}{(1 + \beta_{R4}^2)^2}. \quad (5)$$

Для сопоставления приведённых методов в смысле относительных погрешностей, допускаемых при вычислении  $\beta_K$ , обусловленных видом функциональных зависимостей  $f(\beta)$ ,  $\gamma_{E4}(\beta)$  и  $\gamma_{R4}(\beta)$ , получим выражения (6):

$$\varepsilon_K = \left| \frac{\Delta\beta_K}{\beta_K} \right| = \left| \frac{1}{\beta_K} \cdot \frac{dG_K}{dZ_K} \cdot \Delta(Z_K) \right|, \quad Z_K = \frac{\overline{R^2}}{(\overline{R})^2}, \quad \frac{\overline{E_m^4}}{(\overline{E_m^2})^2}, \quad \frac{\overline{R^4}}{(\overline{R^2})^2}, \quad (6)$$

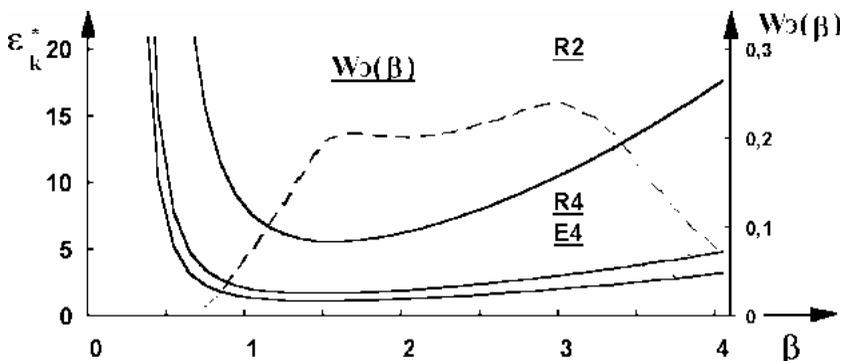
где  $G_K = f, \gamma_{E4}, \gamma_{R4}$ ;  $\Delta(Z_K)$  – абсолютные статистические ошибки измеряемых величин.

Погрешности (включая статистические) для разных методик определения  $\beta_K$ :

$$\begin{aligned} \varepsilon_{R2}(\beta) &= \frac{\pi}{8} \cdot \frac{[(1 + \beta^2) \cdot I_0(\beta^2/2) + \beta^2 \cdot I_1(\beta^2/2)]^3}{\beta^2 \cdot \exp(\beta^2) \cdot I_1(\beta^2/2)} \cdot \Delta(Z_{R2}); \\ \varepsilon_{E4}(\beta) &= \frac{(1 + \beta^2)^3}{6 \cdot \beta^4} \cdot \Delta(Z_{E4}); \\ \varepsilon_{R4}(\beta) &= \frac{(1 + \beta^2)^3}{4 \cdot \beta^4} \cdot \Delta(Z_{R4}). \end{aligned} \quad (7)$$

Статистическая ошибка  $\Delta(Z_K)$  зависит от объёма выборки  $N$  и при одинаковых объёмах выборки может быть разной для каждого из способов. Чтобы акцентировать внимание на погрешностях за счет различия функциональных зависимостей (3)–(5), нормируем (7) на  $\Delta(Z_K)$ .

Графики зависимостей  $\varepsilon_K^* = \frac{\varepsilon_K}{\Delta(Z_K)}$  для  $\beta_{R2}$ ,  $\beta_{E4}$  и  $\beta_{R4}$  приведены на рис.  $\varepsilon_K^*$  будем ниже называть аналитической (относительной) погрешностью метода. Экспериментальное распределение  $W_{\mathcal{D}}(\beta)$  определяет диапазон изменения  $\beta$  [Belov, Belova, 2016b].



Графики зависимостей  $\varepsilon_K^*$ ,  $K = R2, R4, E4$  (сплошные линии) и экспериментальное распределение  $W_\beta(\beta)$  (пунктир) (слой F2, 4,5–9,5 МГц)

### Заключение

Из выражений (4) и (5) видно, что  $\varepsilon_{E4}^* = \frac{2}{3} \cdot \varepsilon_{R4}^*$  – одного порядка и существенно (на порядок) превосходят точность измерения стандартной R2-методики. В итоге анализ аналитических погрешностей оценки параметра  $\beta_K$  позволил рекомендовать метод R4 вместо стандартного R2. При этом достаточно высокая аналитическая (относительная) точность оценки параметра  $\beta_K$  может быть достигнута с помощью некогерентной аппаратуры, с использованием выражения (5) метода R4. Отметим, что за когерентной методикой E4 остается возможность оптимизации статистической ошибки путем соответствующей специальной цифровой обработки ионосферного сигнала [Белов, 2016е].

### Литература

Альперт Я. Л. Распространение радиоволн в ионосфере. М.: АН СССР, 1960.

Белов С. Ю. О некоторых характеристиках рассеивающей способности земной поверхности при дистанционном зондировании в коротковолновом диапазоне радиоволн // Региональные проблемы дистанционного зондирования Земли (РПДЗЗ-2015). Красноярск: СФУ, 2015. С. 101–104.

Белов С. Ю. Дистанционные методы наблюдений и технологии мониторинга природно-техногенных опасных процессов в коротковолновом диапазоне радиоволн // Природные катастрофы: изучение, мониторинг, прогноз. Южно-Сахалинск: ИМГиГ ДВО РАН, 2016а. С. 172–175.

Белов С. Ю. Когерентный и некогерентный методы определения параметра сигнал/шум в задачах распространения радиосигнала коротковолнового диапазона радиоволн // Ломоносов-2016. Т. 1. М.: МГУ, 2016б. С. 171–173.

*Белов С. Ю.* Космический мониторинг характеристик прибрежных территорий для обеспечения экологической безопасности зондированием в коротковолновом диапазоне радиоволн // Экология. Экономика. Информатика. Азовское море, Керченский пролив и предпроливные зоны в Черном море: проблемы управления прибрежными территориями для обеспечения экологической безопасности и рационального природопользования. Ростов-на-Дону: ЮФУ, 2016в. С. 27–41.

*Белов С. Ю.* О путях повышения эффективности работы систем спутникового мониторинга в коротковолновом диапазоне радиоволн // Мировой океан: модели, данные и оперативная океанология. Севастополь: ФГБУН МГИ, 2016г. С. 155–156.

*Белов С. Ю.* О способах определения параметра сигнал/шум при отражении радиоволн от границы раздела двух сред в КВ-диапазоне // Комплексные исследования морей России: оперативная океанография и экспедиционные исследования. Севастополь: ФГБУН МГИ, 2016д. С. 528–533.

*Белов С. Ю.* Программа регистрации квадратурных компонент  $n$ -кратного отраженного от земной поверхности радиосигнала. Свидетельство о регистрации права на программное обеспечение № RU.2016612172 от 19.02.2016 г. 2016е.

*Белов С. Ю.* Экспериментальное исследование характеристик когерентной и некогерентной обработки информации при дистанционном зондировании атмосферы и «шероховатой» земной поверхности в коротковолновом диапазоне радиоволн // Известия высших учебных заведений. Физика. 2016ж. Т. 59. № 12-3. С. 121–124.

*Белов С. Ю., Белова И. Н.* Мониторинг поверхности земли методом дистанционного зондирования в КВ-радиодиапазоне // Экология-2015. Архангельск, 2015а. С. 6–7.

*Белов С. Ю., Белова И. Н.* Функциональная схема экспериментальной аппаратуры когерентного приема в задачах мониторинга поверхности земли методом дистанционного зондирования в коротковолновом диапазоне радиоволн // Прикладные аспекты геологии, геофизики и геоэкологии с использованием современных информационных технологий. Майкоп, 2015б. С. 53–58.

*Белов С. Ю., Белова И. Н.* Исследование характеристик когерентной и некогерентной обработки информации при дистанционном зондировании атмосферы и «шероховатой» земной поверхности в коротковолновом диапазоне радиоволн // Распространение радиоволн РРВ-25. Т. 3. Томск, 2016а. С. 94–97.

*Белов С. Ю., Белова И. Н.* Математические методы определения характеристик рассеивающей способности отражающего экрана когерентным и некогерентным способами // Математика, физика, информатика и их приложения в науке и образовании. М.: МТУ, 2016б. С. 155–157.

*Белова И. Н., Белов С. Ю.* Методы дистанционной диагностики некоторых параметров при исследовании прибрежных районов Арктики в коротковолновом диапазоне радиоволн // Климат и эколого-географические проблемы Российской Арктики. Апатиты: М.А. ООО «КазМ», 2016. С. 20.

*Belov S. Yu.* The analysis of monitoring data of the parameter scattering power the earth's surface in the short-wave range of radio waves // Исследования по геоинформатике: Тр. геофизического центра РАН. 2016. Т. 4, № 2. С. 50.

*Belov S. Yu., Belova I. N.* Methods of obtaining data on the characteristics of superficial and subsurface structures of the earth by remote sensing in the short-wave range of radio waves // IGCP 610 project «From the Caspian to Mediterranean: Environmental Change and Human Response during the Quaternary» (2013–2017), Georgia, Georgian National Academy of Sciences Tbilisi. 2016a. P. 26–29.

*Belov S. Yu., Belova I. N.* The analysis of methods of determination the scattering parameter of the inhomogeneous fluctuating ionospheric screen // Atmosphere, ionosphere, safety (AIS-2016). Kaliningrad, 2016b. ISBN 978-5-9971-0412-2. P. 435–440.

*Belov S. Yu., Belova I. N., Falomeev S. D.* Monitoring of coastal ecosystems by method of remote sensing in the short-wave range of radio waves // Managing risks to coastal regions and communities in a changing world (EMECS'11-SeaCoasts XXVI). 2016.

## **INNOVATIVE METHODS FOR MONITORING LAKE ECOSYSTEMS BY REMOTE SENSING IN THE SHORT-WAVE RANGE OF RADIO WAVES**

**S. Yu. Belov**

*Lomonosov Moscow State University*

Monitoring of the Earth's surface by remote sensing in the short-wave band can provide quick identification of some characteristics of lake ecosystems. This method, based on the application of monitoring probe, can detect changes in lake ecosystems. In this paper, we suggest a new method for estimating the parameters of incoherent signal/noise ratio. Analysis of admissible relative analytical error of estimation of this parameter allowed recommending the new method instead of standard method. A comparative analysis has shown that the analytical (relative) accuracy of determination of this parameter by the new method is an order of magnitude higher than that of the widely used standard method.

## **ВЛИЯНИЕ КЛИМАТИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ НА СТРУКТУРУ И ФУНКЦИОНИРОВАНИЕ ЭКОСИСТЕМ КОНТИНЕНТАЛЬНЫХ ВОДОЕМОВ: МЕХАНИЗМЫ, ПОСЛЕДСТВИЯ, ПРОГНОЗ**

**С. М. Голубков**

*Зоологический институт РАН*

Рассмотрены основные механизмы влияния изменений климата на структуру и функционирование экосистем водоемов. Климатические флуктуации влияют на водные экосистемы через изменения поверхностного стока биогенных и других веществ и их соотношения, интенсивности перемешивания вод в период гомотермии и другие механизмы. В мелководных озерах они могут вызывать смену гидробиологического режима. В некоторых случаях изменения климата способствовали вселению чужеродных видов. Меры по сохранению и восстановлению экосистем водоемов должны учитывать изменения природного фона, происходящие под воздействием колебаний климата.

Климатические колебания относятся к важнейшим факторам, вызывающим изменчивость водных экосистем. Однако, несмотря на обилие свидетельств о влиянии изменений климата на гидрологические характеристики водоемов (например, [Filatov et al., 2002; Филатов и др., 2007]), его влияние на структуру и функционирование экосистем водоемов к настоящему времени остаётся недостаточно изученным. Цель настоящего сообщения – систематизировать различные механизмы этого влияния и показать необходимость учитывать эти механизмы при разработке стратегии сохранения биологических ресурсов водных экосистем различных регионов. Поскольку изменение климата приводит к устойчивому изменению погодных условий, при обсуждении механизмов его влияния помимо результатов долгосрочных исследований широко использовались данные по влиянию погодных условий на различные характеристики водных экосистем. К важным характеристикам погодных условий относятся разработанные в последние десятилетия климатические индексы, такие как индекс Северо-атлантического колебания (*NAO*) и Арктического колебания (*AO*). При положительных значениях обоих индексов преобладают сильные западные ветры, несущие теплый и влажный атлантический воздух на север Европейского континента. Зимы становятся мягче, а количество осадков увеличивается. Наоборот, при отрицательных значениях индексов наблюдается похолодание и уменьшение количеств осадков [Hurrell, 1995].

К важнейшей группе факторов, вызывающих динамику водных экосистем, относятся вызванные климатическими колебаниями изменения в поступлении различных веществ с водосбора. При этом важно учитывать, что сходные климатические фазы (например, потепление климата) в разных климатических зонах могут иметь разные последствия. Например, в северо-западном регионе потепление климата приводит к увеличению количества осадков, а в южных регионах России – к летним засухам и уменьшению поверхностного стока. Очевидно, что возрастание поверхностного стока может приводить к увеличению поступления различных веществ в водоемы. При этом их поступление зависит от состава почв на водосборе и подвижности различных элементов в разных условиях. Для многих водоемов гумидной зоны (зоны повышенного увлажнения) отмечается положительная корреляция между индексами *NAO* и *AO* и количеством биогенных веществ в воде, что приводит к увеличению концентрации фитопланктона [Максимов и др., 2012; Sharov et al., 2014 и др.]). Например, долгосрочные исследования Зоологического института РАН экосистемы оз. Кривого (Северная Карелия), начавшиеся в конце 1960-х гг. в рамках Международной биологической программы, показали, что к началу 2000-х гг. первичная продукция планктона этого чистоводного водоема

в отсутствие видимых источников загрязнений выросла более чем в 2 раза – с 145 до 360 ккал/м<sup>2</sup> [Павельева, Умнова, 2006], что, по-видимому, связано с увлажнением климата и увеличением поступления биогенных веществ с водосбора, а также с атмосферными осадками [Максимов и др., 2012; Бульон, 2017].

Скорость реакции фитопланктона на увеличение количества осадков может зависеть от условий на водосборе озера. В северных регионах, где весной почва оттаивает медленно, дополнительный сток биогенных веществ может происходить не весной, а во второй половине вегетационного сезона. В результате увеличение продуктивности фитопланктона и последующий рост продуктивности зообентоса наблюдаются с задержкой на один год – в следующий вегетационный сезон [Максимов и др., 2012].

В глубоководных озерах ветреная погода (положительная аномалия *NAO* и *AO*) способствует более интенсивному перемешиванию воды в период гомотермии и дополнительному поступлению биогенных веществ из придонных горизонтов в трофогенный слой воды. Например, для крупных глубоководных водоемов Италии показано, что содержание фосфора и концентрация хлорофилла *a* в эпилимнионе летом зависят от силы ветра зимой, которая определяет глубину перемешивания воды в период зимней гомотермии [Salmaso et al., 2003]. Чем выше сила ветра и больше ветреных дней в зимнее время, тем большее количество фосфора попадает из придонных, обогащенных биогенными веществами слоев воды в поверхностные горизонты и тем выше концентрация хлорофилла и, следовательно, первичная продукция в озере.

Продолжительность ледяного покрова, время его наступления и интенсивность перемешивания вод оказывает значительный эффект на интенсивность весеннего «цветения» воды в водоеме. Поэтому погодные условия в зимнее и весеннее время имеют первостепенное значение для динамики пищевых цепей и продуктивности водоемов. Однако влажная ветреная погода не всегда вызывает повышение продуктивности фитопланктона. В Фенноскандии в том случае, если озеро располагается на заболоченном водосборе, увеличение количества осадков приводит к поступлению в водоем дополнительных количеств гумусовых веществ, снижающих прозрачность воды и тем самым лимитирующих первичную продукцию водоема [Markestén, 2006; Максимов, 2012]. При этом стимулируется развитие так называемой «микробальной петли» и снижается роль пастбищной пищевой цепи – вторичных консументов, например, зообентоса [Eriksson Wiklund et al., 2009]. С другой стороны, в более южных регионах сток дополнительных гуминовых кислот с черноземных почв может стимулировать первичную продукцию планктона [Чуков и др., 2010].

В мелководных водоемах в ряде случаев погодные условия влияют на динамику пищевых цепей и приводят к смене их гидробиологического режима. Например, в пресноводном мелководном озере Ботшол в Нидерландах потепление и увлажнение климата вызывает частые смены его гидробиологического режима. В первой половине XX в. при относительно сухом климате преобладал гидробиологический режим с доминированием донных продуцентов (харовых водорослей) и высокой прозрачностью воды. С потеплением и увлажнением климата во второй половине XX в. в годы с большим количеством осадков этот режим становился неустойчивым и сменялся гидробиологическим режимом с высокой биомассой фитопланктона и низкой прозрачностью воды [Rip et al., 2007].

Приведенные примеры показывают, что если климатические изменения затрагивают в первую очередь сообщества продуцентов, то продолжительность изменений в сообществах зависит от продолжительности погодных изменений. Если же климатические колебания влияют на популяции животных верхних трофических уровней с длительными циклами развития, то изменения в трофодинамике водоемов становятся более длительными. Например, исчезновение в результате зимнего замора хищного большеротого окуня из оз. Винтегрин (США) в 1978 г. привело к продолжительному доминированию мелких рыб планктофагов и, как следствие, к снижению плотности крупного зоопланктона и эвтрофированию озера. Только после реинтродукции этого хищника в водоем в 1986 г. произошли обратные изменения и качество воды в озере улучшилось [Mittelbach et al., 1995].

Широко распространено мнение, что наблюдаемая в последнее время тенденция к потеплению климата в первую очередь касается погодных условий в зимнее время и именно они оказывают наибольшее влияние на функционирование экосистем водоемов. Однако погодные условия в летнее время также имеют большое значение. Повышение температуры воды вызывает смену доминантов в фитопланктоне: уменьшение роли диатомовых водорослей и повышение продуктивности зеленых водорослей и цианобактерий [Elliot et al., 2006]. Причем для последних решающее значение имеет повышение летних температур воды, которое часто наблюдается при ациклоническом характере погоды (отрицательные аномалии *NAO* и *AO*) в «холодные» годы. Например, жаркая безветренная весна и лето в 2005 г. при отрицательных *NAO* привели к значительному повышению солености воды в мелководном гиперсоленом оз. Тобечикском (восточный Крым) и массовому развитию в нем рачков артемий – планктонных фильтраторов. Фильтрационная активность артемий в свою очередь привела к снижению первичной продукции планктона, увеличению прозрачности воды и массовому развитию нитчатых водорослей на дне озера

[Golubkov et al., 2007; Голубков, 2012]. Продукция этих водорослей намного превысила продукцию фитопланктона. Это, в свою очередь, повлекло за собой массовое развитие животных бентоса. Таким образом, изменение погодных условий вызвало переход мелководного озера из гидробиологического режима с доминированием планктонных пищевых цепей в режим с доминированием донных пищевых цепей. Аналогичные изменения наблюдались в расположенном на той же широте венгерском оз. Балатон, где в засушливые 2000–2003 гг. произошло снижение уровня воды, развитие донной растительности, в первую очередь нитчатых водорослей, и уменьшение продуктивности фитопланктона [Padisák et al., 2006].

Климатические изменения влияют на соотношение биогенов в поверхностном стоке. В отличие от гумидной зоны, где, как правило, элементом, лимитирующим первичную продукцию, является фосфор, в низких широтах с более засушливым климатом развитие фитопланктона часто лимитирует азот [Abell et al., 2012]. Известно, что снижение отношения  $N : P$  ниже определенного предела вызывает массовое развитие азотфиксирующих цианобактерий, многие из которых выделяют токсичные вещества – цианотоксины. Поэтому аридизация климата может стимулировать развитие этих нежелательных микроорганизмов и вызывать летние заморы рыбы и других животных, как это наблюдалось в степной зоне Канады [Bariça et al., 1980].

В ряде случаев вызванные колебаниями климата изменения в водных экосистемах способствуют вселению в них чужеродных видов и снижению их биоресурсного потенциала. Так, начавшиеся с середины 1990-х гг. вызванные изменениями климата частые затоки придонных обедненных кислородом вод из глубоководной западной части Финского залива в эстуарий р. Невы привели к деградации естественных сообществ зообентоса на его акватории, что способствовало вселению трудно доступных для рыб чужеродных полихет рода *Marenzelleria*. Результатом изменений в зообентосе, составляющем основу кормовой базы рыб в Финском заливе, стало резкое падение уловов рыбы – от 25–40 в середине 70-х годов до всего 3–4 тыс. т в год в настоящее время [Golubkov, Alimov, 2010; Голубков и др., 2012].

Таким образом, даже такой краткий обзор различных механизмов влияния климатических колебаний на структуру и функционирование экосистем водоемов показывает, что естественная динамика экосистем, обусловленная долгосрочными изменениями природных факторов, заслуживает пристального внимания и требует разработки специального адаптивного управления биоресурсами водоемов. Под ним понимается такой режим управления, который учитывает естественную динамику экосисте-

мы, а потребности практики адаптируются к этой динамике и возможностям экосистемы [Голубков, 2006]. Например, при применении принципов Водной рамочной директивы Европейского Союза необходимы периодические пересмотры целевых показателей для восстановления конкретных водных экосистем с учетом изменений, вызванных колебаниями климата [Nöges et al., 2007]. Разработка методов и способов прогнозирования возможных изменений в экосистемах представляет собой особую задачу, решение которой возможно только при знании процессов, протекающих в экосистемах, и закономерностей их качественных и количественных изменений при переменах в окружающей среде. В ряде случаев необходимо применять более жесткие меры по охране и восстановлению водоемов, которые учитывали бы неблагоприятные изменения природного фона, происходящие под воздействием колебаний климата.

### Литература

*Бульон В. В.* Влияние географических факторов на биологическую продуктивность озерных экосистем: моделирование и прогноз // Сибирский экологический журнал. 2017. № 2. С. 127–135.

*Голубков М. С.* Первичная продукция планктона и деструкция органических веществ в соленых озерах Крымского полуострова // Биология внутренних вод. 2012. № 4. С. 31–37.

*Голубков С. М.* Трофодинамика континентальных водоемов: от балансового подхода к динамической изменчивости экосистем // Изв. Самарского НЦ РАН. 2006. Вып. 5. С. 18–25.

*Голубков С. М., Максимов А. А., Голубков М. С., Литвинчук Л. Ф.* Динамика биологического разнообразия и биоресурсов экосистемы восточной части Финского залива под влиянием региональных изменений климата и видов-вселенцев // Динамика биологического разнообразия и биоресурсов континентальных водоемов. СПб.: Наука, 2012. С. 278–293.

*Максимов А. А.* Многолетняя изменчивость климатических факторов и динамика сообществ донных животных // Там же. С. 126–138.

*Максимов А. А., Березина Н. А., Голубков С. М., Никулина В. Н.* Многолетние климатически обусловленные изменения продуктивности экосистемы северного озера // Там же. С. 138–144.

*Павельева Е. Б., Умнова Л. П.* Баланс органических веществ в оз. Кривом (северная Карелия) // Состояние и проблемы продукционной гидробиологии. М.; СПб.: Товарищество научных изданий КМК, 2006. С. 30–35.

*Филатов Н. Н., Назарова Л. Е., Сало Ю. А.* Региональный климат: возможные сценарии изменения климата Карелии. Похолодание или потепление? // Изв. РГО. 2007. Т. 139, вып. 5. С. 72–79.

*Чуков С. Н., Голубков М. С., Рюмин А. Г.* Внутригоризонтная дифференциация структурно-функциональных параметров гуминовых кислот чернозема типичного // Почвоведение. 2010. № 11. С. 1353–1361.

*Abell J. M., Özkundakci D., Hamilton D. P., Jones J. R.* Latitudinal variation in nutrient stoichiometry and chlorophyll-nutrient relationships in lakes: A global study // *Fundam. Appl. Limnol.* 2012. Vol. 181, N 1. P. 1–14.

*Bariča J., Kling H., Gibson J.* Experimental manipulation of algal bloom composition by nitrogen addition // *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* 1980. Vol. 37. P. 1175–1183.

*Elliott J. A., Jones I. D., Thackeray S. J.* Testing the sensitivity of phytoplankton communities to changes in water temperature and nutrient load, in a temperate lake // *Hydrobiologia.* 2006. Vol. 559. P. 401–411.

*Eriksson Wiklund A.-K., Dahlgren K., Sunderlin B., Andersson A.* Effects of warming and shifts of pelagic food web structure on benthic productivity in a coastal marine system // *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 2009. Vol. 396. P. 13–25.

*Filatov N., Nazarova L., Salo Yu.* Possible climate and water balance changes in Karelia (Russia) during the first half of the XXI century // *Large Rivers.* 2002. Vol. 13. Arch. Hydrobiol. Suppl. Vol. 141, N 3–4. P. 341–352.

*Golubkov S., Kemp R., Golubkov M. et al.* Biodiversity and the functioning of hypersaline lake ecosystems from Crimea Peninsula (Black Sea) // *Fundamental and Applied Limnology.* Archiv für Hydrobiologie. 2007. Vol. 169, N 1. P. 79–87.

*Golubkov S., Alimov A.* Ecosystem of the Neva Estuary (Baltic Sea): natural dynamics or response to anthropogenic impacts? // *Marine Pollution Bulletin.* 2010. Vol. 61. P. 198–204.

*Hurrell J. W.* Decadal trends in the North Atlantic Oscillation: Reginal temperatures and precipitation // *Science.* 1995. Vol. 269. P. 676–679.

*Markestén H.* Climate effects on early phytoplankton biomass over three decades modified by the morphometry in connected lake basins // *Hydrobiologia.* 2006. Vol. 559. P. 319–329.

*Mittelbach G. G., Turner A. M., Hall D. J. et al.* Perturbation and resilience – a long-term, whole-lake study of predator extinction and reintroduction // *Ecology.* 1995. Vol. 76, N 8. P. 2347–2360.

*Nôges P., Van de Bund W., Cardoso A. C., Heiskanen A.-S.* Impact of climate variability on parameters used in typology and ecological quality assessment of surface waters – implication on the Water Framework Directive // *Hydrobiologia.* 2007. Vol. 584. P. 373–379.

*Padisák J., Molnár G., Soróczki-Pintér É. et al.* Four consecutive dry years in Lake Balaton (Hungary): consequences for phytoplankton biomass and composition // *Verh. Int. Ver. Limnol.* 2006. Vol. 29. P. 1153–1159.

*Rip W. J., Ouboter M. R. L., Los H. J.* Impact of climatic fluctuations on Characeae biomass in a shallow, restored lake in The Netherlands // *Hydrobiologia.* 2007. Vol. 584. P. 415–424.

*Salmaso N., Decet F., Cordella P.* Spring mixing depth affects the interannual variations in phytoplankton abundance and composition in deep lakes. A case study from Lake Garda (Northern Italy) // *Verh. Int. Ver. Limnol.* 2003. Vol. 28, Pt. 3. P. 1486–1489.

*Sharov A. N., Berezina N. A., Nazarova L. E. et al.* Links between biota and climate-related variables in the Baltic region using Lake Onega as an example // *Oceanologia.* 2014. Vol. 56, N 2. P. 291–306.

**EFFECTS OF CLIMATE OSCILLATIONS ON THE ECOSYSTEM  
STRUCTURE AND FUNCTIONING OF CONTINENTAL WATER BODIES:  
MECHANISMS, CONSEQUENCES, FORECASTING**

**S. M. Golubkov**

*Zoological Institute RAS*

Major mechanisms of the climate change effect on the ecosystem of inland waters are considered. Climate changes affect primary production and food webs via surface runoff of nutrients and humic substances, spring mixing depth, N : P ratio, and water level. Climate fluctuations can modify the hydrobiological regime in shallow lakes, and facilitate invasions of alien species. Conservation and remediation measures should take into account changes in the natural background conditions caused by climate variability.

**ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ  
ГЕОИНФОРМАЦИОННЫХ БАЗ ДАННЫХ  
В СИСТЕМАХ МОНИТОРИНГА ОЗЕР ЕВРАЗИИ**

**И. М. Греков<sup>1</sup>, Л. С. Сырых<sup>1,3</sup>, Е. А. Кошелева<sup>1</sup>, Л. Б. Назарова<sup>3</sup>,  
Д. А. Субетто<sup>1,2</sup>**

<sup>1</sup>*Российский государственный педагогический университет  
им. А. И. Герцена*

<sup>2</sup>*Институт водных проблем Севера КарНЦ РАН*

<sup>3</sup>*Казанский (Приволжский) федеральный университет*

В данной работе представлены современные версии палеогеографических баз данных, различных по своему назначению и району исследований. Использование палеогеографических данных может повысить качество исследований при мониторинге современного состояния озер.

Для понимания хода естественной изменчивости климата и степени антропогенного вмешательства в данный процесс необходимо знать, каким образом изменялся климат в прошлом. Мониторинг состояния озерных систем и динамики их изменения в прошлом требует внедрения современных подходов и технологий. Один из них – создание палеогеографических и палеоэкологических баз данных (рис. 1). Такой подход широко используется в зарубежной науке [Sundqvist et al., 2014; Suggitt et al., 2015]. Однако создание и применение баз палеогеографических данных в России носит локальный либо узко специфичный характер, когда базы данных рассматривают только один из аспектов развития природных систем.



**Рис. 1. Изученность объектов С-З Евразии по данным баз данных**

На основе палеолимнологических данных создана база «PaleoLake» [Субетто, Сырых, 2014; Syrykh et al., 2014]. Донные отложения озер являются важными объектами палеогеографических исследований, поскольку заключают в себе информацию о развитии природно-климатических обстановок с временным разрешением от столетий до года. База «PaleoLake» составлена на основе информации об озерах Восточно-Европейской равнины, изученных палеолимнологическими методами (рис. 2). На данный момент в базе собрана информация о более чем 200 озерах. Метабаза данных включает в себя следующие категории: наименование озера, географическое положение (координаты, регион), морфометрические показатели (глубина средняя, глубина максимальная, площадь), высота над уровнем моря, происхождение котловины, информация о донных отложениях (пробоотбор, тип материала, мощность отложений), виды проводимых с образцами анализов (литологический, геохимический; микропалеонтологические: диатомовый, хирономидный, спорово-пыльцевой и др.), методы датирования (валовой радиоуглеродный анализ, AMS-спектрометрия и пр.), а также интервал времени осадконакопления). База данных содержит ссылки – библиографические источники, которые были использованы в работе.

Анализ базы данных «PaleoLake» позволяет сделать вывод о пространственных и временных особенностях озерного седиментогенеза на Восточно-Европейской равнине, что дает возможность построения временных срезов развития природной среды всей равнины в целом.



**Рис. 2.** База палеолимнологических данных «PaleoLake»

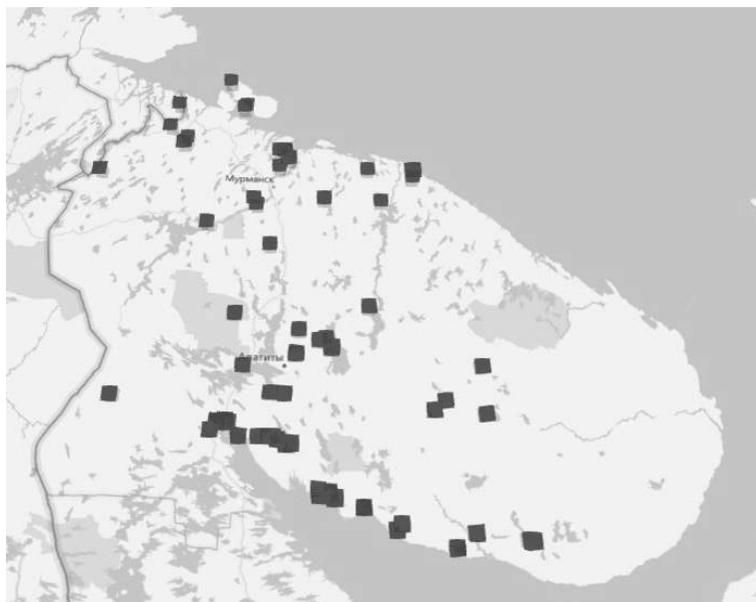
База данных «LGT-HOLOCENE FENNOSCANDIA» (рис. 3) разработана как Web-приложение, написанное на языке HTML/XML [Кошелева, Кошелев, 2011]. База данных, представляемая как интерактивная карта, имеет структуру, разработанную в уже созданных нами палеогеографических базах. Авторами предпринята попытка объединить палеобиологические, стратиграфические и археологические материалы в единую информационную базу, что позволяет провести их совместный анализ, выявить особенности ландшафтов изучаемой территории в разные интервалы рассматриваемого периода, реконструировать региональные особенности. Кроме этого, анализ этих материалов позволяет выявить особенности заселения территории человеком на протяжении мезолита и неолита, проследить влияние динамики климата на расселение человека в данном регионе и выделить особенности антропогенного влияния на природную среду.



**Рис. 3. Визуализация данных базы «LGT-HOLOCENE FENNOSCANDIA»**

База палеогеографических данных «Q-Kola» является региональной базой данных, созданной с целью реконструкции изменений природной среды Кольского полуострова в позднеледниковье и раннем голоцене (рис. 4) [Греков и др., 2014; Греков, Субетто, 2015]. Помимо информации об объектах, таких как описание разрезов, координаты, проведенные анализы, база имеет структуру, заостряющую внимание на возрасте донных отложений озер, когда важны датировки, имеющие индивидуальные лабораторные номера. При этом становится возможным создавать подробные карты выборки объектов, существовавших в определенный период времени. В базе данных «Q-Kola» помимо палеоолимологической информации присутствуют данные о торфяных отложениях болот и геоморфологических разрезов, изученных на территории Кольского полуострова и Мурманской области. Совокупность палеогеографической информации по региону позволяет максимально детально сосредоточиться на изучении конкретных объектов, лежащих в одной физико-географической области, и проследить развитие природных компонентов во времени.

Первые в мире российские статистические модели для реконструкции среднеиюльской температуры воздуха [Nazarova et al., 2008, 2011, 2015] разработаны на основе обширной региональной базы данных по озерам Российской Арктики и Дальнего Востока. База данных включает в себя информацию о химии и морфометрических характеристиках озер, типе окружающей растительности, климатических показателях прилегающей территории, а также о составе фауны хирономид, кладоцер, ризопод и остракод [Nazarova et al., 2011, 2015], флоре диатомовых водорослей и о спорах и пыльце, сконцентрированных в поверхностных слоях озерных донных отложений. В настоящее время в базе данных представлены сведения о 349 озерах, в том числе о 85 полигональных водоемах из разных регионов Урала, Сибири и Дальнего Востока, включающих бассейны крупных рек Северо-Востока России и Новосибирских островов (рис. 5). Девяносто шесть озер, входящих в трансект по северной Якутии через бассейны рек Анабар, Лена, Индигирка и Колыма, пересекающий несколько природных растительных зон от арктической тундры до тайги, использованы для создания статистической модели для реконструкции июльской температуры воздуха по спорово-пыльцевым спектрам [Klemm et al., 2013].



**Рис. 4.** Графическое отображение изученных точек по данным базы данных «Q-Кола»



**Рис. 5. Объекты российской статистической модели для реконструкции среднеиюльской температуры воздуха**

Перечисленные в данной работе базы данных различаются по их специализации, структуре и охвату исследованной территории. Обширные комплексные и междисциплинарные базы данных могут быть сопоставимы и взаимодействовать с локальными и узкоспециализированными базами. Совместное применение баз данных может позволить экстраполировать собранную и проанализированную ранее информацию о районе исследования на аналогичные территории, в которых исследование не проводилось или только планируется.

Исследование частично проведено в рамках проектов РНФ 16-17-10118 и РФФИ 16-05-00727 А.

### **Литература**

*Греков И. М., Кошелева Е. А., Сырых Л. С., Субетто Д. А.* База палеогеографических данных Кольского полуострова «Q-KOLA» // Естественные и технические науки. 2014. № 2. С. 129–133.

*Греков И. М., Субетто Д. А.* Применение базы палеогеографических данных Кольского полуострова «Q-KOLA» в палеолимнологических исследованиях // Тр. КарНЦ РАН. 2015. № 5. С. 48–52.

*Кошелева Е. А., Кошелев С. А.* Географическая информационная система «LGT-HOLOCENE FENNOSCANDIA» // Современные проблемы и пути их решения в науке, транспорте, производстве и образовании-2011: Сб. науч. тр. SWord // Материалы междунар. науч.-практ. конф. Вып. 4, т. 4. Одесса, 2011. С. 32–35.

*Субетто Д. А., Сырых Л. С.* База палеолимнологических данных «PaleoLake»: Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2014621070. 31.07.14.

*Klemm J., Herzsuh U., Pisaric M. F. J. et al.* A pollen-climate transfer function from the tundra and taiga vegetation in Arctic Siberia and its applicability to a Holocene record // *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*. 2013. Vol. 386. P. 702–713.

*Nazarova L. B., Pestryakova L. A., Ushnitskaya L. A., Hubberten H.-W.* Chironomids (Diptera: Chironomidae) in lakes of Central Yakutia and their indicative potential for paleoclimatic research // *Contemporary problems of ecology*. 2008. N 1. P. 335–345.

*Nazarova L., Herzsuh U., Wetterich S. et al.* Chironomid-based inference models for estimating mean July air temperature and water depth from lakes in Yakutia, northeastern Russia // *Journal of Paleolimnology*. 2011. N 45. P. 57–71.

*Nazarova L., Self A., Brooks S. J. et al.* Northern Russian chironomid-based modern summer temperature data set and inference models // *Global and Planetary Change*. 2015. N 134. P. 10–25.

*Suggitt A. J., Wilson R. J., August T. A. et al.* Microclimate affects landscape level persistence in the British Lepidoptera // *Journal of Insect Conservation*. 2015. N 19. P. 237–253.

*Sundqvist H. S., Kaufman D. S., McKay N. P. et al.* Arctic Holocene proxy climate database – new approaches to assessing geochronological accuracy and encoding climate variables // *Clim. Past*. 2014. N 10. P. 1605–1631.

*Syrykh L., Subetto D. A., Grekov I.* Paleolimnological database for lakes of Russian plain // *Proceedings of the II PAST Gateways International Conference and Workshop*. 2014. P. 74–75.

## APPLICATIONS OF GIS DATABASES IN MONITORING SYSTEMS FOR EURASIAN LAKES

**I. M. Grekov<sup>1</sup>, L. S. Syrykh<sup>1,3</sup>, E. A. Kosheleva<sup>1</sup>, L. B. Nazarova<sup>3</sup>, D. A. Subetto<sup>1,2</sup>**

<sup>1</sup>*Herzen State Pedagogical University of Russia*

<sup>2</sup>*Northern Water Problems Institute, KarRC RAS*

<sup>3</sup>*Kazan Federal University*

In this paper, we present modern versions of paleogeographic databases, different in their purpose and area of research. Application of paleogeographic data can improve the quality of research in the monitoring of the current condition of lakes.

## ЗДОРОВЬЕ ВОДНОГО ОБЪЕКТА: АКСИОЛОГИЯ, АКСИОМЕТРИЯ, ОЦЕНКА

**В. В. Дмитриев**

*Санкт-Петербургский государственный университет*

Рассматривается проблема оценки здоровья (экологического благополучия) водного объекта. Формулируются признаки экологического благополучия (ЭБ). Предлагается методика интегральной оценки ЭБ водоема и водотока. Рассматриваются

проблемы выбора параметров оценивания, построения оценочных шкал для отдельных признаков ЭБ. Строятся модели-классификации для многоуровневой и многокритериальной оценки ЭБ водных объектов. Решаются проблемы выбора нормирующих функций и вида синтезирующей функции сводного показателя ЭБ; учета весомости отдельных факторов при построении интегральных показателей ЭБ. Приводятся примеры интегральных оценок ЭБ для малого озера и малой реки.

## **Введение**

Актуальность проблемы рассматривается в контексте необходимости исследования эмерджентных свойств природных систем, количественной оценки этих свойств, отражающих состояние системы в целом. Акцентируется необходимость использования аксиологических основ, раскрывающих современные представления об эмерджентных свойствах объектов исследования в науках о Земле и обществе и аксиометрических возможностях, нацеленных на построение квалиметрических, нумерических и т. п. оценочных шкал (экологическая квалиметрия). Необходимость развития таких исследований характеризует изменение акцентов системологических исследований от косвенных балльных, комплексных оценок к многоуровневым и многокритериальным (интегральным) оценкам интегративных свойств сложных систем.

Целью исследования является разработка и апробация моделей интегральной оценки эмерджентных свойств водных объектов на примере оценки их экологического благополучия (с позиций био-, эко- или антропоцентризма или объединения подходов).

## **Методология исследований**

Аксиологический подход исследует ценности смыслообразующих оснований человеческого бытия, задающие направленность и мотивированность человеческой жизни, качество и факторы, ее определяющие. Основная задача аксиологии видится в анализе ценностей в общей структуре бытия; как ценности, будучи обращены к Природе, формируют ее качество и другие свойства или эти ценности обращены к Человеку, формируя качество его жизни. Последнее выводит аксиологию в разряд междисциплинарности и требует ее уточнения в терминах многих наук, выступая основанием попыток построения отдельной научной дисциплины – аксиометрии. Аксиометрический подход используется при обосновании необходимых и достаточных параметров для получения интегральных оценок, формировании их оценочных шкал и анализе результатов оценивания интегративных свойств эко-, гео- и социосистем.

К таким свойствам относят: устойчивость, экологическую напряженность, степень и стадии трансформации системы, ее здоровье (экологическое благополучие), а также продуктивность природных систем, вектор

состояния системы, ее экологический потенциал, природный капитал, экологические функции; экологическую ценность, степень и результат воздействия на систему. На этой же основе в последние годы формируется методология оценки «мультиопасных явлений» («multi-hazards», «мульти-ОЯ») и рисков («мультириски») при определении интегрального риска от совокупности ОЯ в целом.

В РФ существует ГОСТ-определение экологического благополучия. Вряд ли его можно признать удачным. По ГОСТ 17.1.1.01-77 экологическое благополучие водного объекта – нормальное воспроизведение основных звеньев экологической системы водного объекта. К основным звеньям отнесены пелагические и придонные ракообразные и рыбы. Налицо замена эмерджентного свойства системы характеристикой воспроизведения важного для жизни человека биоресурса водоема. В целом в определении нормальной (понимаемой как хорошая, оптимальная) экосистемы здесь преобладает антропоцентризм с выделением одного класса экосистем, важного с точки зрения ресурсопользования человеком (обществом). В другом случае «хорошую» экосистему предлагалось определять как экосистему с максимальной и разнообразной продукцией, удовлетворяющей экономические и эстетические потребности человека, существующую неограниченно долго в изменяющейся среде [Воробейчик и др., 1994]. В третьем примере вводились новые термины «трофосапробность» и «трофотоксобность» и предлагались классификации для их покомпонентной оценки по некоторому набору параметров [Снакин и др., 1992]. Также предлагались термины «геоэкологическое состояние» и «геоэкологический статус» и делалась попытка оценить их. Однако технология оценки не раскрывалась, а интегративность в оценке статуса сводилась к рекомендации учета концентраций тяжелых металлов в воде и донных отложениях с определением уровня техногенной нагрузки, общего фосфора и фосфорной нагрузки для установления стадии эвтрофирования водоемов [Карнаухова, 1998].

На западе биологическая целостность (Biological Integrity) рассматривалась как ключ к определению здоровья экосистемы. Делались попытки заложить в основу оценки здоровья экосистемы другое эмерджентное свойство, например, устойчивость. Утверждалось, что если устойчивость нарушена, то экосистема теряет свой исходный (здоровый) статус [Семенченко, Разлуцкий, 2010]. Здесь устойчивость трактовалась авторами как своеобразный иммунитет экосистемы, гарант сохранения здорового статуса. В современной научной литературе обсуждаются подходы к оценке экологического благополучия (ЭБ) сложных систем в природе и обществе [Дмитриев, 2009; Семенченко, Разлуцкий, 2010; Дмитриев и

др., 2016]. В современных зарубежных исследованиях ключевыми понятиями остаются биологическая оценка (Biological Assessment) и биологическая целостность (Biological Integrity). Биологическую целостность (Biological Integrity) западные исследователи обычно определяют как способность поддерживать сбалансированное, целостное и адаптивное состояние сообщества организмов, имеющих видовую структуру, разнообразие и функциональную организацию, сравнимую с естественными внутри определенного региона. В США используется термин «ecological integrity». Как основное понятие он фигурирует в американском экологическом законодательстве (Закон о Чистой воде) и используется Агентством по охране окружающей среды Environmental Protection Agency (EPA) [Дмитриев, Огурцов, 2014].

При разработке моделей оценки ЭБ водных объектов признаками благополучия экосистемы водоема нами предлагалось считать: 1) способность системы продуцировать органическое вещество с выделением предпочтительного трофического статуса водоема; 2) высокое качество воды в водоеме; 3) высокое видовое разнообразие биоты (и абиотической среды); 4) высокую устойчивость системы к изменению параметров естественного и антропогенного режимов; 5) низкую скорость закисления (загрязнения, эвтрофикации); 6) высокую скорость самоочищения; 7) сохранение указанных признаков в течение определенного времени [Дмитриев и др., 2016].

Экологически благополучной речной системой было предложено считать систему «водоток + водосбор», которая: 1 – способна продуцировать органическое вещество в соответствии с естественно-историческим этапом развития природной системы и географическими особенностями территории; 2 – является чистой (по химическому составу среды, гео- и гидробиологическим критериям качества среды); 3 – является разнообразной по составу биоты и абиотической среды; 4 – способна к самоочищению; 5 – является устойчивой к изменению естественного и антропогенного режимов функционирования; 6 – способна выполнять социально-экономические функции системы без нарушения функций жизнеобеспечения компонентов биоты и человека и функций средо- и ресурсовоспроизводства; 7 – сохранение указанных признаков в течение определенного времени [Дмитриев и др., 2016].

Обобщение и анализ перечисленных признаков требуют учета перспектив использования водного объекта человеком. Это обуславливает внесение необходимых для свертки показателей приоритетов между исходными критериями. Полученный результат оценки в этом случае может иметь не только региональную и временную привязки, но и зависеть от вида ее использования.

## Материалы и методы

В этапы исследования входят: 1 – создание аксиологической основы исследования; 2 – выделение обоснованной системы критериев для диагностирования ЭБ водного объекта; 3 – введение классов ЭБ, разработка оценочных шкал для критериев и классов оценивания; 4 – решение проблемы нормирования исходных показателей с учетом вида связей и их нелинейности; 5 – выбор синтезирующей функции (вида интегрального показателя); 6 – решение проблемы учета весов (приоритетов) при свертке показателей на всех уровнях исследования; 7 – построение оценочных шкал для всех блоков (уровней исследования) и шкалы сводного показателя (для последнего уровня свертки); 8 – выполнение расчетов интегральных показателей на основе мониторинговых данных и для различных сценариев, учитывающих внешние воздействия на систему. Реализация методики осуществляется в виде последовательного осуществления этих этапов. Отметим, что необходимые и достаточные критерии оценивания могут объединяться в группы, образуя первый и последующие уровни свертки показателей. При этом исследователь может выступать с позиций антропоцентризма, био-, эко- или геоцентризма. Каждая из позиций обуславливает набор параметров оценивания или их сочетание.

Признаки «хороших» (для человека и организмов-гидробионтов) водных систем и их изменение по классам благополучия составляют основу классификации ЭБ водного объекта. Наш опыт показывает, что при ее создании необходимо использовать совмещение антропоцентрического и биоцентрического подходов, учитывать принципы нормирования Н. С. Строганова: приоритетность в использовании водоемов, достаточность самоочищения, обеспеченность условий жизни для промысловых объектов, пригодность воды для питьевых целей. Биоцентризм исследователя проявляется в использовании биологических методов контроля качества среды, биологических индексов для оценки трофности, разнообразия, самоочищения системы; использовании принципов экологического нормирования.

На втором этапе с помощью функциональных преобразований создаются нормированные показатели  $q_i$ . Эти показатели могут быть получены с помощью нормирующих функций двух видов [Хованов, 1996].

Первая функция используется в случае, когда увеличение значения  $i$ -й исходной характеристики не влечет снижения ЭБ, оцениваемого с точки зрения  $i$ -го критерия. При этом всем параметрам со значениями  $x_i$ , не превосходящими некоторого фиксированного уровня  $min_i$ , приписывается минимальное значение  $i$ -го нормированного показателя, а параметрам со значениями  $x_i$ , превосходящими фиксированный уровень  $max_i$  – максимальное значение этого показателя. Исследователь должен допол-

нительно выбрать показатель степени  $\lambda$ , определяющий характер и степень выпуклости нормирующей функции  $q_i(x_i)$  или решать задачу с условием  $\lambda = 1$  (линейный характер изменений).

Вторая функция выбирается, когда при увеличении значения  $i$ -й исходной характеристики ЭБ, оцениваемое по  $i$ -му критерию, не возрастает.

Особенно просто построение нормирующих функций получается при учете значения параметра  $\lambda = 1$ . Далее при оценке ЭБ водных объектов на первом этапе использовались такие простейшие нормирующие функции. В качестве  $min_i$  можно использовать левое граничное значение критерия для первого класса, а в качестве  $max_i$  – правое граничное значение для последнего класса ЭБ.

Диапазон изменения  $q_i$  находится в пределах от 0 до 1. Значение  $q_i = 1$  может свидетельствовать о высоком ЭБ системы по  $i$ -му критерию, а значение  $q_i = 0$  – о ее деградации (или наоборот). Таким образом, исходные параметры в различных шкалах измерения (абсолютные, средние, величины в конкретных единицах измерения, относительные или балльные оценки и т. п.) приводятся к единой безразмерной шкале. После этого над их значениями можно производить математические действия с целью получения интегрального показателя ЭБ.

На третьем этапе выбирается синтезирующая функция интегрального показателя ЭБ:  $Q(q, p)$ . Эта функция строится таким образом, что зависит не только от нормированных показателей  $q_i$ , но и от их значимости, определяемой весовыми коэффициентами  $p_i$ , сумма которых должна равняться 1,0. В качестве выражения для  $Q(q, p)$  используется линейная свертка показателей вида:

$$Q_i = \sum q_i p_i, i = 1, \dots, n,$$

где  $n$  – число критериев оценивания.

На четвертом этапе вводятся (моделируются) оценки весовых коэффициентов  $p_i$ . Как правило, уже само составление программы оценочных исследований ЭБ является первичным «взвешиванием» параметров, компонентов и их свойств. Однако такое взвешивание оказывается недостаточным, так как влияние отобранных главных факторов также неравнозначно, что вызывает необходимость придавать при оценке различным критериям разные приоритеты, веса или коэффициенты значимости. Нередко при этом вес вводится без какого-либо четкого обоснования. В самом простом случае, при равенстве весов исходных параметров, вес определяется простой формулой  $p_i = 1/n$ , где  $n$  – количество критериев.

На пятом этапе для левой и правой границ каждого класса рассчитывается значение  $Q_i$ . В результате выполнения пятого этапа, в случае одного уровня свертки, получаем шкалу сводного показателя ЭБ по классам ЭБ при условии равновесного (неравновесного) учета всех параметров оценивания.

На шестом этапе по собранным в полевых условиях данным рассчитывается значение интегрального показателя ЭБ на определенном момент времени по правилам построения исходной классификации. По совокупности критериев ЭБ относится к определенному классу (либо к пограничному значению между классами). Таким же образом рассчитывается значение сводного показателя ЭБ по другим натурным данным или другим моделям-классификациям. В моделях, учитывающих неполную, неточную и нечисловую информацию, вводятся многоуровневые свертки показателей, а весовые коэффициенты задаются на основе моделей информационного дефицита [Хованов, 1996].

### Результаты и обсуждение

Интегральная оценка ЭБ, выполненная для малого оз. Суури в карельском Приладожье по разным моделям-классификациям, показала, что для 2010–2016 гг. ЭБ озера оценено II классом (выше среднего). При этом значения интегрального показателя ЭБ несущественно изменялись внутри II класса (правая граница) или попадали в левую границу III класса. Сделан вывод о том, что экосистема озера способна сохранять высокий класс ЭБ достаточно длительное время. Апробация моделей интегральной оценки ЭБ речной системы выполнялась для р. Лососинки (Республика Карелия). Оценка ЭБ выполнена для 2014 г. По величине сводного показателя ЭБ речная система отнесена к III классу ЭБ (среднее).

Работа выполнялась при поддержке гранта РФФИ № 16-05-00715.

### Литература

*Воробейчик Е. Л., Садыков О. Ф., Фарафонов М. Г.* Экологическое нормирование техногенных загрязнений наземных экосистем (локальный уровень). Екатеринбург: Наука, 1994. 280 с.

*Дмитриев В. В.* Определение интегрального показателя состояния природного объекта как сложной системы // Общество. Среда. Развитие. 2009. № 4 (12). С. 146–165.

*Дмитриев В. В., Огурцов А. Н.* Подходы к интегральной оценке и ГИС-картографированию устойчивости и экологического благополучия геосистем. III. Интегральная оценка устойчивости почвы и наземных геосистем // Вестн. С.-Петерб. ун-та, сер. 7 Геология, География. 2014. Вып. 4. С. 114–129.

*Дмитриев В. В., Федорова И. В., Бирюкова А. С.* Подходы к интегральной оценке и ГИС-картографированию устойчивости и экологического благополучия геосистем. IV. Интегральная оценка экологического благополучия наземных и водных геосистем // Вестн. С.-Петерб. ун-та, сер. 7 Геология, География. 2016. Вып. 2. С. 37–53.

*Карнаухова Г. А.* Мониторинг загрязнения Братского водохранилища тяжелыми металлами // Водные ресурсы Байкальского региона: проблемы формирования

и использования на рубеже тысячелетий. Т. 1. Иркутск: ИГ СО РАН, 1998. С. 208–210.

*Семенченко В. П., Разлуцкий В. И.* Экологическое качество поверхностных вод. Минск: Беларуская навука, 2010. 329 с.

*Снакин В. В., Мельченко В. Е., Бутовский Р. О. и др.* Оценка состояния и устойчивости геосистем. М.: ВНИИ природа, 1992. 127 с.

*Хованов Н. В.* Анализ и синтез показателей при информационном дефиците. СПб.: СПбГУ, 1996. 196 с.

## **THE HEALTH OF A WATER BODY: AXIOLOGY, AXIOMETRY, ASSESSMENT**

**V. V. Dmitriev**

*St. Petersburg State University*

The problem of assessing the health (ecological well-being) of a water body is considered. The signs of ecological well-being are formulated. A method for integral assessment of the ecological well-being of a water body and a watercourse is offered. The problems of choosing the estimated parameters, the construction of scales for individual characteristics are considered. The problems of choosing the normalizing functions and the type of synthesizing function for the integral index of ecological well-being are addressed, taking into account the weight of individual factors in the construction of integral indicators. Examples of integral assessments of ecological well-being for a small lake and a small river are given.

## **ИСПОЛЬЗОВАНИЕ И ПРАВОВОЙ СТАТУС ВОДНЫХ РЕСУРСОВ**

**В. Д. Жмилевский\***

*Петрозаводский государственный университет*

В данной статье представлен анализ водных ресурсов с точки зрения их использования в современном мире. Дана характеристика их правового статуса с точки зрения географического положения, которое они занимают на карте мира. Отдельно затрагивается тема водных ресурсов, чье положение придает им специфический правовой статус, не свойственный другим водным единицам.

Все мы знакомы с таким понятием, как водные ресурсы. Чаще всего под ним мы понимаем реки, озера, моря и ледники. Но все они, в свою очередь, также делятся на определенные разновидности, режим использования и правовой статус которых регулируется совсем иначе.

---

\* Студент ПетрГУ.

Понятно, что все водные ресурсы, располагающиеся внутри границ того или иного государства, почти всегда находятся под его полным суверенитетом, являясь его неотъемлемыми составляющими. Однако очень часто государственная граница проходит прямоком по водной поверхности, и вот тогда возникает необходимость установления отдельного правового режима для данных территорий (дабы предотвратить возможные нарушения международно-правовых норм).

Ярчайшим таким примером является юридическое разделение морского пространства на отдельные территориальные единицы. Так, согласно Конвенции ООН по морскому праву, принятой в 1982 г., только внутренние и территориальные воды (находящиеся на протяжении 22,2 км от исходной линии внутренних вод) находятся под прямым суверенитетом государства, к которому они прилегают. Дальше установленных линий располагаются прилежащая зона (протяженностью еще 22,2 км от границ территориальных вод), а также исключительная экономическая зона средней протяженностью в 370,4 км от исходной линии [Конвенция..., 1982]. Однако если удастся доказать, что территория континентального шельфа простирается гораздо дальше указанного расстояния, государство в праве рассчитывать на официальное расширение своей исключительной экономической зоны.

Остальная же территория (зона морского пространства, расположенного за пределами территориальных, архипелажных вод, а также исключительных экономических зон) формально относится к открытому морю, которое находится в свободном и равноправном пользовании всех государств в соответствии с принципами и нормами международного права. Так, территории открытого моря даже можно назвать ярчайшим примером *terra nullius* (ничейной земли). На данный момент конвенция не подписана всего несколькими государствами, среди которых и Соединенные Штаты Америки, по сути, они до сих пор оставляют за собой право в одностороннем порядке объявить часть открытого моря территорией, на которую распространяется их юрисдикция. Однако в таком случае они не могут претендовать на официальное расширение за счет территорий, находящихся за пределами установленных линий (даже если будет доказано, что они являются частью примыкающего к ним континентального шельфа). Формально до подписания конвенции они не в праве даже подать об этом заявку, в отличие, например, от России, которая, являясь участником договора, в 2014 г. получила право на расширение своих территорий в Охотском море [Научно-популярный..., 2012].

Еще одним примером *terra nullius* сейчас можно назвать Антарктиду (ледниковая поверхность которой составляет огромную часть всех водных ресурсов Земли). Изначально официальные претензии на материк

предъявляли 9 государств (среди них были также нацистская Германия и Япония, которые после поражения во Второй мировой войне были вынуждены отказаться от своих претензий), еще несколько государств претендовали на территории Антарктики уже без соответствующего юридического оформления. В итоге для решения возникшего спора в 1959 г. был заключен Договор об Антарктике, согласно которому весь континент объявлялся демилитаризованной зоной, на которую не распространяется суверенитет ни одного из общепризнанных государств мира. Стоит отметить, что данный договор не предусматривает отмену всех уже имевшихся территориальных претензий, а лишь приостанавливает их (иными словами, все они официально заморожены до окончания действия договора, который на данный момент считается бессрочным).

Однако подобные разногласия не всегда приводят к общим договоренностям и очень часто порождают ситуации, когда отдельные территории становятся объектом спора между двумя или более субъектами международного права. Так, основную часть Боденского озера, которое располагается на границе Австрии, Швейцарии и Германии, каждая сторона вопроса рассматривает по-своему. Дело в том, что не существует каких-либо юридически оформленных соглашений, определяющих их границы по этому озеру, а соответственно, там нет и никакой (даже формальной) границы. На основании этого австрийская сторона определяет озеро кондоминиумом (совладением) трех государств. Швейцария же с такой трактовкой не согласна, считая, что граница проходит посередине водоема. Позиция Германии по этому вопросу неоднозначна. Однако со временем все противоречия, имевшие отношение к транспортировке судов и рыбалке, были отрегулированы в отдельных соглашениях. Также ярким примером таких разногласий можно назвать до сих пор не решенный спор арктических держав о принадлежности водной территории, под которой расположен хребет Ломоносова, который и Россия, и Дания, и Канада считают продолжением именно своего шельфа.

В принципе, специфическими границами можно назвать и пограничные реки и озера, потому как их пересечение (если оно вообще предусмотрено) имеет определенные условия, не свойственные большинству пунктов пропуска (иногда даже устанавливаемые в рамках отдельных соглашений).

Однако в случае урегулирования сложившихся разногласий водные территории (в основном внутренние воды) приобретают новый статус – международные и пограничные озера и реки [Энциклопедия..., 1985].

Хотя международные реки или их части входят в состав территории соответствующего государства и находятся под его суверенитетом, их правовой режим регулируется как национальным законодательством, так

и международными договорами прибрежных государств. Договорами установлена свобода судоходства по международным рекам иностранных невоенных судов любых государств. Иностранные суда обязаны соблюдать установленные прибрежными государствами и международными соглашениями правила плавания.

Например, режим судоходства по Дунаю установлен Конвенцией о режиме судоходства на Дунае (Белград, 18 августа 1948 г.), а также двумя Протоколами 1998 г. Навигация на Дунае свободна и открыта для граждан, торговых судов и товаров всех государств на основе равенства в отношении портовых и навигационных сборов и условий торгового судоходства. Придунайские государства обязываются содержать свои участки Дуная в судоходном состоянии для речных и на соответствующих участках морских судов и производить необходимые работы для обеспечения и улучшения условий судоходства, а также не ставить препятствий или помех для судоходства на фарватерах Дуная. Придунайские государства консультируются с Дунайской комиссией, которая действует в составе представителей придунайских стран (по одному от каждой). В соответствии с Правилами процедуры Дунайской комиссии (1971 г.) в компетенцию Комиссии входит: наблюдение за исполнением постановлений Конвенции; составление общего плана основных работ в интересах судоходства на базе предложений и проектов придунайских государств; консультация и рекомендации придунайским государствам; установление единой системы навигационной обстановки, а также основных положений о плавании по Дунаю.

Режим Рейна определяется Конвенцией о судоходстве по Рейну (1868 г.). «Правила об общей аварии, действующие на Рейне (Рейнские правила)» приняты в 1979 г. Международным союзом рейнских судовых регистров.

Особые правила действуют в отношении пограничных водоемов. Пограничными являются реки или озера, по которым проходит граница двух или нескольких государств. Право беспрепятственного плавания по этим рекам/озерам согласно нормам МП имеют только суда прибрежных государств. Плавание военных кораблей неприбрежных государств по пограничным рекам (озерам) запрещено.

Также в настоящее время решается вопрос о статусе Каспия. Как известно, до конца 1991 г. вопросы судоходства и рыболовства на Каспии регулировались договорами между Ираном и СССР. После распада Советского Союза возникла проблема раздела ресурсов моря. Как отмечает А. Т. Абакаров, «все прикаспийские государства борются за „справедливый“ раздел, но каждое из них понимает „справедливость“ по-своему» [Рогозин, 2011].

Общие принципы разумного распределения трансграничных водных ресурсов, обязательства и процедуры взаимодействия по использованию, восстановлению и охране трансграничных водотоков определены в Конвенции по охране и использованию трансграничных водотоков и международных озер 1992 г.

В 1998 г. были подписаны российско-казахстанское соглашение по Каспию, в 2001 г. – казахстано-азербайджанское, в 2002 г. – российско-азербайджанское.

Чтобы прийти к общему знаменателю прикаспийские государства периодически проводят встречи на высшем уровне. Так, по итогам Второго каспийского саммита, прошедшего 16 октября 2007 г. в Тегеране, была принята специальная Декларация. Она рассматривается в качестве «свода политических правил поведения, которых Стороны будут придерживаться во взаимоотношениях». Стороны, в частности, заявили, что «только прибрежные государства обладают суверенными правами в отношении Каспийского моря и его ресурсов. Правовой статус Каспия должен определяться Конвенцией о правовом статусе Каспийского моря в качестве базового документа, принятие которого возможно только на основе общего согласия прибрежных государств». До определения нового статуса Каспийского моря в его акватории должны действовать согласованные на основе реализации их суверенных прав режимы судоходства, рыболовства и плавания судов исключительно под флагами прикаспийских стран.

На сегодняшний день конвенция по защите морской среды Каспийского моря 2003 г. создает правовую базу регионального сотрудничества на Каспии в сфере охраны окружающей среды и рационального природопользования.

Конвенция о правовом статусе Каспийского моря до сих пор находится в процессе разработки.

Также определенную специфику в области границ имеет и морское пространство. Так, согласно уже упомянутой ранее Конвенции ООН по морскому праву, неотъемлемыми частями любого государства являются его внутренние и территориальные воды, на которые распространяется вся полнота контроля соответствующих стран. Вместе с этим прилегающую и исключительную экономическую зоны можно назвать зависимыми территориями прибрежных государств, на которые их полномочия распространяются лишь частично, однако в числе таких прав, в частности, осуществление пограничного контроля, а также возможность досмотра в соответствии с законами и правилами, принятыми в данных странах [Устав..., 1945].

Также отдельно стоит упомянуть об анклавах открытого моря – участки морских пространств, удаленные на расстояние свыше 200 миль, уста-

новленных Конвенцией ООН по морскому праву для исключительной экономической зоны прибрежных государств, однако при этом полностью окруженные такой зоной со стороны одного или нескольких государств. В самой конвенции данный термин не выделен отдельно, однако его можно встретить в доктрине международного права, а также в ряде официальных документов международных организаций и конференций. Закрепление такого понятия на практике связано с тем, что в таких анклавах ведётся масштабный рыболовный промысел судами многих государств, который не может быть ограничен прибрежными странами и международными организациями. На сегодняшний день анклавы открытого моря существуют в Беринговом море (окружен исключительными экономическими зонами России и США), Мексиканском заливе (анклавы окружены зонами США, Мексики и Кубы), море Баффина (окружен зонами Канады и Дании) и в некоторых других морях. До недавнего времени анклав открытого моря, принадлежавший России, существовал и в Охотском море, пока в 2015 г. (после решения специальной комиссии ООН) он официально не вошел в состав российской исключительной экономической зоны. Тем не менее с юридической точки зрения такие анклавы имеют статус открытого моря, и осуществлять в них свою деятельность могут все страны в равной степени (однако на деле государства, граничащие с этими территориями, имеют на них несравнимо большее влияние).

Безусловно, это далеко не полный список всех специфических особенностей водных территорий, однако все названные аспекты уже позволяют с уверенностью говорить о том, что в наше время водные ресурсы играют все более важную роль на международной арене. И в данной ситуации остается все меньше сомнений, что главная «битва за воду» еще впереди.

### Литература

*Конвенция ООН по морскому праву* // United Nations, 1982. URL: [http://www.un.org/depts/los/convention\\_agreements/texts/unclos/unclos\\_r.pdf](http://www.un.org/depts/los/convention_agreements/texts/unclos/unclos_r.pdf) (дата обращения: 25.04.2017).

*Рогозин Д.* Война и мир в терминах и определениях // 2011. URL: <http://voina-i-mir.ru/> (дата обращения: 26.04.2017).

*Научно-популярный журнал «Вокруг света»* // 2012. URL: <http://www.vokrugsveta.ru/vs/> (дата обращения: 26.04.2017).

*Устав Организации Объединенных Наций* // United Nations, 1945. URL: <http://www.un.org/ru/charter-united-nations/index.html> (дата обращения: 27.04.2017).

*Энциклопедия Британника* // Encyclopædia Britannica Inc., 1985. URL: <https://www.britannica.com/> (дата обращения: 27.04.2017).

## USES AND LEGAL STATUS OF WATER RESOURCES

V. D. Zhmylevskii

*Petrozavodsk State University*

This article presents an analysis of water resources in terms of their use in the modern world. Their legal status is described in terms of the geographical position that they occupy on the world map. A particular theme considered in the paper is water resources whose position is defined by a special legal status, not possessed by other water units.

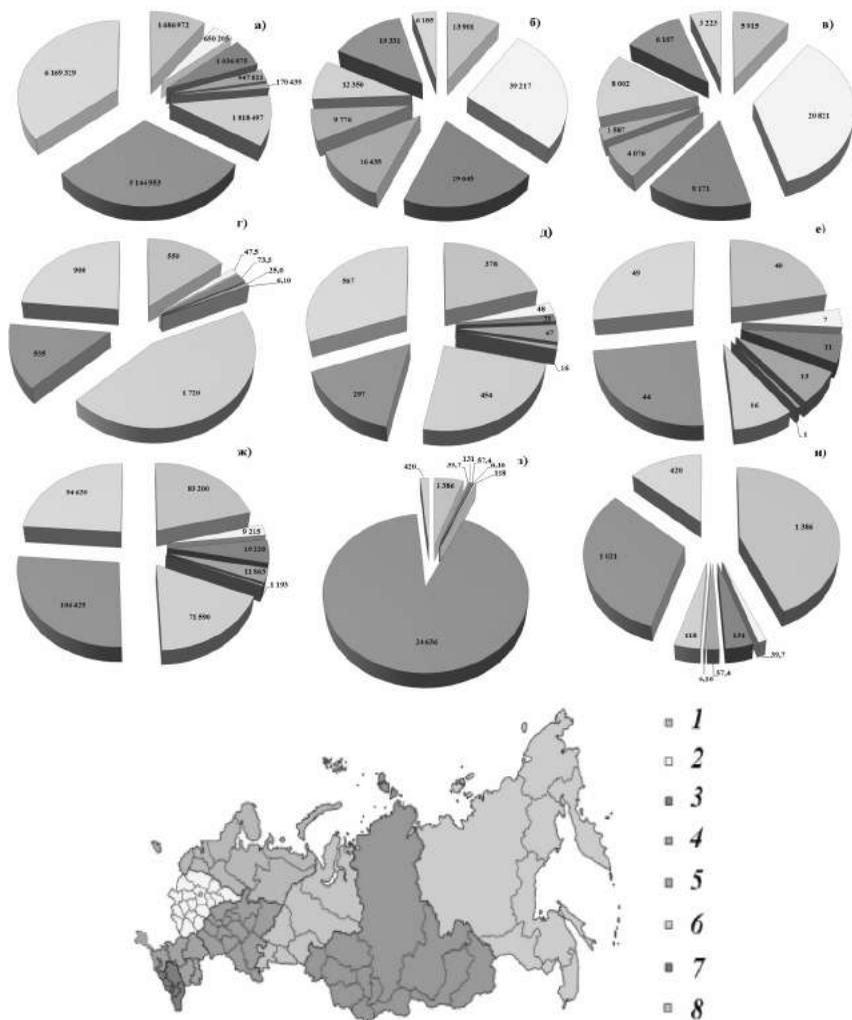
## ПРОСТРАНСТВЕННАЯ НЕОДНОРОДНОСТЬ ОЗЕРНО-РЕСУРСНОГО ПОТЕНЦИАЛА РОССИИ И ОСНОВНЫЕ ТЕНДЕНЦИИ ИЗМЕНЕНИЙ ОЗЕРНОГО ФОНДА

A. В. Измайлова

*Институт озероведения РАН*

Несмотря на значительные ресурсы озерных вод РФ, их пространственное распределение слабо согласовано с размещением населения и промышленного и сельскохозяйственного производства. Дефицит водных ресурсов в экономически развитых регионах обычно преодолевается за счет активного строительства искусственных водоемов, что, как показывает анализ, проведенный в рамках новой оценки водных ресурсов озер страны, часто сопровождается снижением площадей естественных водоемов. Однако количественные изменения озерного фонда пока носят преимущественно локальный характер, в то время как изменения экологического состояния озерных экосистем стали почти повсеместными.

Согласно данным новой оценки водных ресурсов озер РФ [Измайлова, 2016], на спутниковых снимках в пределах страны дешифрируется ~3 900 000 водоемов как естественного, так и искусственного происхождения. Суммарная площадь водной поверхности озер составляет ~335 000 км<sup>2</sup> (в том числе с соленой водой ~20 000 км<sup>2</sup>), а искусственных водоемов ~65 000 км<sup>2</sup>. Водные ресурсы, содержащиеся в озерах РФ, составляют ~25 910 км<sup>3</sup> воды, в искусственных водоемах ~890 км<sup>3</sup>. Несмотря на огромные объемы озерных вод для страны характерна значительная пространственная неоднородность распределения водных ресурсов и их слабая согласованность с центрами размещения населения, а также промышленного и сельскохозяйственного производства. На рис. 1 представлено распределение площадей (а) федеральных округов России и водных ресурсов (ж, з, и), содержащихся в расположенных в их пределах водоемах (г, д, е), в сравнении с проживающим в них населением (б) и с величинами валового регионального продукта (ВРП; в), как одной из характеристик экономического развития региона, взятыми по данным Росстата [Валовой. ..., 1996–2014].



**Рис. 1. Распределение водных ресурсов РФ, содержащихся как в естественных, так и в искусственных водоемах, по федеральным округам:**

а – площади (км<sup>2</sup>); б – население (тыс. чел.); в – ВРП (млрд руб.); г – общее количество водоемов (тыс.); д – количество водоемов 10–100 км<sup>2</sup>; е – количество водоемов >100 км<sup>2</sup>; ж – площади водной поверхности (км<sup>2</sup>); з – объемы воды (км<sup>3</sup>); и – объемы воды без учета оз. Байкал; 1 – Северо-Западный ФО, 2 – Центральный ФО, 3 – Приволжский ФО, 4 – Южный ФО, 5 – Северо-Кавказский ФО, 6 – Уральский ФО, 7 – Сибирский ФО, 8 – Дальневосточный ФО

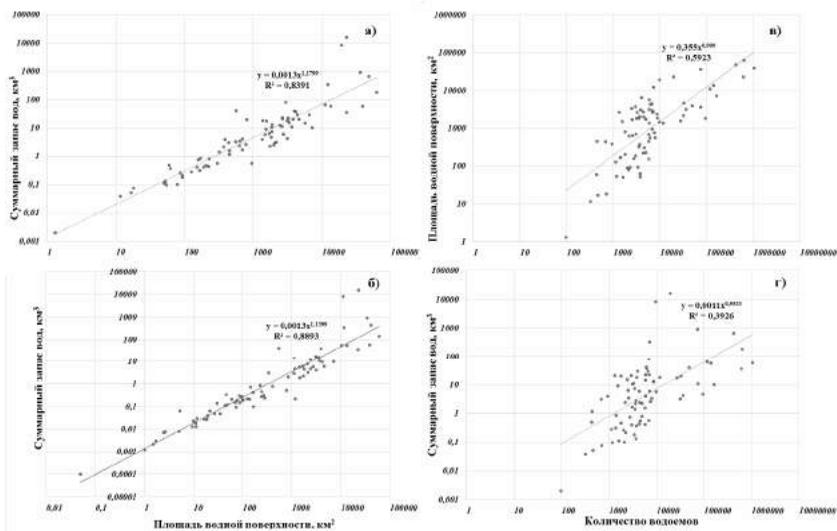
Основное количество озер РФ расположено в пределах северных территорий, характеризующихся слабой заселенностью, а также Западной Сибири, включая ее южную часть, находящуюся в зоне неустойчивого и недостаточного увлажнения. Среди федеральных округов РФ наибольшим числом озер отличается Уральский ФО, на долю которого приходится немногим менее половины всех водоемов, дешифрируемых на спутниковых снимках. Основная их часть характеризуется малыми размерами, около 97 % водоемов имеют площади менее 0,2 км<sup>2</sup>, и лишь сотые доли процента можно отнести к числу средних (от 10 до 100 км<sup>2</sup>) и больших (более 100 км<sup>2</sup>). Значительным числом озер отличаются также Дальневосточный, Северо-Западный и Сибирский ФО, причем доля средних и крупных озер для каждого из них выше, чем для Уральского.

Поскольку основные массы воды сконцентрированы в крупных и глубоких водоемах, наибольшими ресурсами озерных вод характеризуется Сибирский ФО (24 636 км<sup>3</sup>), даже за вычетом оз. Байкал в его озерах и водохранилищах суммарно содержится более 1020 км<sup>3</sup> воды. Сопоставимые запасы озерных вод наблюдаются лишь в Северо-Западном ФО (1386 км<sup>3</sup>). В озерах Дальневосточного ФО содержится 276 км<sup>3</sup> воды, в искусственных водоемах еще ~144 км<sup>3</sup>. В то же время, несмотря на наблюдающуюся наиболее высокую озерность Уральского ФО, суммарный объем его озерных вод составляет всего 118 км<sup>3</sup>. Наименьшим количеством водоемов, даже с учетом прудов и водохранилищ, характеризуются Центральный, Приволжский, Южный и Северо-Кавказский федеральные округа, в пределах которых проживает более половины населения страны и на совместную долю которых приходится производство более половины ВВП. В озерах этих четырех округов суммарно содержится лишь ~13,6 км<sup>3</sup> вод, в том числе ~10 км<sup>3</sup> пресных.

Необходимо признать, что, несмотря на значительные ресурсы озерных вод страны, их пространственное распределение слабо согласовано с размещением населения и величинами ВРП. Кроме того, обращает на себя внимание слабая согласованность доли общего количества водоемов по федеральным округам (рис. 1, г), в том числе средних (рис. 1, д) и больших (рис. 1, е) водоемов в сравнении с долей суммарной площади водной поверхности (рис. 1, ж), и практически ее отсутствие в сравнении с долей суммарных величин озерных водных ресурсов (рис. 1, з). Согласованность слабо проявляется, даже если от общей величины ресурса отнять объем оз. Байкал (рис. 1, и).

Высокая озерность территории еще не является показателем значительных водозапасаов. Так, в пределах азиатской части РФ около 98 % озерных вод сконцентрировано в ее горной части (занимающей более 40 % АЧР), в то же время здесь расположено лишь ~6 % от общего числа

водоемов. Однако общая связь между площадью водной поверхности и значениями суммарных водозапаса присутствует, о чем свидетельствуют графики на рис. 2, а и б, построенные на основе данных, полученных в процессе новой оценки озерного фонда РФ по всем 85 субъектам РФ.



**Рис. 2.** Связи между суммарными площадями водной поверхности и водными ресурсами озер с учетом озер и водохранилищ (а), с учетом только озер (б); между суммарными площадями водной поверхности и общим количеством расположенных в его пределах водоемов (в); между величинами водных ресурсов озер и общим количеством водоемов (г)

Расчитанные для различных территориальных образований величины суммарной водной поверхности (или озерность, как ее удельный показатель), наряду с общими водными ресурсами озер, дают четкое представление о распределении озерного фонда. При этом озерность свидетельствует о возможностях образования и дальнейшего существования озер в данных физико-географических условиях, однако может слабо отражать общие водозапасы, а суммарная величина водных ресурсов, прежде всего, определяется наличием больших и глубоких озер и фактически не зависит от общего количества водоемов в пределах рассматриваемой территории (рис. 2, г).

Новая оценка водных ресурсов озер РФ сопровождалась анализом произошедших за XX столетие количественных изменений озерного фонда. Изменения происходят в двух основных направлениях: с одной стороны,

возрастает количество создаваемых искусственных водоемов, с другой стороны, происходит постепенное сокращение фонда естественных водоемов, прежде всего в наиболее освоенных районах страны.

Благодаря строительству искусственных водоемов, в том числе крупнейших водохранилищ, общий объем пресных вод Центрального, Приволжского, Южного и Северо-Кавказского федеральных округов был увеличен на протяжении XX в. в 22 раза. Однако сравнение современных данных по площадям озер с предшествующими оценками, в том числе с данными Государственного водного кадастра, свидетельствует о значимых изменениях, произошедших с фондом естественных водоемов центральной и южной частей ЕЧР. Масштабное гидростроительство, изменившее систему дренажа, разбор вод на различные нужды привели к сокращению площадей ряда озер и исчезновению некоторых малых водоемов. Резко усилились процессы заиления и зарастания озер высшей водной растительностью. Наиболее яркие изменения произошли в низовьях Волги, в районе западных подступных ильменей (ЗПИ), где, согласно [Измайлова, 2015], в результате изменений, произошедших после зарегулирования Волги, с 1960-х гг. по настоящее время количество водоемов, превышающих 1 км<sup>2</sup>, сократилась более чем на 30 %.

Поскольку основное снижение фонда естественных водоемов происходит в той части ЕЧР, где озерные ресурсы изначально невелики, а плотность населения значительна, данный процесс вызывает существенные опасения. С одной стороны, он компенсируется созданием огромного числа искусственных водоемов, а с другой – исчезает естественная среда обитания водной и околоводной флоры и фауны, в том числе редкой орнитофауны. Озера, кроме всего прочего, часто обладают эстетической ценностью и являются объектами рекреации. Необходимо учитывать, что в сравнении с искусственными водоемами озерные экосистемы схожего размера чаще всего характеризуются большим видовым разнообразием и большей степенью устойчивости. Гидростроительство, бесспорно, помогает решить проблемы водообеспечения, однако крайне нежелательно, чтобы оно сопровождалось фактически полной заменой естественных водоемов искусственными, что уже происходит в ряде областей юга ЕЧР.

Негативные количественные изменения озерного фонда, как показала наша оценка, отмечаются в наиболее заселенных и освоенных частях страны – в центре и на юге ЕЧР. Определенные изменения наблюдаются и в ряде регионов российской Азии, однако здесь, опираясь лишь на накопленные данные наблюдений, выявить устойчивые тренды пока сложно. Для ряда регионов, и прежде всего для районов неустойчивого и не-

достаточного увлажнения, характерны значительные изменения уровня воды и площадей зеркала, а, соответственно, и объемов озерных вод как в течение года, так и в многолетнем разрезе. Эти изменения определяются чередованием фаз обводнения, обусловленных внутривековыми колебаниями климатических характеристик, среди которых определяющими являются атмосферные осадки и температура воздуха. Лишь в отдельных случаях можно отследить четкую тенденцию изменения площадей озер и связать ее с антропогенной деятельностью. Так, даже с учетом циклических колебаний уровня, установлено сокращение площади оз. Чаны, происходящее на протяжении последних 200 лет [Ермолаев, Визер, 2010], в течение 70-летнего периода наблюдений Росгидромета прослеживается устойчивый тренд снижения уровня оз. Убинского ( $y = -3,4774x + 6935$ ) и еще ряда озер меньшего размера.

Сложно выявить четкие тренды снижения или увеличения площадей озер и для районов повсеместного распространения вечной мерзлоты, где эти изменения рассматриваются как индикатор происходящих климатических изменений, связанных с антропогенной деятельностью. Фиксируемые изменения часто обуславливаются гидрологическими факторами и носят циклический характер, при этом они могут определяться как короткопериодными колебаниями, так и колебаниями продолжительностью в несколько десятков лет. В последнее десятилетие вопросам изменения площадей озер, расположенных в регионах повсеместного распространения многолетней мерзлоты, в научной литературе уделяется много внимания, однако из-за вышеупомянутых причин публикуемые выводы подчас бывают достаточно противоречивы. Проведенный нами в рамках новой оценки водных ресурсов озер анализ изменения площадей больших и средних озер северных регионов за 50-летний период не позволил выявить четкие тенденции ни по одному субъекту федерации.

Если количественные изменения озерного фонда РФ пока носят преимущественно локальный характер, то изменения экологического состояния озерных экосистем к началу XXI в. стали проявляться практически повсеместно. Изменения качества воды ряда озер России, расположенных близ центров развития промышленности, отмечались уже со 2-й половины XIX в., однако о начале масштабного загрязнения водоемов можно говорить лишь с 30-х гг. XX в., когда началось форсированное наращивание промышленного потенциала страны, сопровождавшееся строительством предприятий-гигантов в различных ее частях. По мере интенсификации сельскохозяйственного производства к промышленному загрязнению водоемов добавилось и существенное увеличение скоростей их эвтрофирования. Быстрее всего от всех видов загрязнения страдали небольшие мелководные озера, тогда как крупнейшие озера страны вплоть до начала

60-х гг. XX в. продолжали в целом сохранять естественное состояние. Начало масштабного загрязнения крупнейших озер вызвало необходимость проведения серьезных экологических исследований и принятия природоохранных мер, позволивших приостановить и даже существенно улучшить их экологическое состояние. В то же время экологическое состояние многих малых и средних озер до настоящего времени остается неблагоприятным. Наиболее ярко негативные процессы наблюдаются в центре и на юге ЕЧР, где доля условно чистых вод в суммарной величине водных ресурсов для ряда субъектов федерации составляет лишь доли процента. Происходит и постепенное ухудшение экологического состояния все большего числа водоемов, расположенных в северной и восточной частях России.

### Литература

*Валовой* региональный продукт по субъектам РФ в 1996–2014 гг. // Росстат. Web: <http://knoema.ru/csgxgof/регионы-россии-валовой-региональный-продукт-1996-2014-гг>.

*Ермолаев В. И., Визер Л. С.* Современное экологическое состояние озера Чаны (Западная Сибирь) // География и природные ресурсы. 2010. № 2. С. 40–46.

*Измайлова А. В.* Роль больших и малых озер в развитии территорий на примере Прикаспийского региона // Географические проблемы региона Каспийского моря и изучение путей достижения устойчивого развития территорий. М.: Медиа-Пресс, 2015. С. 26–41.

*Измайлова А. В.* Водные ресурсы озер Российской Федерации // География и природные ресурсы. 2016. № 4. С. 5–14.

## SPATIAL HETEROGENEITY OF RUSSIA'S LAKE RESOURCE POTENTIAL AND THE MAIN TRENDS OF CHANGE IN LAKE RESOURCES

A. V. Izmailova

*Institute of Limnology RAS*

Although the resources of lake waters in Russia are quite rich, there is a mismatch between their spatial distribution and the distribution of population and industrial and agricultural production. The scarcity of water resources in economically developed regions is usually overcome by active construction of artificial reservoirs, which is often accompanied by a decrease in the area of some lakes, as shown by the analysis carried out in the framework of the new assessment of water resources of lakes. However, quantitative changes in lake resources are still mostly local, while changes in the ecological status of lake ecosystems have become almost ubiquitous.

# ФЕДЕРАЛЬНЫЙ ЗАКОН «ОБ ОХРАНЕ ОЗЕРА БАЙКАЛ»: ИСТОРИЯ И ТРУДНОСТИ РЕАЛИЗАЦИИ

Т. П. Калихман

*Институт географии им. В. Б. Сочавы Сибирского отделения РАН*

Уникальность озера Байкал, а также необходимость снижения сложившейся антропогенной нагрузки привели к его включению в перечень объектов всемирного природного наследия ЮНЕСКО. Объект сложен в управлении, так как Байкал относится к двум субъектам РФ, а его водосборный бассейн – к четырем субъектам РФ и к Монголии. В целях сохранения Байкала принят единственный в России закон для природного объекта. Утверждение закона не упростило ситуацию с природоохранным режимом в отношении озера, а в некоторых случаях усложнило ее. До настоящего времени не все необходимые подзаконные акты и нормативы разработаны и утверждены для полной реализации этого рамочного закона. Автор высказывает свое мнение о сложностях совмещения природоохранной парадигмы на международном и федеральном уровнях и необходимости экономического развития для стабильного уровня жизни населения на региональном и локальном уровнях, а также рассматривает исторический аспект использования ресурсов озера.

**Антропогенное воздействие на экосистему озера.** История освоения Байкала, особенно с появлением промышленности в конце XIX в. и ее развитием в XX в., подтверждает общее «колониальное» отношение к территории азиатской части России и ее «ресурсное проклятье» [Хилл, Гэдди, 2007]. Антропогенное воздействие на экосистему озера в историческом контексте происходило рывками (ступенчато):

1. Взамен сплавов и волоков возникновение сибирского тракта (XVIII в.), проходящего в зимнее время по льду Байкала, в летнее – в обход его по старому Комарскому тракту (к югу от хребта Хамар-Дабан). Начался неводный лов рыбы.

2. Почти полное исчезновение популяций байкальского осетра и тайменя, истребление соболя, добыча золота в южной части побережья, в том числе драгами, строительство печей по обжигу известняка с разрушением отдельных гор и возникновение дороги от пос. Култука до пос. Бабушкина (2-я половина XIX в.).

3. Строительство на южном берегу Байкала Кругобайкальского участка (КБЖД) Транссибирской железной дороги (1899–1905), с максимально аккуратно вписанными в естественный ландшафт туннелями, подпорными стенками и иными техническими сооружениями, сохраняющими очертания и параметры береговой линии, учитывающими сейсмику и водоотведение.

4. Возникновение верфей (порт Байкал) по сбору катеров и иных кораблей, рыбоприемные пункты и рыбоперерабатывающие заводы, в том числе с использованием заключенных Озерлага, с максимальным выловом 5–9 тыс. т рыбы в год (1920–1950-е гг.).

5. Строительство плотины Иркутской ГЭС (1958) с последующим подъемом (более чем на один метр) и зарегулированием уровня Байкала (1958–1962), приведшими к формированию нового гидрологического мало зависящего от природных факторов режима озера, размыву берегов и локальному повышению мутности воды, потере существенных площадей пригодных для жизни людей земель, изменению естественных внутригодовых колебаний уровня воды, смещению нерестилищ и мест нагула рыб с последующим снижением их размера, веса и общей массы, нарушению возрастных характеристик, снижению уловов омуля [Атутов и др., 1999] и к потере 141 населенного пункта.

6. Возникновение (1966) на южном берегу г. Байкальска и строительство Байкальского целлюлозно-бумажного комбината (работа была прервана в 2008–2010 гг. и полностью прекращена в 2013 г.) привели к формированию локальной зоны (около 30 км<sup>2</sup>) с нарушенным гидрохимическим режимом и загрязнением донных отложений, изменению гидробиологических и микробиологических характеристик вод, сооружению 14 накопителей шлам-лигнина (общая масса более 6,5 млн т, общая площадь распределения около 1 км<sup>2</sup>).

В этот же период для работы целлюлозной промышленности начался молевой сплав леса (в 1971 г. переведен на сплав плотами и полностью прекращен только с окончанием советской власти). Объем каждого плота был не менее 1000 м<sup>3</sup>, так как при меньших объемах плоты разрушались в штормовых условиях. По данным СМИ до 1980 г. было зафиксировано 32 аварии плотов с потерей 73 000 м<sup>3</sup> древесины и нарушением прилиторальных участков озера.

7. Возникновение г. Северобайкальска (1978) с неэффективными очистными сооружениями и строительство БАМа (непосредственно по берегу в 1976–1989 гг. и со строительством четырех низкокачественных мысовых туннелей в 1989 г.).

Помимо названных воздействий заметно увеличилась зона загрязнения Байкала у дельты р. Селенги после начала работы Селенгинского целлюлозно-картонного комбината и роста промышленных сбросов в Селенгу предприятий г. Улан-Удэ, отсутствие или неэффективная работа очистных сооружений в большинстве поселков вокруг Байкала при заметном росте числа их жителей и посетителей, увеличивающийся сброс загрязненных вод с водного транспорта, повсеместный браконьерский лов рыбы.

**Концепции охраны природы.** Поток принятых решений и постановлений по сохранению Байкала никак не влиял на экологическую ситуацию:

– В 1960 г. постановление СМ СССР № 652 «Об охране и использовании природных богатств в бассейне Байкала» (об обязательных очистных сооружениях, готовых к работе еще до пуска БЦБК).

– В 1969 г. постановление СМ СССР № 52 «О мерах по сохранению и рациональному использованию природных комплексов бассейна озера Байкал» (попытка определить водоохранную зону Байкала в границах его бассейна с более строгим режимом природопользования). Создан Байкальский заповедник.

– В 1971 г. постановление ЦК КПСС и СМ СССР «О дополнительных мерах по обеспечению рационального использования и сохранения природных богатств бассейна озера Байкал» (в связи с невыполнением предыдущих решений).

– В 1977 г. постановление ЦК КПСС и СМ СССР «О мерах по дальнейшему обеспечению рационального использования природных богатств бассейна озера Байкал» (с требованиями к 1985 г. полностью прекратить сбросы неочищенных сточных вод в водоемы и максимально сократить воздушные выбросы, а также прекратить молевой сплав древесины по озеру к 1995 г.).

– В 1986 г. в начале «перестройки» на берегах Байкала созданы Байкало-Ленский заповедник, Прибайкальский и Забайкальский национальные парки.

– В 1987 г. постановление ЦК КПСС и СМ СССР № 434 «О мерах по дальнейшему обеспечению рационального использования природных богатств бассейна озера Байкал в 1987–1995 гг.». В разработке постановления принимала участие Академия наук СССР, которая в том же году создала «Нормы допустимых воздействий на экологическую систему озера Байкал (на период 1987–1995 гг.)» и утвердила их совместно с заинтересованными ведомствами. Нормы не стали действенным механизмом снижения негативных воздействий, но стали первой концептуальной и методической основой для последующих разработок.

В этом же постановлении был обозначен пункт по созданию «Территориальной комплексной схемы охраны природы бассейна озера Байкал» (ТерКСОП) с принципиально новой концепцией: доминанта – охрана природы, а истощительное природопользование ставилось от него в зависимость; впервые предложено экологическое зонирование (три зоны с жестко ограниченным, ограниченным и регламентированным режимами природопользования); природоохранная стратегия опиралась на преимущественное развитие рекреационного комплекса. Работа над ТерКСОП

показала, что охрана природы требует финансовых затрат, сопоставимых со всей экономикой региона. Реализация проекта не началась в 1990 г. из-за разрушения в этот период советского и возникновения нового государства. Благодаря этой разработке стала ясной логика противоречий между глобальным императивом охраны природы и региональными потребностями промышленного и социального развития, появилось обоснование включения Байкала в перечень объектов всемирного природного наследия.

Озеро Байкал – объект всемирного природного наследия ЮНЕСКО, а в России это единственный природный объект, теперь имеющий защиту в виде федерального закона. 20-я сессия Комитета по всемирному наследию ЮНЕСКО (7.12.1996 г.) подтвердила уникальность объекта «Озеро Байкал», так как он отвечает всем четырем критериям номинации [Kalikhman, Kalikhman, 2012]. Размеры объекта «Озеро Байкал» огромны, население на его берегах около 150 тыс. человек, и его территория относится к Иркутской области и Республике Бурятия. Кроме того, в границы объекта не вошли крупные города и поселки (Култук, Слюдянка, Байкальск, Бабушкин, Северобайкальск), которые вносят значимый вклад в загрязнение. Различная ведомственная принадлежность земель заставила искать юридические решения проблем единого управления и правового поля.

**Закон «Об охране озера Байкал».** Теперь ясна необходимость принятия закона для всех российских объектов всемирного природного наследия, отражающего требования к охране и использованию их территорий. Рамочный (непрямого действия) федеральный закон «Об охране озера Байкал» принят в 1999 г., к нему предусматривалось принятие целого ряда подзаконных и нормативных правовых актов.

Ключевой для всего закона стала статья, определяющая понятие Байкальской природной территории (БПТ) и ее экологических зон: центральная (ЦЭЗ), буферная (БЭЗ) и атмосферного влияния (ЭЗАВ). Принятая схема зонирования БПТ базируется на разработанных в ТерКСОП Байкала идеях трех зон охраны, но в случае БПТ акцент смещается с регламентации режимов природопользования на требования к сохранению состояния природной среды в каждой зоне. Решение принципиального вопроса определения и утверждения границ БПТ и, главное, ЦЭЗ с наиболее строгим природоохранным режимом затянулось на семь лет. В 2006 г. постановлением правительства РФ граница ЦЭЗ была утверждена (Распоряжение № 1641-р от 27.11.2006 г.), она совпала с внешними границами объекта всемирного наследия.

Утверждение границ ЦЭЗ позволило продолжить работу над иными нормативными актами, необходимыми для реализации содержания

25 статей закона о Байкале. В частности, получил возможность реализации «Перечень видов деятельности, запрещенных в ЦЭЗ БПТ», принятый еще в 2001 г.

Вторая проблема – граница водоохранной зоны акватории Байкала, имеющая более строгие ограничения для некоторых видов хозяйственной деятельности, чем ЦЭЗ. В новой редакции Водного Кодекса РФ (2006) обозначено, что ширина водоохранной зоны Байкала определяется специальным документом. Почти через 10 лет распоряжением Правительства РФ № 368 от 5.03.2015 г. «Об утверждении границ водоохранной и рыбоохранной зон озера Байкал» ее внешние границы были совмещены с границами ЦЭЗ и, соответственно, объекта всемирного наследия. Проблема эта обсуждается до настоящего времени, поскольку утвержденный вариант не удовлетворил органы самоуправления поселков и городов на берегах, а также основных природопользователей, требующих большей свободы в использовании природных территорий. Мнения разделились: поддерживающие расширение поселков и развитие допустимых видов хозяйственной деятельности предлагают сузить водоохранную зону до 500 м; другие – не изменять ее границы, так как это ничего не изменит (все поселения находятся ближе 500 м от уреза воды). Расширение поселков невозможно, так как они находятся в окружении земель ООПТ или земель гослесфонда.

Пока не утверждены разделы, посвященные охране и использованию рекреационных ресурсов БПТ, составляющие содержание статьи закона «Комплексные схемы охраны и использования природных ресурсов БПТ». Выполненная в 2002 г. комплексная схема по рекреационным ресурсам на Байкале не была утверждена из-за отсутствия на тот момент границ ЦЭЗ. В рамках действующей ФЦП «Охрана озера Байкал и социально-экономическое развитие Байкальской природной территории на 2012–2020 годы» эта работа вновь планируется на 2018 г.

Статья закона «Организация туризма и отдыха в ЦЭЗ» актуальна в связи с декларированием рекреационной деятельности как доминирующего вида деятельности человека на Байкале. С другой стороны, туризм и отдых на природных территориях ЦЭЗ по тексту закона «осуществляется в соответствии с правилами, обеспечивающими соблюдение предельно допустимых норм нагрузок на окружающую среду». Первый проект «Правил организации туризма в ЦЭЗ» был выполнен в 2002 г., одобрен Законодательным собранием Иркутской области и Народным Хуралом Бурятия, но не принят в связи с отсутствием на тот момент точных границ ЦЭЗ.

Для подготовки «Правил организации туризма в ЦЭЗ» использовался опыт апробированной на Байкале в 1997 г. и рекомендованной центром всемирного наследия методики «Пределов допустимых изменений

(Limits of Acceptable Change)» (ПДИ – ЛАС) на Байкале [Калихман и др., 1999], которая смещает результирующую со спорного определения количественных параметров предельных нагрузок при так называемом «площадном подходе» (число людей/площадь/ед. времени) к определению состояния природных условий на территории. Тем не менее приказом Минприроды РФ № 63 от 05.03.2010 г. «Об утверждении нормативов предельно допустимых воздействий на уникальную экологическую систему озера Байкал и перечня вредных веществ, в том числе веществ, относящихся к категориям особо опасных, высокоопасных, опасных и умеренно опасных для уникальной экологической системы озера Байкал» впервые в разделе 5 был формально утвержден именно «площадной» вариант «Нормативов допустимой антропогенной нагрузки на уникальную экологическую экосистему озера Байкал» и приведена таблица раздела «Допустимые нагрузки на локальные наземные экосистемы центральной экологической зоны БПТ при непрерывном пребывании людей в вегетационный период». И даже этот известный подход определения числа людей на территориях в Приказе чрезвычайно поверхностно изложен, поэтому положения приказа невозможно использовать на практике.

**Заключение.** Два последних столетия в жизни Байкала можно считать ключевыми по степени антропогенного воздействия. Циничными теперь выглядят постановления органов власти СССР об охране Байкала одновременно с неограниченным использованием его ресурсов. Остается актуальным отношение к Сибири и Байкальскому региону как к внутренней колонии и поставщику природных ресурсов и энергии, сказывающееся на природоохранной политике. Впервые об этом сказано в XIX в. [Потанин, 1884] и более развернуто через 10 лет [Ядринцев, 1892], через 100 лет ситуация мало изменилась [Безруков, 2009]. На природоохранные мероприятия в Сибири у федеральных властей нет ни желания, ни средств. Охрана природы делится на два направления: а) территориальная охрана природы, реализующаяся в деятельности ООПТ и направленная на сохранение естественного ландшафтного и биотического разнообразия; б) принятие нормативных и законодательных актов, ограничивающих загрязнение природной среды.

На 01.01.2017 г. к закону о Байкале утверждены границы БПТ и ее экологических зон; перечень запрещенных видов деятельности в пределах ЦЭЗ; границы водоохранной зоны и границы рыбоохранной зоны; допустимые пределы уровня воды в Байкале (постановление правительства РФ «О максимальных и минимальных значениях уровня воды в озере Байкал» от 26.03.2001 г. № 234); нормативы ПДВ; госучет объектов, ока-

зывающих негативное воздействие на окружающую среду. Для развития туристской деятельности – базы экономического благополучия для местных жителей – пока не принят ни один предусмотренный законом нормативный акт (в том числе правила организации туризма и отдыха в ЦЭЗ БПТ, комплексная схема охраны и использования природных ресурсов БПТ).

Первый государственный заповедник страны – Баргузинский – возник в 1916 г. на Байкале. Большинство ООПТ основных категорий прилегают к Байкалу, при этом на удалении от береговой территории отмечается явный недостаток ООПТ. Акватория озера входит в систему ООПТ очень ограниченно: трехкилометровая полоса вдоль Баргузинского заповедника, заливы Чивыркуйский и часть Баргузинского в Забайкальском нацпарке. Важно для сохранения озера включение озерных экосистем в границы ООПТ: острова Малого моря с окружающей их акваторией, залив Посольский Сор, акватория дельты Селенги и совместной дельты рек Кичера и Верхняя Ангара, исток Ангары, водные участки охранных зон всех прилегающих к озеру ООПТ.

### Литература

*Безруков Л. А.* Бюджетно-финансовый баланс отношений: центр – сибирские регионы // Изв. Иркутского гос. ун-та, сер. Политология. Религиоведение. 2009. № 1 (3). С. 11–19.

*Атутов А. А., Пронин Н. М., Тулохонов А. К. и др.* Гидроэнергетика и состояние экосистемы озера Байкал. Новосибирск: СО РАН, 1999. 280 с.

*Калихман А. Д., Педерсен А. Д., Савенкова Т. П., Сукнев А. Я.* Методика «Пределов допустимых изменений» на Байкале – участке всемирного наследия ЮНЕСКО. Иркутск: Оттиск, 1999. 100 с.

*Калихман Т. П.* Особо охраняемые природные территории Байкальского региона // Изв. РАН, сер. Географическая. 2007. № 3. С. 75–86.

*Потанин Г. Н.* Завоевание и колонизация Сибири // Живописная Россия: Отечество наше в его земельном, историческом, племенном, экономическом и бытовом значении / Под общ. ред. П. П. Семенова. СПб.: [Тип.] М. О. Вольф, 1881–1901. Т. 11 (Западная Сибирь). СПб.; М., 1884. С. 31–48.

*Хилл Ф., Гэдди К.* Сибирское бремя. Просчеты советского планирования и будущее России // Международные процессы. М.: Научно-образовательный форум по международным отношениям, 2007. 328 с. (Серия «Региональная библиотека международника».)

*Ядринцев Н. М.* Сибирь как колония. К юбилею трехсотлетия (в географическом, этнографическом и историческом отношении). Изд. 2-е. СПб.: Изд-во С. М. Сибирякова, 1892. 720 с.

*Kalikhman T. P., Kalikhman A. D.* Lake Baikal // World Heritage. 2012. N 64. P. 122–127.

## **FEDERAL LAW "ON PROTECTION OF LAKE BAIKAL": IMPLEMENTATION HISTORY AND CHALLENGES**

**T. P. Kalikhman**

*V. B. Sochava Institute of Geography, Siberian Branch of the Russian Academy  
of Sciences*

The natural phenomenon of the largest on the Asian continent freshwater lake Baikal and the history of its development to the present time have attracted the attention of scientists in the field of Natural Sciences and Humanities. The uniqueness of the lake, as well as the need to reduce the existing human pressure, has led to its inclusion in the UNESCO list of world natural heritage. As Baikal falls under the authority of two regions of the Russian Federation and its catchment is divided between Mongolia's Huvsgul aimak and four regions of the Russian Federation, Russia's only Federal law dedicated to a specific natural object was adopted to secure its conservation. Adoption of this law has not however simplified the conservation regime for the lake, but has in some cases even made it more complicated. To date, not all the necessary bylaws and regulations have been developed and approved for full implementation of this framework law. The author expresses his opinion about reconciling the international and federal levels of the conservation paradigm, and about the need for economic development to secure regional and local sustainable livelihoods, and considers the historical aspect of the use of the lake's resources.

## **ВРЕМЕННАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ ОЗЕРНЫХ ВОДНЫХ РЕСУРСОВ РЕГИОНОВ НЕДОСТАТОЧНОГО УВЛАЖНЕНИЯ**

**Н. Ю. Корнеевкова**

*Институт озероведения РАН*

Регионы недостаточного увлажнения характеризуются значительной многолетней и внутригодовой динамикой ресурсов озерных вод. Анализ данных космических снимков, полученных в разные периоды водности, может представлять интерес при оценке временной изменчивости водных ресурсов регионов водного дефицита.

Территории юга Западной Сибири Российской Федерации относятся к зоне недостаточного увлажнения, характеризующейся значительной пространственно-временной внутригодовой и многолетней динамикой озерных водных ресурсов (рис. 1).

В настоящее время отмечается существенный недостаток информации о количественных значениях временного изменения уровней воды озер регионов водного дефицита на фоне современных изменений климатических условий. Использование данных космической съемки за

различные сезоны года и периоды водности может восполнить ограниченность данных гидрометрических измерений на территориях недостаточного увлажнения.



**Рис. 1. Регионы недостаточного увлажнения Российской Федерации:**

границы зоны недостаточного увлажнения выделены по данным [Атлас..., 1974]; 1 – оз. Сиверга; 2 – оз. Убиенное; 3 – оз. Убинское

На основе анализа данных космических снимков, охватывающих период с 1984 по 2016 г., были получены временные ряды значений площадей водной поверхности озер юга Западной Сибири Российской Федерации – Сиверга, Убиенное и Убинское, расположенных в пределах зоны недостаточного увлажнения, за различные по водности годы (рис. 2–3).

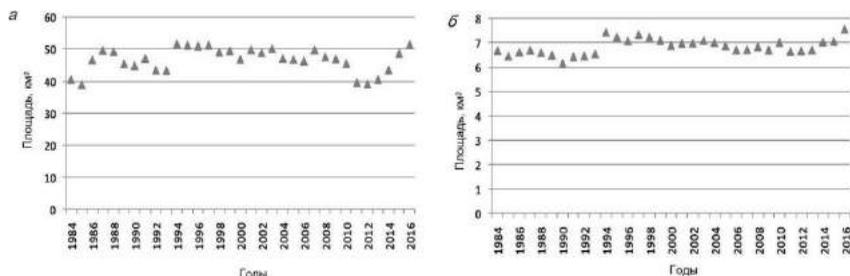
Озера Сиверга и Убиенное приурочены к Тоболо-Ишимской лесостепи, представляющей собой плоскую равнину со средними высотами около 100 м.

Озеро Сиверга расположено на юге Тюменской области на границе с Казахстаном (территории России принадлежит большая часть его акватории). Площадь водного зеркала водоема, по данным Государственного водного реестра, составляет 53 км<sup>2</sup>. Озеро бессточное, горько-соленое. Занимает котловину суффозионно-просадочного происхождения [Водноболотные ..., 1998].

Озеро Убиенное находится в 30 км к востоку от оз. Сиверга, недалеко от пос. Ильинка Казанского района. Озеро слабосоленоватое, соединяется с расположенным севернее оз. Сладким каналом, который в настоящее

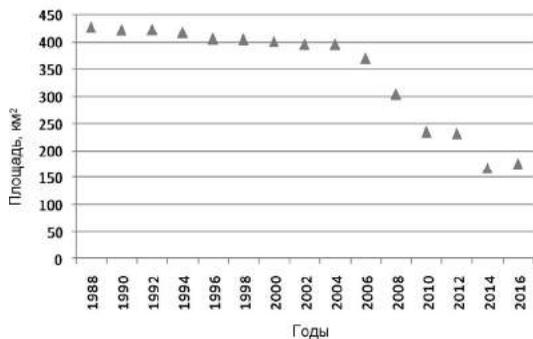
время зарастает высшей водной растительностью. Озеро образовано в днищах древних ложбин стока.

Наибольшие значения площадей водного зеркала на озерах Сиверга и Убиенное отмечены в 1987, 1994, 2003 и 2007–2008 гг., а также в настоящее время. Синхронное уменьшение площадей на водоемах наблюдается в периоды с 1987 по 1990, с 1994 по 2000, с 2003 по 2006 и с 2008 по 2011 г.



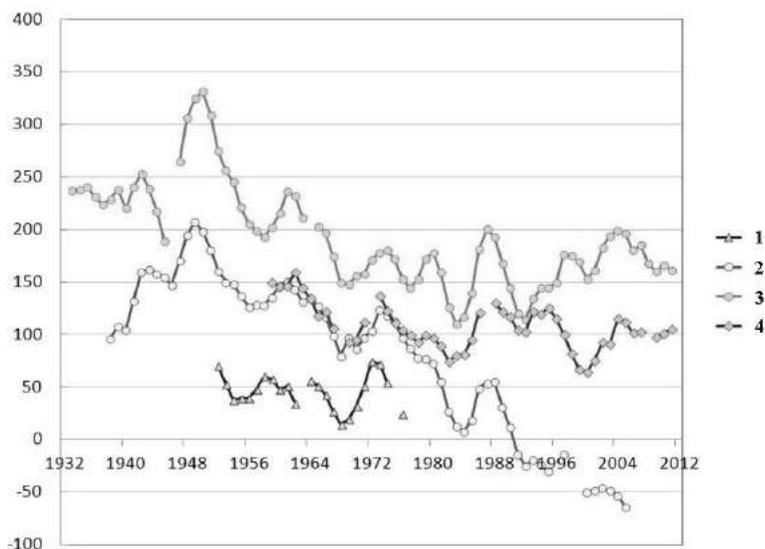
**Рис. 2.** Изменение площадей водного зеркала озер Сиверга (а) и Убиенное (б) за период 1984–2016 гг.

Озеро Убинское расположено в Барабинской низменности на территории Убинского и Каргатского районов Новосибирской области. Озеро бессточное, пресноводное. По данным Государственного водного реестра, площадь акватории озера в периоды повышенной водности достигает 440 км<sup>2</sup>. Отмечаются многолетние циклические колебания уровней воды озера с амплитудой до 2 м. В настоящее время озеро находится в мало-водной фазе.



**Рис. 3.** Изменение площади водного зеркала оз. Убинского за период 1988–2016 гг.

Имеющиеся данные об изменении уровня воды оз. Убинского (рис. 4) свидетельствуют о наличии тренда к снижению уровня озера за период наблюдений. Можно отметить, что доступные показатели изменения уровня воды озера согласуются с полученными значениями динамики площади водного зеркала водоема, основанными на анализе космических снимков.



**Рис. 4. Изменения уровня воды некоторых озер зоны недостаточного увлажнения Западной Сибири, по данным: [Измайлова, Шмакова, 2015]:**

1 – оз. Эбейты (Омская область); 2 – оз. Убинское (Новосибирская область); 3 – оз. Сартлан (Новосибирская область); 4 – оз. Кучукское (Алтайский край)

В течение нескольких лет в Институте озераведения Российской академии наук проводилась новая оценка ресурсов озерных вод по всем субъектам Российской Федерации. Она выполнялась на основе современных космических снимков с применением единой, специально разработанной методики [Измайлова, 2016]. В ходе оценки производился подробный количественный подсчет водоемов по градациям крупности и измерение площадей их водной поверхности. В рамках проведенных работ были обобщены данные по суммарным площадям водной поверхности, полученные для среднего по водности года.

Использование материалов космической съемки за разные периоды водности позволяет произвести уточнение результатов проведенной в ИНОЗ РАН оценки озерных ресурсов Российской Федерации за счет учета их значительной изменчивости в регионах водного дефицита.

Дальнейшее изучение динамики водных ресурсов регионов недостаточного увлажнения с учетом их многолетних и внутригодовых колебаний на основе гидрометеорологических данных и данных космических снимков может представлять интерес при установлении причин, определяющих изменчивость водных ресурсов озер, а также выявлении регионов, характеризующихся наибольшей чувствительностью водных ресурсов к изменениям климатических параметров и увеличению антропогенного воздействия.

### **Литература**

*Атлас* мирового водного баланса: Приложение к монографии «Мировой водный баланс и водные ресурсы Земли». М.; Л.: Гидрометеоздат, 1974. 65 карт.

*Водно-болотные угодья* России / Под общ. ред. В. Г. Кривенко. Т. 1: Водно-болотные угодья международного значения. М., 1998. 255 с.

*Измайлова А. В.* Озерные водные ресурсы европейской части Российской Федерации // *Водные ресурсы*. 2016. Т. 43, № 2. С. 122–133.

*Измайлова А. В., Шмакова М. В.* Временная изменчивость водных ресурсов озер, расположенных в регионах недостаточного увлажнения // *Фундаментальные проблемы воды и водных ресурсов: Тр. Всерос. науч. конф. с междунар. участием* (Москва, 15–18 сент. 2015 г.). М., 2015. С. 69–72.

## **TEMPORAL VARIABILITY OF LAKE WATER RESOURCES IN LOW-MOISTURE REGIONS**

**N. Yu. Korneenkova**

*Institute of Limnology of RAS*

Regions with insufficient moisture levels are characterized by considerable among- and within-year variations of lake water resources. The analysis of satellite images for different periods of water availability can be of interest in estimating temporal variability of water resources in low-moisture regions.

**ГИГАНТСКИЕ ЛЕДОВЫЕ КОЛЬЦА  
И ВНУТРИТЕРМОКЛИННЫЕ ВИХРИ  
НА ОЗЕРАХ БАЙКАЛ И ХУБСУГУЛ:  
ПЕРЕЧЕНЬ, СТРУКТУРА ВОДЫ В РАЙОНАХ КОЛЕЦ  
И МЕХАНИЗМ ИХ ФОРМИРОВАНИЯ**

**А. В. Кураев<sup>1,3</sup>, Е. А. Захарова<sup>1,2</sup>, F. Rémy<sup>1</sup>, А. Г. Костяной<sup>4,5</sup>,  
М. Н. Шимараев<sup>6</sup>, N. M. J. Hall<sup>7</sup>, А. Я. Сукнёв<sup>8</sup>**

<sup>1</sup>*LEGOS, Universite de Toulouse, CNES, CNRS, IRD, UPS Toulouse, France*

<sup>2</sup>*Государственный океанографический институт,*

*Санкт-Петербургское отделение*

<sup>3</sup>*Томский государственный университет*

<sup>4</sup>*Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН, Москва*

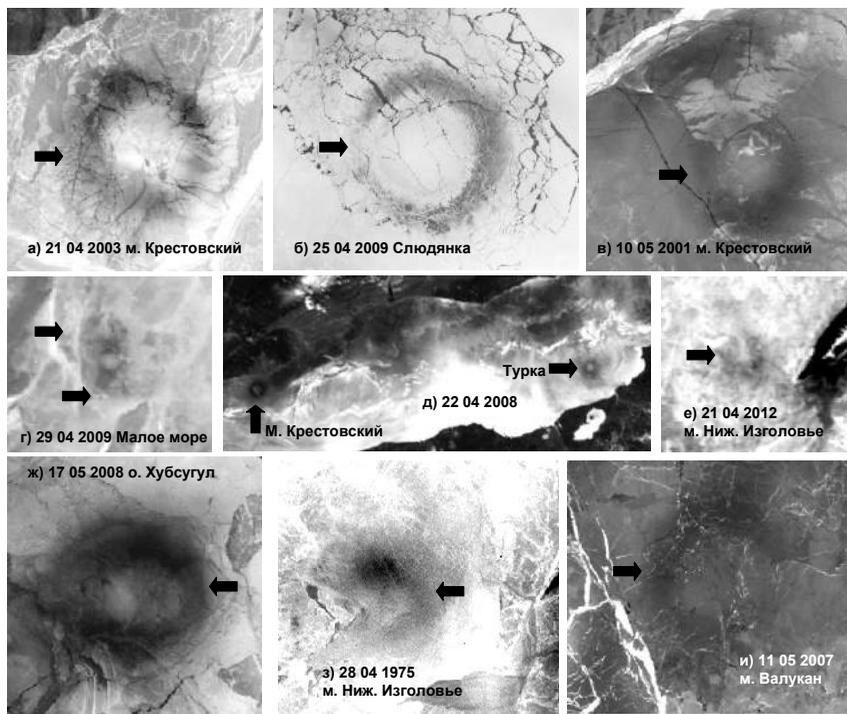
<sup>5</sup>*Московский университет им. С. Ю. Витте, Москва*

<sup>6</sup>*Лимнологический институт СО РАН, Иркутск*

<sup>7</sup>*Большая Байкальская Тропа Бурятия (ББТ Бурятия), Улан-Удэ*

Наблюдения гигантских ледовых колец на озере Байкал (Россия) вызвали в последнее время научный и общественный интерес. Эти кольца с темным (более тонким) льдом с типичным диаметром 5–7 км и шириной кольца 0,9–1,3 км (рис. 1) окружают белый лед. Круглая форма колец и неясное происхождение этого природного явления представляют собой загадку и проблему для научных исследований. До сих пор нет четкого понимания причины их происхождения. Мы представляем перечень ледовых колец, обнаруженных на основе спутникового снимков и фотографий, для периода 1974–2014 гг. Было обнаружено 45 колец на озере Байкал (по сравнению с 13 ранее известными), а также впервые четыре кольца на соседнем озере Хубсугул (Монголия). Результаты наших гидрологических исследований подо льдом в районе колец на озере Байкал в 2012–2017 гг. и на озере Хубсугул в 2015 г. показывают наличие (до и во время проявления ледовых колец) относительно теплых внутритермоклинных вихрей в виде двояко-выпуклых линз, расположенных точно под кольцами. Мы полагаем, что эти вихри являются причиной формирования ледовых колец в этих озерах. Мы проводим переоценку существующих гипотез формирования ледовых колец и обсуждаем возможные механизмы образования и эволюции вихрей.

Исследование поддержано проектами ERA.NET RUS Plus S&T #226 ERALECC, CNES TOSCA LakeIce, IDEX Transversalité InHERA, РФФИ 13-05-91051 «Озера Байкал и Ладога – комплексные совместные исследования», РФФИ-РГО 17-05-41043-РГО-а «Особенности водообмена в глубоких озерах на примере озер Иссык-Куль и Байкал».



### Примеры ледовых колец для озер Байкал и Хубсугул:

данные Landsat 1–7 (а, в, ж–и), MODIS/Terra (г, д) и МКС (б). Все изображения, за исключением (д), ориентированы на север

## GIANT ICE RINGS AND INTERTHERMOCLINE EDDIES ON LAKES BAIKAL AND HOVSGOL: INVENTORY, WATER STRUCTURE IN THE REGIONS OF ICE RINGS AND MECHANISM OF THEIR FORMATION

A. V. Kouraev<sup>1,3</sup>, E. A. Zakharova<sup>1,2</sup>, F. Rémy<sup>1</sup>, A. G. Kostianoy<sup>4,5</sup>,  
M. N. Shimaraev<sup>6</sup>, N. M. J. Hall<sup>7</sup>, A. Ya. Suknev<sup>8</sup>

<sup>1</sup>LEGOS, Université de Toulouse, CNES, CNRS, IRD, UPS Toulouse, France

<sup>2</sup>Saint-Petersburg Branch of State "Oceanographic Institute"

<sup>3</sup>Tomsk State University

<sup>4</sup>The P. P. Shirshov Institute of Oceanology of the Russian Academy of Sciences

<sup>5</sup>Moscow Witte University

<sup>6</sup>Institute of Limnology of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences

<sup>7</sup>Большая Байкальская Тропа Бурятия

Observations of giant ice rings on Lake Baikal (Russia) have recently sparked scientific and public interest. However, there is still no clear consensus on their origins. Here, we provide an inventory of the ice rings based on satellite imagery and photography for 1974–2014. We have identified 45 rings on Lake Baikal (compared with 13 previously known) and also for the first time four rings for the neighbouring Lake Hovsgol (Mongolia). The results of our hydrographic surveys beneath the ice rings in Lake Baikal in 2012–2017 and in Lake Hovsgol in 2015 show the presence of warm double-convex lens-like eddies before and during manifestation of ice rings. We suggest that these eddies are the driving factor for the formation of ice rings in these lakes. We reassess the existing hypotheses of ice ring formation and discuss the potential mechanisms of eddy formation.

## **MULTISCALE MULTISPECTRAL REMOTE SENSING OF ICE COVER IN LAKES ONEGO AND LADOGA USING A COMBINATION OF SPACEBORNE, AERIAL DRONE AND GROUND-BASED MEASUREMENTS**

**A. V. Kouraev<sup>1,3</sup>, E. Zakharova<sup>1,2</sup>, N. N. Filatov<sup>4</sup>, S. Baklagin<sup>4</sup>, K. Barbieux<sup>5</sup>, B. Merminod<sup>5</sup>, D. V. Pozdnyakov<sup>6</sup>, D. A. Kondrik<sup>6,7</sup>**

<sup>1</sup>*LEGOS, Universite de Toulouse, CNES, CNRS, IRD, UPS Toulouse, France*

<sup>2</sup>*State Oceanography Institute, St. Petersburg, Russia*

<sup>3</sup>*Tomsk State University, Tomsk, Russia*

<sup>4</sup>*Northern Water Problems Institute, KarRC RAS, Petrozavodsk, Russia*

<sup>5</sup>*Geodetic engineering laboratory TOPO, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL), Lausanne, Switzerland*

<sup>6</sup>*Scientific Foundation “Nansen International Environmental and Remote Sensing Centre”, St. Petersburg, Russia*

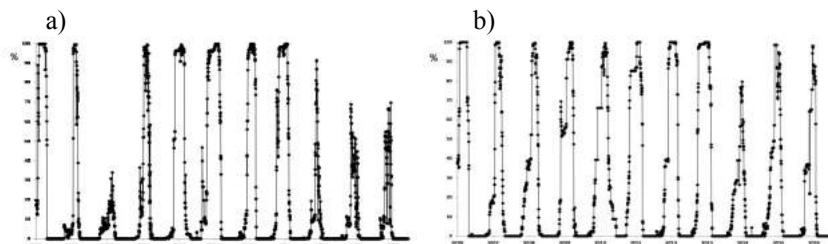
<sup>7</sup>*Arctic and Antarctic Research Institute, St. Petersburg, Russia*

We present results of multidisciplinary studies of ice cover and associated water structure from various satellites, drone and field work done in the framework of a Russian-Swiss multi-disciplinary project "Lake Ladoga: Life under ice – Interplay of under-ice processes by global change".

Studies of ice regime characteristics of lakes Onego and Ladoga (Fig. 1) were done using historical airborne observations (since 1955 for Onego and since 1965 for Ladoga) and satellite images in visible and IR bands (from NOAA, Terra and Aqua satellites) complemented by microwave observations. These data have been collected and digitized. Using these datasets, several types of analysis were performed for both lakes. First, a statistical analysis of time series of airborne data were performed, and description of the dynamics of the ice cover (the phases of the ice regime and their duration) was done.

Then the duration of ice formation (freezing), ice cover period and ice break-up were determined from satellite imagery for 2006–2016 with a time step of 1 day.

According to the observations of the average duration of the period when Lake Ladoga is completely covered by ice for period 2006–2015 it was 48 days. Maximal value of the duration of this phase was observed in 2011, when the lake was completely ice-covered for 111 days. In 2008, 2014 and 2015 Lake Ladoga was only partially ice-covered. The duration of ice cover presence period on Lake Onego was 130 days, with maximal values in 2011 (193 days) and minimal ones in 2007 (67 days).



**Fig. 1. Dynamics of ice cover of Lake Ladoga (a) and Onego (b), data from NOAA satellite (2006–2016)**

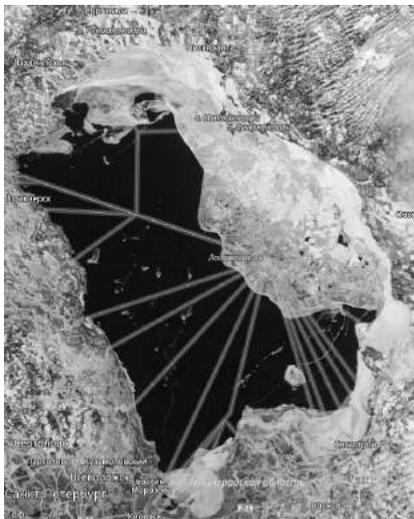
Shipborne investigations of water quality parameters (WQPs) inherent in large water bodies at high latitudes during early-spring are unattainable because research vessel cruising is prohibited due to various reasons, among which are ice fields in the coastal zone, sporadically floating floes, and frequently severe weather conditions.

Meanwhile, such lacunas in our knowledge of what actually happens in large northern lakes during the transitional period between winter and summer, is an essential drawback in understanding of the lake ecosystem continuous workings. Application of satellite remote sensing means promises to bridge the gap as satellite sensors overfly the target water body throughout the year.

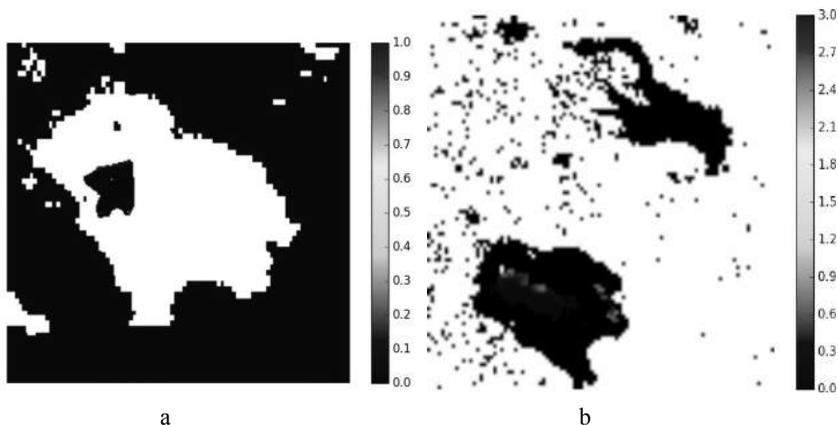
The results of application of ocean color satellite radiometric data to studying the biogeochemistry of Lake Ladoga surface water in March 2016 and 2017 are presented. To attain the aforementioned goal, we employed the radiometric data on spectral values of remote sensing reflectance,  $R_{rs}(\lambda)$  from MODIS (NASA). The downloaded data on  $R_{rs}(\lambda)$  were processed with the BOREALI algorithm providing a simultaneous inference from such ocean color sensors as SeaWiFS, MODIS and MERIS level 2 data of three major CPAs – water constituents controlling the perceived color and generally referred to as WQPs, viz. the concentrations of chl, smand dom.

A panchromatic image of Lake Ladoga taken on March 16, 2017 (Fig. 2), exemplifies a rather typical situation with the ice cover in this lake: the north-eastern, eastern and southern coastal areas are completely ice-covered blocking the access of a research vessel (RV) to the lake from either from St.Petersburg or Petrozavodsk (the two options of RV basing).

In March both in 2016 and 2017 the lakes areas void of both ice/ice floes and cloud cover proved to be located in the pelagic areas slightly shifted in the western direction (Fig. 3).

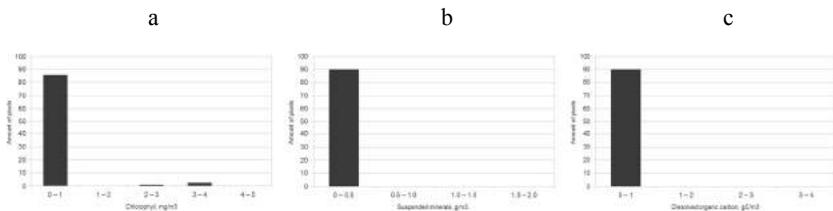


**Fig. 2. A panchromatic image of Lake Ladoga taken on March 17, 2016**



**Fig. 3. Locations of the pelagic areas in March 2016 (a) and 2017 (b) which were available for ocean color satellite remote sensing (illustrated through the spatial distribution of phytoplankton chlorophyll concentration ( $\text{mg}/\text{m}^3$ ) as retrieved from MODIS data)**

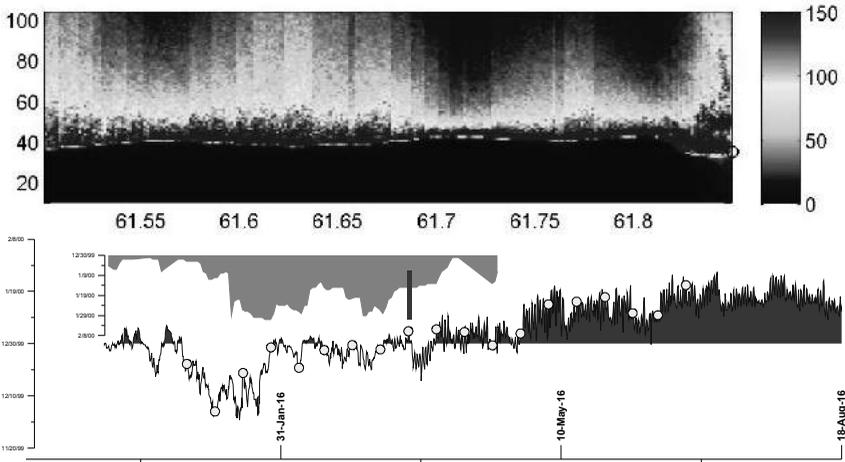
Fig. 4 displays the histograms of concentrations of *a) chl* ( $\text{mg}/\text{m}^3$ ), *b) sm* ( $\text{g}/\text{m}^3$ ), and *c) doc* ( $\text{gC}/\text{m}^3$ ) according to the WQP retrievals within the selected pelagic area in spring 2017 (Fig. 3, b).



**Fig. 4. Histograms of concentrations of chl (a), sm (b), and doc (c) according to the WQP retrievals averaged over four areas (Fig. 2). On the vertical are counts of occurrence of each of the inferred concentration**

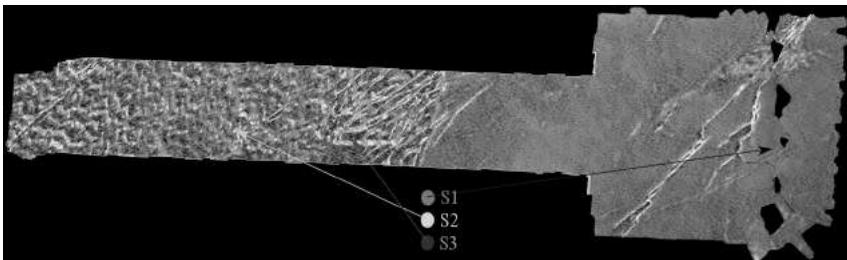
As seen, the concentrations of *chl*, and *sm* are appreciably low, and this result is corroborated by the similar retrieval results for 2016. In this time of year, extra low concentrations of *chl*, and *sm* (and especially in off-coastal waters!) are quite realistic as the vegetation of phytoplankton is unflavored by both low water temperature and insufficient levels of sun illumination, whereas the input of terrigenous *sm* is yet precluded due to low runoff. However, regarding the results on *doc* there are drastic differences between the two years of satellite observations: in 2016 the *doc* concentrations were recorded at ca  $9\text{ mgC/m}^3$ , but in 2017 they proved to be around  $0.5\text{ mgC/m}^3$ . It is a rather unexpected result, and it requires further analyses and interpretation. However, as in 2017 the results are taken from *four* different pelagic areas of Lake Ladoga and they are in good concordance with each other, they should be regarded as highly reliable and largely representative. The results presented above are obviously obtained for the first time in the history of Lake Ladoga investigations, and hence unique.

In 2015–2017 field studies were done in the end of the winter (March) on Lake Onego at the ice camp and along the tracks of radar altimetry satellites SARAL/AltiKa, Jason-2, -3 and recently launched (2016) Sentinel-3a. Measurements included ice cover state and ice structure observations, ice thickness and CTD casts at each station. Jason-2 altimetric data along the transects were analysed for 2015 and 2016. Analysis was done using radar waveform data (strength of radar echo in time) at 20 Hz resolution, giving about 300 m spatial resolution along the track. Analysis was performed for each Jason-2 cycle with 10 days overpass for the whole winter-spring period in the context of evolution of air temperature and snow depth measured at Petrozavodsk meteorological station (Fig. 5). We observe significant temporal and spatial variability of the radar waveform in the space of 10 days. For the whole period of analysis the strength of the radar echo (backscatter) along the transect varied from very low values (12–14 dB, typical for open water before ice formation and after ice break-up) to 45–47 dB for young ice and thin ice just before the break-up. Further analysis of Jason-2, SARAL/AltiKa and Sentinel-3a data is ongoing.



**Fig. 5.** Radar altimetry waveform (upper panel, X – latitude, Y – time of signal return) on 16 March 2016 and snow depth and air temperature (lower panel), red line – date of 16 March 2016

Simultaneously with in situ observations, hyperspectral data (40 bands in the VIS-NIR range) were collected in March 2015 and 2016, by flying the Oxi camera (Gamaya) on a drone along the altimetric tracks. To retrieve the most relevant information out of the hyperspectral data, data from the 5 flights in 2016 were processed using two algorithms – Principal Component Analysis (PCA, Fig. 6) and K-means (10 classes) unsupervised classification. The information on ice spatial heterogeneity from various classification results will be compared with in situ observations on ice cover and snow on ice parameters to establish the relationship between these datasets.



**Fig. 6.** RGB false color image of the first three PCA components for the mosaic of the drone imagery for the southern part of the Jason-2 track along the line "Ivanovskiye islands – open part of the lake"

**Acknowledgements.** This study was supported by ELEMО Foundation in the framework of a Russian-Swiss multi-disciplinary project "Lake Ladoga: Life under ice – Interplay of under-ice processes by global change".

**ЛЕДОВЫЙ ПОКРОВ ОЗЕР ОНЕГО И ЛАДОГА –  
МУЛЬТИСПЕКТРАЛЬНОЕ ДИСТАНЦИОННОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ  
НА РАЗНЫХ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ МАСШТАБАХ НА ОСНОВЕ  
НАБЛЮДЕНИЙ СО СПУТНИКОВ, ДРОНА  
И ПОЛЕВЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ**

**А. В. Кураев, Е. А. Захарова, Н. Н. Филатов, С. Баклагин, К. Barbieux,  
B. Merminod, Д. В. Поздняков, Д. А. Кондрик**

Представлены результаты междисциплинарных исследований ледового покрова и сопутствующей структуры воды подо льдом на основе наблюдений со спутников, дрона и полевых исследований, выполненных в рамках международного российско-швейцарского проекта «Озеро Ладога: жизнь подо льдом – влияние глобальных изменений на подледные процессы».

**ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННАЯ МОДЕЛЬ НАЗЕМНЫХ  
ЭКОСИСТЕМ ВОДОСБОРА ОНЕЖСКОГО ОЗЕРА**

**П. Ю. Литинский**

*Институт леса КарНЦ РАН*

Геоинформационная модель водосбора Онежского озера создается для комплексного анализа функционирования гетеротрофной экосистемы озера и отражает структуру и динамику наземных экосистем с 1950-х гг. Используется методика моделирования спектрального пространства снимков Landsat TM/ETM+ в осях LC1-LC2-MSI, где LC1 и LC2 – соответственно, первая и вторая главные компоненты логарифмированной матрицы снимка, а MSI – индекс стресса влажности. Спектральная модель представляет собой математически формализованный объект, описывающий количественные и качественные характеристики биогеоценозов территории. Будучи «развернутой» в географическом пространстве, она превращается в оптимальную структурную основу для интеграции результатов дискретных натурных наблюдений в единый пространственно-временной континуум.

Водосбор Онежского озера расположен на границе Восточной Фенноскандии и Русской равнины. Четвертичный покров сформирован ледниковыми (моренными), флювиогляциальными песчаными и песчано-глинистыми озерными отложениями. Значительны площади обнажений коренных пород. Это обуславливает сложность гидрологических условий и

высокую мозаичность растительного покрова. Состояние экосистем также весьма различно – от практически девственного до глубоко антропогенно трансформированного.

Около 65 % водосбора занято лесами, преобладающие породы – сосна обыкновенная (*Pinus silvestris* L.) и ель финская (*Picea x fennica* (Regel) Kom.). Береза пушистая (*Betula pubescens* Ehrh.) доминирует во вторичных лесах на ранних стадиях восстановления. Торфяные болота, занимающие до четверти территории, представлены двумя основными типами – олиготрофными сфагновыми и мезотрофными осоково-сфагновыми.

Большая площадь водосбора (53 тыс. км<sup>2</sup>) определяет неравномерность выпадения осадков по территории. Основа приходной части водного баланса – речной приток с водосбора, в среднем 17 км<sup>3</sup>. Химический состав этих вод, величина испарения, поверхностного и грунтового стока определяются типом наземных экосистем. Однако при необходимости данных о лесах водосбора их характеристики и занимаемые ими площади обычно определяются лишь генерализованно – по суммарным данным учета лесного фонда [Карпечко, 2016].

На фоне очевидных изменений климата становится очевидной необходимость комплексного анализа процессов функционирования гетеротрофной экосистемы Онежского озера [Kalinkina et al., 2016]. Гидрохимические данные [Сабылина, 2016] неизбежно фрагментированы и не могут дать полную информацию о количестве органического углерода (DOC), поступающего с водосборной территории, и, главное, не раскрывают механизм его образования.

В связи с этим в 2016 г. было начато создание геоинформационной модели наземных экосистем водосбора на основе космических снимков Landsat. Используется методика, разработанная как альтернатива традиционной «классификации с обучением», апробированная в северотаежной подзоне Восточной Фенноскандии [Литинский, 2011, 2012].

Методика заключается в 3D визуализации спектрального пространства сканерного снимка в осях LC1-LC2-MSI, где LC1 и LC2 – соответственно, первая и вторая главные компоненты логарифмированной матрицы снимка (каналы R, NIR, SWIR2), а MSI – индекс стресса влажности (отношение каналов SWIR1 и NIR). При такой трансформации благодаря логарифмированию спектральное пространство более «компактно» и проще организовано, чем в классической Tasseled Cap (brightness-greenness-wetness), и поэтому более удобно для визуального и математического анализа. Ось LC1 практически идентична brightness (общая яркость), LC2 обратна greenness – с ее увеличением количество фотосинтезирующей биомассы снижается, MSI обратен wetness – растет с увеличением дефицита влажности. Для снимков Landsat ETM+ оси координат рассчитываются по формулам («expressions» GRASS GIS):

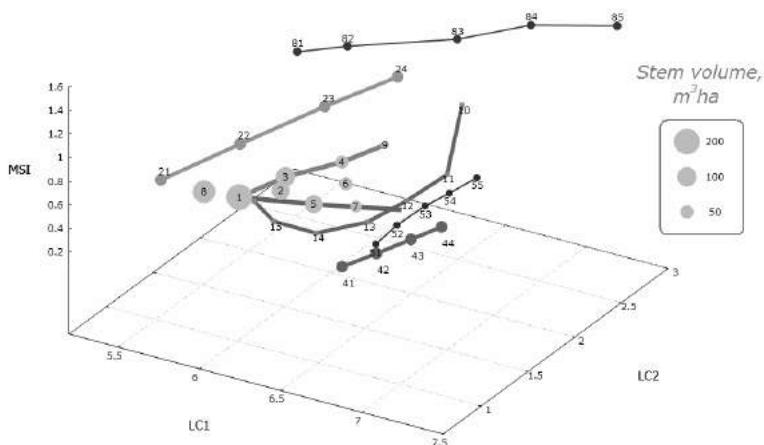
$$LC1=0.2793*\ln(b3)+0.7786*\ln(b4)+0.5619*\ln(b7)$$

$$LC2=0.5887*\ln(b3)-0.6012*\ln(b4)+0.5404*\ln(b7)$$

$$MSI=b5/b4$$

где b3–b7 – имена файлов соответствующих каналов Landsat; ln – натуральный логарифм.

Облака точек (сигнатуры) относительно однородных по отражательным свойствам участков земной поверхности образуют в спектральном пространстве фигуры, близкие к эллипсоиду, на рис. 1 показаны их центры. При обработке снимка их координаты являются параметрами для классификации методом минимального расстояния.



**Рис. 1. Модель спектрального пространства снимка Landsat** (номера классов экосистем поясняются в тексте). Для лесных экосистем (классы 1–8) величина круга показывает среднюю величину биомассы древостоя

Экосистемы спелых лесов формируют V-образную структуру, в основании которой располагаются зеленомошные сосняки (1) и ельники (8) моренных гряд. Здесь обеспечиваются оптимальные условия по увлажнению и наличию минеральных питательных веществ (почвы – супесчаные подзолы).

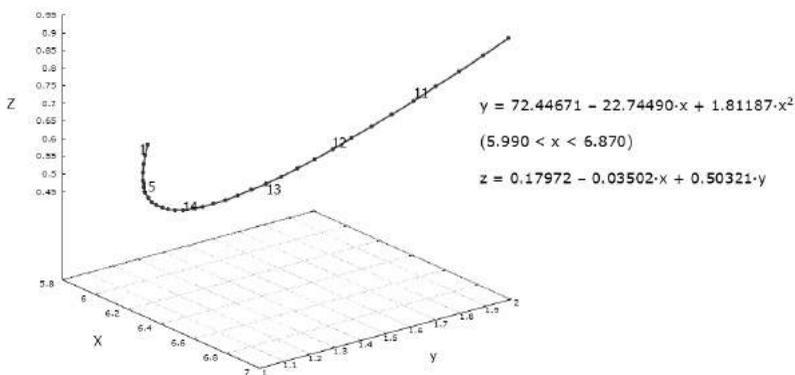
По оси автоморфных местообитаний с недостаточным увлажнением и минеральным питанием выстраиваются сосняки брусничные (3) флювиогляциальных равнин (песчаные подзолы), затем идут сосняки каменистые/скальные (4) на выходах кристаллических пород с моренным чехлом различной мощности (неполноразвитые и скелетные почвы) и далее скальные пустоши с редкой сосной (9).

На оси гидроморфных местообитаний с избыточным застойным увлажнением располагаются сосняки багульниковые (5), затем сосняки сфагновые (7) и – несколько в стороне – осоково-сфагновые (6). Крупные массивы таких лесов обычно располагаются на озерных равнинах, небольшие фрагменты – в любых недостаточно дренированных депрессиях.

В возникающих на местах вырубок (10) лесах четко вырисовываются траектория восстановительной динамики от появления растительности (11) до молодняков (12–13), средневозрастных (14) и приспевающих (15) лесов.

Для болотных экосистем положение спектральных сегментов определяется типом водно-минерального питания – олиготрофное (21–24) или мезотрофное (41–44) – и степенью увлажнения поверхности (номер класса уменьшается с ее повышением). Четко обособленное положение от лесных и болотных экосистем занимают сегменты травянистой растительности (51–55), дороги, карьеры и другие лишенные растительности категории (81–85). Водные поверхности занимают область со значениями LC1 менее 5,0 (на рис. 1 не показаны).

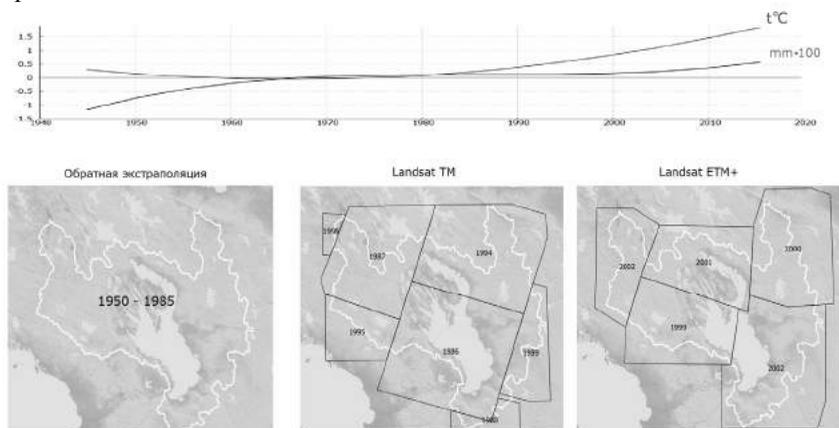
При использовании модели спектрального пространства появляется возможность строгого математического описания траекторий как типов местообитаний (структуры), так и различных сукцессионных стадий (рис. 2). Отметим, что в Tasseled Cap-пространстве траектории описываются значительно более сложными уравнениями.



**Рис. 2.** Траектория лесовозобновления в спектральном пространстве (x, y, z – соответственно, LC1, LC2, MSI). Номера классов те же, что и на рис. 1

При создании модели используются взятые на сайте GLCF <ftp://ftp.glcg.umd.edu/glcg/Landsat> снимки Landsat, начиная с середины 1980-х (рис. 3). На снимках четко идентифицируются леса, возникшие на

вырубках 40–50-летней давности. Соответственно, можно проследить динамику естественных и антропогенных изменений (пожаров, ветровалов, вырубок) с момента, предшествующего началу массовых заготовок леса в 1950-х гг. и проявления изменений климата, т. е. в состоянии, близком к естественному, «фоновому». Таким образом, данная модель является исходной точкой мониторинга на будущие времена.



**Рис. 3. Локализация разновременных сцен сканерных снимков, используемых для создания модели.** Границы водосбора (белая линия) рассчитаны по трехсекундной модели высот [Ferranti, 2014]. На графике сверху – сглаженные полиномом 4 степени отклонения от средних многолетних значений температуры и осадков

Принципиальное отличие описываемой модели от созданных традиционными методами «классификаций с обучением» в том, что результат определяется не выбором наземных ключевых участков, который в той или иной степени субъективен, а объективным, *измеряемым* биофизическим параметром – положением экосистемы в спектральном пространстве снимка.

Модель спектрального пространства представляет собой математически формализованный объект, описывающий количественные и качественные закономерности характеристики биогеоценозов, такие как тип почвы, растительная биомасса, транспирация, чистая экосистемная продукция (NEP). Будучи «развернутой» в географическом пространстве, спектральная модель превращается в оптимальную структурную основу для интеграции результатов дискретных натуральных наблюдений в единый пространственно-временной континуум – комплексную структурно-

функциональную модель взаимодействия наземных экосистем с атмо-, гидро- и литосферой.

На данном этапе спектральная модель представляет собой основной «каркас», состоящий из относительно небольшого количества генерализованных классов экосистем, достоверность выделения которых практически стопроцентная. Выявляется биогеоценотическая структура территории, все основные классы первичных экосистем, а также различные варианты и стадии их естественных и антропогенных нарушений, с детализацией масштаба примерно 1 : 25 000. Отметим, что созданные традиционными методами на основе аналогичных снимков модели таежных территорий существенно менее информативны, обычно включают до 10–15 категорий [Кобуяков, Яковлев, 2013]. Кроме того, они статичны, фиксируют состояние территории на определенный момент.

По данным наземных наблюдений и снимкам сверхвысокого разрешения проводится постоянная корректировка модели – уточнение количественных характеристик (калибровка) – и декомпозиция генерализованных классов. До настоящего времени в пределах водосбора не проводилось натурных измерений экспорта DOC из различных типов экосистем. Пространственная модель позволит оптимальным образом спланировать точки полевых исследований, исходя из соотношения площадей тех или иных типов и их локализации. Проводится также расчет NEP экосистем водосбора, которая наряду с влажностью почвы и определяет экспорт DOC в гидросферу [Canham et al., 2004].

### Литература

*Карпечко Ю. В.* Влияние рубок на сток с лесопокрытой части водосбора Онежского озера // Тр. КарНЦ РАН. 2016. № 5. С. 13–20.

*Лутинский П. Ю.* Классификация сканерных снимков методом моделирования спектрального пространства // Тр. КарНЦ РАН. 2011. № 5. С. 45–54.

*Лутинский П. Ю.* Геоинформационная модель наземных экосистем северотаежной подзоны восточной Фенноскандии // Тр. КарНЦ РАН. 2012. № 1. С. 3–15.

*Сабылина А. В.* Поступление в Онежское озеро органического углерода, общего фосфора и общего азота с речным стоком и вынос с водами р. Свири в 1965–2008 годах // Тр. КарНЦ РАН. 2016. № 9. С. 68–77.

*Canham C. D., Pace M. L., Papaik M. J. et al.* A spatially explicit watershed-scale analysis of dissolved organic carbon in Adirondack lakes // Ecological applications. 2004. N 14. P. 839–854.

*Ferranti J.* Digital Elevation Data. 2014. URL: <http://viewfinderpanoramas.org>.

*Kalinkina N., Syarki M., Tekanova E. et al.* Biomonitoring of Lake Onego and assessment of watershed role in the ecosystem functioning // 3rd SIL Congress, July 31, 2016 – August 5, 2016. Torino, Italy: Book of Abstracts, 2016. P. 337.

*Kobyakov K., Jakovle, J. (eds.) Atlas of high conservation value areas, and analysis of gaps and representativeness of the protected area network in northwest Russia: Arkhangelsk, Vologda, Leningrad, and Murmansk Regions, Republic of Karelia, and City of St. Petersburg. Finnish Environment Institute. Helsinki, 2013. 517 p.*

## **SPATIO-TEMPORAL MODEL OF TERRESTRIAL ECOSYSTEMS IN LAKE ONEGO CATCHMENT**

**P. Yu. Litinsky**

*Forest Research Institute, KarRC RAS*

Geoinformation model of the Onego Lake catchment area is created for integrated analysis of the heterotrophic lake ecosystem functioning and reflects the structure and dynamics of terrestrial ecosystems since the 1950s. The technique of modeling the spectral space of Landsat TM/ETM+ images in the LC1-LC2-MSI axes is used. LC1 and LC2 are the two first principal components of the image matrix in logarithmic form, and MSI is the moisture stress index. The spectral model is a mathematically formalized object describing the quantitative and qualitative characteristics of the biogeocoenosis. Being deployed in geographical space, it becomes an optimal structural basis for integrating the results of discrete field observations into a holistic space-time continuum.

## **УНИКАЛЬНОСТЬ КАРСТОВОГО ОЗЕРА ЦЕРИК-КЕЛЬ (ГОЛУБОЕ ОЗЕРО) В КАБАРДИНО-БАЛКАРИИ**

**Н. Г. Максимович, О. Ю. Мещерякова, А. Д. Деменев**

*Естественнаучный институт Пермского государственного  
национального исследовательского университета*

Голубое озеро (Церик-Кель) является уникальным объектом мирового уровня, оно самое глубокое карстовое озеро России и самое глубокое карстовое озеро-источник в мире. В статье приведены общая характеристика Церик-Кель, а также результаты полевых исследований, проведенных во время экспедиции в сентябре – октябре 2016 г., по изучению особенностей озера и его происхождения.

На Земном шаре более 8 млн озер, суммарный объем которых превышает в 80 раз объем воды всех рек мира. На территории России зафиксировано более 2 млн озер, глубочайшими из них являются озера Байкал (Бурятия, Иркутская область) (глубина 1642 м), Каспийское море (Дагестан, Калмыкия, Астраханская область) (1025 м), Хантайское озеро (Краснодарский край) (420 м), Телецкое озеро (Республика Алтай) (325 м), Курильское озеро (Камчатская область) (316 м), Лама (Красноярский край) (300 м), **Церик-Кель (Голубое озеро)** (Кабардино-Балкария)

(279 м). Первые шесть озер не являются карстовыми. Таким образом, самым глубоким карстовым озером России является Церик-Кель (Голубое озеро), которое отличается очень маленькой площадью (0,0216 км<sup>2</sup>) при довольно большой глубине.

**Общая характеристика объекта изучения.** Голубое озеро было детально описано И. Г. Кузнецовым [1928], которому принадлежит обстоятельная работа по исследованию озера и других форм карста Скалистого хребта. Кроме того, глубочайшее карстовое озеро России упоминается в работах И. С. Щукина [1925], проводившего географические исследования в Балкарии в 20-х гг. прошлого века, Л. А. Владимирова [1970], Н. А. Гвоздецкого [1954], Г. А. Максимовича [1969]. В конце XX в. исследованиями озера занимались Ю. В. Ефремов [1988], Г. Н. Гигинейшвили, а также коллектив авторов под его руководством [Гигинейшвили, 1979, 1982, 1983], К. А. Горбунова и Н. Г. Максимович [1991], В. Т. Хмурчик [2013] и др.

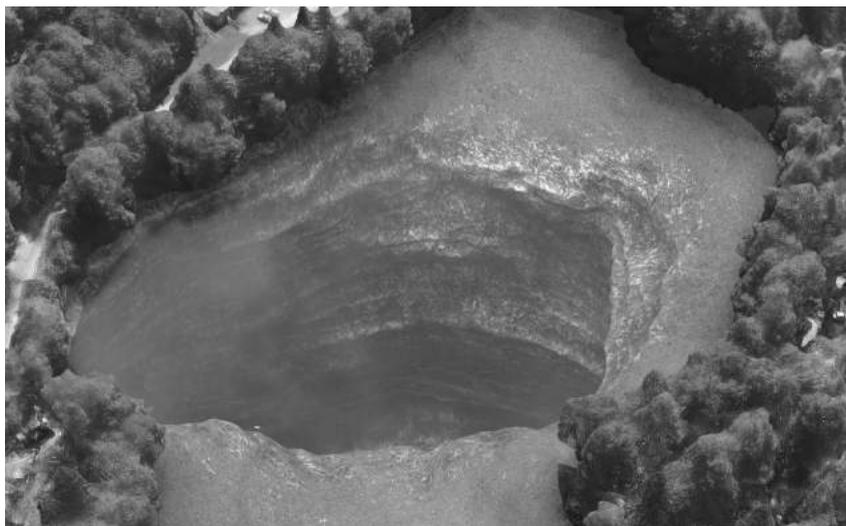
В мире существует множество карстовых озер, совершенно непохожих друг на друга. Они классифицируются по составу вмещающих пород, по принадлежности к разным гидродинамическим зонам, по условиям питания, степени проточности, термическому режиму, по минерализации и химическому составу воды и др. По некоторым параметрам Голубое озеро не имеет равных в мире.

Голубое озеро находится в Кабардино-Балкарской Республике, Черекском районе, в 4 км южнее населенного пункта Бабугент; расположено на северном склоне Скалистого хребта – одного из передовых хребтов Большого Кавказа в соседстве с двумя карстовыми озерами – Секретное и Верхнее – и карстовым провалом Кель-Кетчхен [Емузова, Хатухов, 2015].

Голубое озеро представляет собой одновременно несколько достаточно уникальных природных объектов: карстовую шахту (пропасть), карстовый источник и, естественно, озеро.

Общепринятое определение карстовой шахты – вертикальная или круто наклоненная полость, имеющая конусовидную, цилиндрическую, щелевидную форму при глубине более 20 м. Шахты с очень расширенным устьем, имеющим поперечник в десятки метров, называются пропастями, т. е. Голубое озеро стоит, скорее, относить к пропасти. Шахты бывают с почти вертикальным стволом, со спиральным, двухствольно разветвляющимся, многоэтажными и многие другие. Иногда шахты переходят в горизонтальный тоннель. Выделяют два типа карстовых шахт: коррозионные и провальные. Голубое озеро относится к классическим коррозионным озерам, образованным напорными водами зоны вертикальной восходящей (сифонной) циркуляции. В научной классификации такой тип шахт получил название цериккельский – в честь рассматриваемого озера.

Абсолютная высота зеркала озера составляет 805 м, площадь – 26 130 м<sup>2</sup>. Озеро имеет форму удлинненного по меридиану четырехугольника, вершины которого закруглены, а стороны несколько волнисты вследствие наличия небольших мысов и заливчиков. Наибольшая длина по диагонали равна 233 м; наибольшая ширина – 146 м [Гигинейшвили, 1983]. Характер берегов определяется положением озера на флювиогляциальной террасе: так как эта терраса представляет ровную поверхность и так как вытекающая из озера речка еще не успела углубить в террасе своего русла, то, естественно, берега озера низкие, едва-едва возвышающиеся над его уровнем. Наибольшая высота берега на южном и юго-западном конце озера не превышает 3–4 м над зеркалом воды. Берега почти всюду крутые, обрывистые. Восточный берег представляет обрыв валанжинских известняков, на которых лишь местами сохранились отдельные валуны террасы; остальные берега сложены галечниками (рис. 1).



**Рис. 1. Визуализация плана Голубого озера**

Голубое озеро представляет собой расширенное устье восходящего карстового источника с достаточно большим дебитом. В мировой классификации такие источники относятся к исполиновым. Таким образом, Голубое озеро является самым глубоким карстовым озером-источником в мире.

Места выхода подобных источников часто представляют собой воронкообразные бассейны с прозрачной голубовато-зеленой водой, обладающей постоянством низкой температуры и дебита, со слабым запахом

сероводорода. По мнению В. Т. Хмурчика [2013], наличие сероводорода обусловлено развитием в водоносном горизонте анаэробных бактериальных процессов, в частности, восстановлением сульфатов, вследствие появления в воде сульфат-ионов при растворении гипса водоносных пород и поступления в водоносный горизонт с инфильтрационными водами водорастворенных органических веществ.

Поверхностного притока озеро не имеет. Оно полностью питается подземными карстовыми и глубинными минерализованными водами. Основную долю в питании озера составляют карстовые воды. Вытекает из озера единственная речка, впадающая затем в р. Черек. Она берет начало в северо-западном углу озера и имеет расход от 0,7 до 0,9 м<sup>3</sup>/с (в зависимости от сезона) [Кузнецов, 1928; Гигинейшвили, 1983].

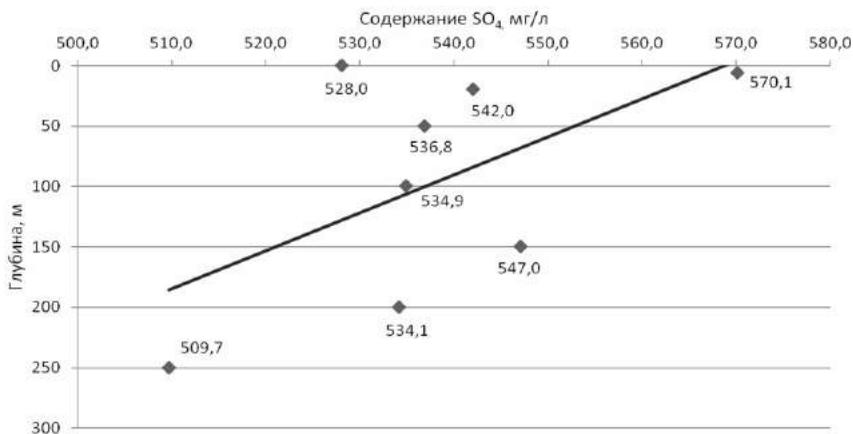
**Результаты полевых исследований.** В период полевых исследований в сентябре – октябре 2016 г. во время экспедиции, организованной Центром подводных исследований Русского географического общества, на Голубом озере было произведено свыше 1350 замеров различных показателей вод озера, проведены режимные наблюдения за расходом реки, вытекающей из озера, уровнем и прозрачностью вод. Установлено, что воды в Голубом озере по кислотно-щелочному балансу относятся ближе к нейтральным, окислительно-восстановительный потенциал вод озера изменяется от -197 до +75 В, что говорит о изменении во времени отношения концентраций кислорода и сероводорода в водах озера.

Электропроводимость озера в среднем составляет 1158 мкСм, минимальные и максимальные значения электропроводимости составляют 1057 и 1395, соответственно. Показатель солености (TDS) варьируется в узких пределах от 503 до 652 ppm, что говорит о выдержанном составе вод озера по глубине и площади.

Прозрачность вод составляла от 20,3 до 29,5 м.

Воды Голубого озера имеют преимущественно сульфатно-кальциевый химический состав. Содержание сульфатов изменяется от 509,7 до 577,0 мг/дм<sup>3</sup>, при этом максимальные значения зафиксированы ближе к дневной поверхности озера, а минимальные – на глубине 250 м (рис. 2). Вероятно, это связано с тем, что разгрузка подземных вод происходит в глубоких частях озера и постепенно с подъемом к дневной поверхности вода насыщается сульфатами. На рис. 2 отображена четко выраженная тенденция уменьшения концентрации сульфатов с глубиной.

Среднее значение расхода воды в реке, вытекающей из озера, составляет 67 857,54 м<sup>3</sup>/сут. В период наблюдений была отмечена тенденция к сокращению расхода вод в реке, что может быть связано с уменьшением уровня вод в озере с 44,5 до 41,7 см.



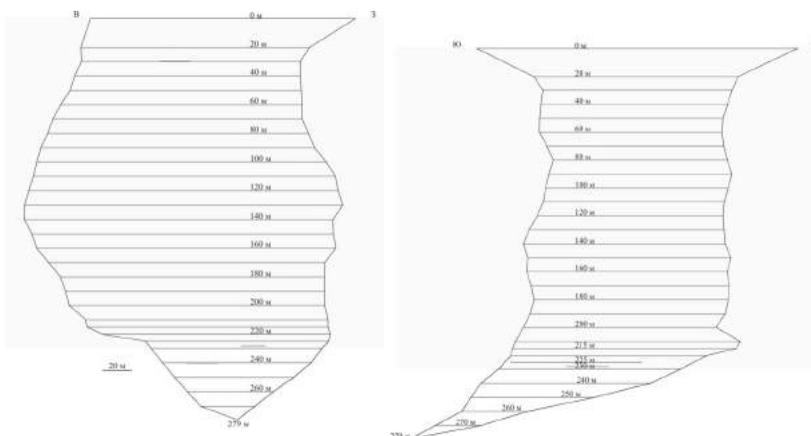
**Рис. 2.** Изменение содержания сульфатов с глубиной в Голубом озере

Средняя температура воды поверхности озера на период исследований составляла 10,5–11,5 °С. Выделена зона повышенных температур в юго-западной части озера и определена закономерность понижения температуры от центральной части в северо-западном направлении (к истоку реки).

Значение температуры с глубиной носит постоянный характер – 9,3 °С. Температурного скачка обнаружено не было.

В ходе проведения работ были уточнены морфометрические параметры озера, а также установлена новая глубина Голубого озера – 279 м, что является новым географическим открытием. Установлены новые форма и размеры озера, формирующиеся за счет активно протекающих процессов растворения пород и обрушения стенок на участках с их отрицательным залеганием. Обнаружено субгоризонтальное продолжение озера, из которого предположительно и идет поступление воды в озеро (рис. 3).

**Результаты работ.** Установлены новые форма и размеры озера, формирующиеся за счет активно протекающих процессов растворения пород и обрушения стенок на участках с их отрицательным залеганием. Обнаружено субгоризонтальное продолжение озера, из которого предположительно и идет поступление воды в озеро. Зафиксирована новая максимальная глубина озера – 279 м (ранее – 258 м). Установлены новые закономерности распределения химического состава вод по глубине. По итогам исследований разработаны меры охраны озера.



**Рис. 3. Профиль Голубого озера (по данным 2016 г.)**

Работа подготовлена при поддержке грантов РФФИ и РГО 17-0541114 и РФФИ 16-35-00104 мол\_а, а также гранта Минобрнауки России в рамках базовой части государственного задания № 2014/153 № 269 в сфере научной деятельности.

### Литература

- Владимиров Л. А.* Водный баланс Большого Кавказа (без азербайджанской и дагестанской частей). Тбилиси, 1970. 142 с.
- Гвоздецкий Н. А.* Физическая география Кавказа. М.: МГУ, 1954. Вып. 1. 208 с.
- Гигинейшвили Г. Н.* Карстовые воды Большого Кавказа и основные проблемы гидрологии карста. Тбилиси, 1979.
- Гигинейшвили Г. Н.* Температурные скачки озера Чирик-Кель // Природа. 1982. № 2.
- Гигинейшвили Г. Н., Гвахария В. К., Канделаки В. В. и др.* Чирик-Кель – глубочайшее карстовое озеро СССР // Известия Академии наук СССР, сер. Географическая. 1983. № 1.
- Горбунова К. А., Максимович Н. Г.* В мире карста и пещер. Пермь: ТГУ, 1991. 120 с.
- Музлова Л. З., Хатухов А. М.* Результаты комплексного исследования Кель-Кетчен-карстового провала на Центральном Кавказе // Современные проблемы науки и образования. 2015. № 3. URL: <http://www.science-education.ru/ru/article/view?id=20139> (дата обращения: 11.03.2016).
- Ефремов Ю. В.* Голубое ожерелье Кавказа. Л.: Гидрометеиздат, 1988. 160 с.
- Кузнецов И. Г.* Озеро Церик-кель и другие формы карста в известняках Скалистого хребта на Северном Кавказе // Изв. гос. Русского географического общества. 1928. Т. LX, вып. 2. С. 245–293.
- Максимович Г. А.* Основы карстования. Т. II. Пермь: Книжная типография № 2, 1969. 530 с.

Хмурчик В. Т. Микробиологические исследования озера Черик-Кель (Кабардино-Балкарская Республика) // Изв. высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Сер. Естественные науки. 2013. № 3 (175). С. 60–62.

Щукин И. С. В Балкарии // Землеведение. 1925. Т. XXVII, вып. 1–2. С. 37.

## THE UNIQUENESS OF THE KARSTIC LAKE TSEKIK-KEL (BLUE LAKE) IN THE KABARDINO-BALKARIA (RUSSIA)

N. G. Maksimovich, O. Yu. Meshcheriakova, A. D. Demenev

*Institute of Natural Science of Perm State National Research University*

Blue Lake (Tserik-Kel) is a globally unique object, being the deepest karst lake in Russia and the deepest karst spring-lake in the world. A general description of Tserik-Kel, the results of field surveys conducted during the expedition in September-October 2016 for the study of the lake's characteristics and genesis are presented.

## ИЗУЧЕНИЕ ВНУТРЕННИХ ВОД НА УРОКАХ ГЕОГРАФИИ

В. С. Михайлова\*, Т. В. Вага

*Петрозаводский государственный университет*

Одним из основных вопросов, рассматриваемых в школьном курсе географии, является изучение внутренних вод: рек, озер, водохранилищ, болот, ледников и подземных вод. Знакомство со всеми этими водными объектами, особенностями их функционирования и использования человеком оказывает большое влияние на формирование личности школьника. Основная цель получения гидрологических знаний в школе – это формирование ценностного отношения к водным объектам, осознание причин одной из глобальных проблем человечества – дефицита водных ресурсов. Важнейшими причинами нехватки воды являются нерациональное использование и загрязнение водных ресурсов. Как любая система, блок гидрологических знаний имеет свою структуру, состоящую из взаимосвязанных компонентов.

Методика преподавания географии – одна из педагогических наук, частная дидактика, исследующая особенности процесса обучения географии в общеобразовательной школе. Наиболее тесные связи имеет с дидактикой, которая рассматривает общие закономерности образования и воспитания [Панчешникова и др., 1997]. Одним из основных вопросов, рассматриваемых в школьном курсе географии, является изучение внутренних вод: рек, озер, водохранилищ, болот, ледников и подземных вод. Знакомство со всеми этими водными объектами, особенностями их функционирования и использования человеком оказывает большое влияние на

---

\* Студентка ПетрГУ.

формирование личности школьника. В отличие от многих понятий, изучаемых в курсе географии, «вода» – понятие конкретное, то, что каждый ученик может наблюдать в своей жизни; с водой в различных ее проявлениях мы встречаемся повсеместно: она необходима для существования жизни, поддержания здоровья, организации хозяйственной деятельности.

Основная цель изучения системы гидрологических знаний – это формирование ценностного отношения к водным объектам, осознание причин одной из глобальных проблем человечества – дефицита водных ресурсов. Важнейшими причинами нехватки воды являются нерациональное использование и загрязнение водных ресурсов. Бенджамин Франклин говорил: «Мы познаём ценность воды лишь, когда колодец пересыхает» [Лучшие..., 2017].

Как любая система, блок гидрологических знаний имеет свою структуру, состоящую из следующих взаимосвязанных компонентов:

- понятия;
- представления и факты;
- причинно-следственные связи;
- умения;
- формирование ценностного отношения к действительности.

Изучение любого материала невозможно без формирования определенного набора понятий. Автором проанализированы различные программы, которые позволяют определить основные понятия, относящиеся к системе гидрологических знаний [Дронов, Савельева, 2011; Душина и др., 2011; Баринова и др., 2014]. В каждой из рабочих программ основной акцент делается на подробном изучении терминов, связанных с водами суши (река, озеро, ледник), менее значительная часть программы отводится изучению Мирового океана. Данный подход объясним с точки зрения определения главного понятия, которое необходимо усвоить школьникам при изучении гидросферы – «водные ресурсы», т. е. воды суши во всем многообразии, пригодные для хозяйственного использования [Элькин, 2001]. Так как по содержанию оно относится к сложным понятиям, его формирование осуществляется постепенно, начиная с 5–6 класса, где при изучении раздела «Гидросфера» школьники начинают знакомиться с общими (река, озеро и др.) и единичными (река Амазонка, озеро Байкал) понятиями, относящимися к данному блоку. Также уже в начальном курсе географии ученикам необходимо самостоятельно уметь определять проблемы, связанные с ограниченными запасами пресной воды на Земле, и показывать пути их решения [Дронов, Савельева, 2011]. В курсе «Географии материков и океанов» (7 класс) ученики знакомятся с проблемами бережного и правильного использования природных вод. Собственно понятие «водные ресурсы» вводится только в 8 классе при изучении курса

«География России», после чего от школьников требуется осознанное использование его в активной лексике, в решении проблемных и творческих задач.

Для формирования устойчивых географических знаний наряду с понятиями важны представления воображения и памяти. Представление воображения – это образы географических объектов или явлений, созданные продуктивным воображением без непосредственного их наблюдения и восприятия. Представления в таком случае формируются в процессе яркого образного рассказа учителя, чтения учащимися дополнительной информации о водных объектах. Представление памяти – это зрительный образ, который формируется в результате непосредственного наблюдения объекта или явления или восприятия его с помощью различных средств наглядности. В настоящее время процесс формирования зрительных образов особенно эффективен в результате применения электронных дидактических средств обучения, когда на экране принтера или на интерактивной доске возникает или моделируется образ географического объекта или явления. При формировании представлений и связанных с ними понятий, например об озерах (Онежское озеро, оз. Байкал), обязательным требованием является использование изображений, отражающих существенные признаки именно этих озер, в их неповторимом своеобразии (например, различные берега, размеры, оживленное судоходство в летнее время, строительство предприятий и т. д.). Также полезно изучать объекты непосредственно на местности (р. Лососинка), дополняя информацию, полученную на уроке, личными наблюдениями. Если понятие «вода», как мы уже ранее указывали, является конкретным понятием, то «водные ресурсы» – понятие абстрактное, состоящее из различных аспектов (география, экология, экономика и т. д.), конкретизация которых требует подтверждения большим количеством примеров, и лучшего всего лично значимых для учеников и влияющих на формирование их мировоззрения.

Для того чтобы заинтересовать обучающихся и расширить их кругозор, в методике преподавания географии используется такое понятие, как факты. Факты могут служить базой для каких-либо выводов теоретического содержания. В других случаях факты помогают конкретизировать теоретические выводы при дедуктивном пути формирования понятий или закономерностей. Также факты приводятся для полноты сведений об изучаемом предмете или явлении [Панчешникова и др., 1997]. Так, в процессе изучения различных водных объектов необходимо уделять внимание различной информации, позволяющей характеризовать водные объекты как элементы водных ресурсов, – количество, качество воды, потребление воды в разных странах, что в дальнейшем поможет школьникам давать и оценочные суждения.

С точки зрения изучения географического материала методика преподавания не может обойтись без рассмотрения причинно-следственных связей между объектами, явлениями и процессами. Причинность или причинно-следственная связь – это связь между одним событием, которое называют причиной, и другим событием, которое называют следствием, что с необходимостью следует за первым. Принцип причинно-следственных связей дает возможность строить преподавание географии согласно дидактическому правилу «от известного к неизвестному», «от близкого к далекому» [Эдельштейн, 2005]. Например, прямая связь (причина – следствие) – зависимость распределения вод суши от климата, и, следовательно, распределение водных ресурсов по территории.

Успешным фактором обучаемости географии как предмета являются умения. Овладение умениями во многих случаях объективно труднее для учащихся, чем усвоение знаний, и от учителя здесь требуется особенно хорошее знание методики и целенаправленная работа. Умения, которыми должен обладать каждый школьник при изучении внутренних вод в школьном курсе географии, – уметь работать с географической картой (нахождение водных объектов); уметь давать характеристику водным объектам, расположенным на континентах и территории России; уметь определять основные экологические проблемы водного объекта и пути их решения, знать и понимать значение гидросферы в жизнедеятельности человека, обладать определенными навыками по защите и охране водных объектов [Никитина, 2005].

Чтобы заинтересовать учащихся, увлечь своим предметом, способствовать гармоничному развитию личности, необходимо использовать различные нестандартные подходы в обучении и творческие задания. Автор предлагает использовать следующие виды творческих заданий:

1. Сочинение – описание водного объекта.
2. Интерактивное путешествие по водному объекту, например, по р. Волге:
  - образование реки, характер течения, притоки;
  - объекты на берегах реки: города, гидросооружения, водопады;
  - обитатели реки, их особенности;
  - качество воды;
  - исторические факты об объекте.
3. Презентации на темы:
  - «Каспийское море или озеро?»;
  - «Исчезающие озера на планете»;
  - «Природное сокровище – Байкал»;
  - «Водные ресурсы Арктики и перспектива их использования»;
  - «Океан – кухня погоды» и т. д.

4. Мозговые штурмы, круглые столы на проблемные вопросы:
  - «Нефтяные вышки – источники загрязнения мирового океана»;
  - «Всемирное бедствие: пластик в океане»;
  - «Анализ питьевой воды в водопроводе» и т. д.
5. Работа над проектом в группах:
  - «Малые водные объекты России»;
  - «Что дороже золота?»;
  - «Болота нашего региона как часть гидросферы страны» и т. д.
6. Экологические акции:
  - высадка саженцев деревьев по берегам рек для укрепления береговой линии;
  - очистка мест отдыха на берегах озер от мусора, стекла, хвороста и т. д.
7. Викторины и конкурсы:
  - «Знай и люби свой край озер» (вопросы по географии, истории, экологии).

Одним из требований к изучению гидрологического содержания является способность учащихся оперировать такими номенклатурными понятиями, как, к примеру, реки: Волга, Амазонка, Миссисипи, Нил и др., озера: Байкал, Онежское и др., моря: Черное, Средиземное, Баренцево, Красное, Охотское и др. Но главным результатом должно стать экологическое мышление, сформированное на базе знаний о водных ресурсах, а также умениях:

прогнозировать изменения водной среды под влиянием деятельности человека;

моделировать рациональное природопользование водных объектов.

Для достижения необходимой цели в овладении темами гидрологии и гидрографии важно использовать разнообразные средства обучения:

- учебники, справочники, тетради на печатной основе, текстовые таблицы;
- настенные, настольные и контурные карты, карты-схемы;
- схемы структурные и классификационные;
- схемы взаимосвязей природных и экономических объектов и явлений;
- графики, диаграммы, таблицы [Барышева и др., 2001].

### **Литература**

*Барينو́ва И. И., Дронов В. П., Душина И. В., Сиротин В. И.* Программа основного общего образования по географии. 5–9 классы. М.: Дрофа, 2014. 147 с.

*Барышева Ю. Г., Вестицкий М. Б., Григорьева Т. В.* Использование средств обучения в преподавании географии. М.: Просвещение, 2001. 159 с.

*Дронов В. П., Савельева Л. Е.* География. Рабочие программы. Предметная линия учебников «Сферы». 5–9 классы: Пособие для учителей общеобразовательных учреждений. М.: Просвещение, 2011. 176 с.

Душина И. В., Елховская Л. И., Камерилова Г. С., Кошевой В. А. Рабочая программа «География». Образовательная система «Школа 2100». 5–9 классы. М.: Баласс, 2011. 45 с.

*Лучшие цитаты* про воду // Саморазвитие [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://probiznesmen.ru/luchshie-citatu-pro-vodu/> (дата обращения: 10.04.2017).

Никитина Н. А. Поурочные разработки по географии. М.: Вако, 2005. 287 с.

Панчешникова Л. М., Душина И. В., Дронов В. П., Родзевич Н. Н. Методика обучения географии в школе. М.: Просвещение, 1997. 320 с.

Эдельштейн К. К. Гидрология материков. М.: ИЦ «Академия», 2005. 304 с.

Элькин Г. Н. География материков и океанов: Методическое пособие. СПб.: Паритет, 2001. 115 с.

## STUDYING INLAND WATERS AT GEOGRAPHY LESSONS

V. S. Mikhailova, T. V. Vaga

*Petrozavodsk State University*

One of the main questions considered in a school course of geography is the study of inland waters: rivers, lakes, reservoirs, wetlands, glaciers and underground waters. Acquaintance with these water objects, their functioning and utilization by people has influence on a pupil's personality. The main objective of studying the system of hydrological knowledge at school is to make students appreciate water objects, understand the causes of a major problem for the humankind – the shortage of water resources. Unwise use and pollution of water resources appear to be the most important reasons for water shortage. Like any other system, the complex of hydrological knowledge has a structure consisting of interconnected components.

## ИЗМЕНЧИВОСТЬ ЭКОСИСТЕМ ОЗЕР В УСЛОВИЯХ АНТРОПОГЕННЫХ НАГРУЗОК И ЗАКОНОМЕРНОСТИ ИХ ВОССТАНОВЛЕНИЯ

Т. И. Моисеенко

*Институт геохимии и аналитической химии им. В. И. Вернадского РАН*

Дается объяснение общим закономерностям трансформации экосистем озер с позиций экологической теории и термодинамического механизма упорядочивания энергии в живых системах. Анализируются основные признаки дезорганизации в экосистемах крупных озер в условиях максимальных антропогенных нагрузок и восстановительной организации после интенсивного загрязнения. Показано, что развитие новой модификации водной экосистемы после снижения токсичного загрязнения согласуется с закономерностями сукцессий экосистем: через критическую стадию к более стабильной ее модификации, но отличной по структуре от природной.

**Введение.** Понимание механизмов трансформации структурно-функциональной организации экосистем в условиях антропогенного загрязнения, которые происходят в единстве и взаимодействии всех ее элементов, является одной из актуальных задач современной экологии. Важнейшая термодинамическая характеристика организмов, экосистем и биосферы в целом – состояние низкой энтропии, т. е. способность создавать и поддерживать высокую степень упорядоченности энергии. В ходе эволюции биосферы была выработана оптимальная организация, связанная с особенностями использования ассимилированной энергии на различных уровнях жизни [Шварц, 1976].

Структура экосистемы формируется под влиянием адаптации организмов к условиям конкретной среды и максимальному использованию экологических ниш, в которых есть энергетические ресурсы. А. Ф. Алимов [2000] измеряемыми параметрами стабильности сообщества или экосистемы в конкретных регионах предлагает принимать пределы варьирования их характеристик, не выходящих за рамки среднего уровня годовых флуктуаций, сложившихся в ходе эволюции и свойственных данной системе.

**Характерные признаки дезорганизации.** В процессе сукцессионного развития экосистемы достигают зрелого (климаксного) состояния, которое имеет следующие характерные признаки ее стационарности и упорядочивания энергии: состояние низкой энтропии; сбалансированные соотношения потоков вещества и энергии; функциональное соответствие видов в трофической структуре; сопряжение процессов передачи энергии; относительно низкая итеративность подсистем. Структурная сложность экосистем определяется таким образом, чтобы минимизировать потери (рассеивание) энергии при передаче из одной подсистемы в другую. Сложность системы и увеличение количества сопряженных процессов обеспечивают формирование низкоэнтропийной системы как основного признака стабильной системы.

Когда деструктивный фактор, каковым является токсичное загрязнение, внедряется в экосистему, он в первую очередь нарушает ее целостность и стабильность, увеличивает энтропию. Стационарные системы обладают высокой устойчивостью и гибкостью, пока выполнены два обязательных условия стационарности: постоянство притока энергии и обмена веществом. Нарушение этих условий закрывает путь формирования низкоэнтропийных структур, и система гибнет [Галимов, 2009]. Термин «гибель» может быть применен к процессам, происходящим на молекулярном, клеточном и организменном уровнях, на экосистемном – протекают процессы дезорганизации.

Токсикант может уничтожать те или иные виды в зависимости от их генотипической толерантности. Пертурбации затрагивают как структуру (число видов и размеры популяций), так и функции (потоки энергии). По мере того как одни популяции увеличивают свою численность, другие – снижают, изменяются потоки энергии в экосистеме [Моисеенко, 2011].

Приведем ряд примеров по результатам натуральных исследований нарушений в водных экосистемах Северо-Запада России под действием загрязнения. Исследования на озере Имандра [Антропогенные модификации..., 2002; Moiseenko et al., 2009] показывают, что под влиянием токсичного загрязнения сточными водами медно-никелевого производства, сопровождаемого коммунально-бытовыми стоками, процессы формирования новых биологических комплексов протекают в следующих направлениях:

уменьшается видовое разнообразие за счет исчезновения типичных для северных водоемов видов – чувствительных диатомовых, крупных ветвистых и каланоид; реликтовых ракообразных, а также пиявок, поденок (без *Leptophlebiidae*) и веснянок (без *Nemoura*), хирономид (*Tanytarsini*, *Diamesinae*, *Orthoclaadiinae*);

происходит упрощение структуры как следствие исчезновения или сокращения ряда видов в сообществах, что в свою очередь неизбежно приводит к упрощению трофических связей;

резко увеличивается доминантность эврибионтных форм, многие из которых имеют обширные ареалы или являются космополитами, в таких сообществах обычно более 75 % общей численности и биомассы приходится на долю 3–6 видов;

возрастает доля мелких форм в сообществах зоопланктона и зообентоса (условная индивидуальная масса снижается), которые обеспечивают более быструю утилизацию поступающих биогенных элементов и оборот биомассы в экосистеме;

увеличивается продуктивность первичных звеньев и уменьшается роль хищных форм в трофической структуре экосистем, в составе как зоопланктона и зообентоса, так и рыбного сообщества.

Анализ литературных данных по изменениям в сообществах загрязняемых заливов крупных озер – Волховская губа Ладожского озера и Кондопожская губа Онежского озера [Антропогенное эвтрофирование..., 1982; Онежское озеро..., 1999] – показал, что процессы деградации протекали в направлениях, сходных с таковыми в оз. Имандра.

В экспериментальных и натуральных исследованиях было установлено, что не только в сообществах, но и внутри популяций различных систематических групп (фито-, зоопланктона, рыб) под действием токсичного агента на первом этапе наблюдается стимуляция

размножения с образованием мелких форм (вплоть – до карликовых). Эти результаты показывают, что преимущественное развитие получают не только более мелкие члены сообщества, но и в внутри одной популяции происходит увеличение мелкоразмерных форм [Моисеенко, 2009, 2011], что свидетельствует об универсальности этого механизма. Сокращение видового разнообразия, регрессия оппортунистических видов и подъем мелкоразмерных видов многие исследователи приводят как результат структурных изменений в сообществах под селективным действием токсичного фактора [Pratt, Cains, 1996; Adams, Olver, 1997].

Общие закономерности изменчивости экосистем под действием токсичного загрязнения, которые наблюдаются в озерах Северо-Запада России, согласуются с закономерностями типичных изменений в экосистемах под воздействием любых стрессовых условий, а также при формировании структуры развивающейся (или в критическом состоянии) экосистемы [Одум, 1986].

**Восстановительная сукцессия.** Большинство работ по изучению процессов восстановления в природе посвящены изучению таковых после влияния одного фактора или возврату в экосистемы отдельных видов без учета всего комплекса сложных взаимодействий в сообществах и между ними [Palmer et al., 2007]. Walker et al. [2001] отмечали, что в случае загрязнения нарушаются многие связи в экосистеме и восстановление (точнее формирование экосистемы с новыми свойствами) будет происходить со множеством прямых, опосредованных и обратных путей взаимодействия. Наука пока не может предсказать до конца, насколько достижимо полное восстановление экосистем после токсичного стресса [Cairs, 2005].

После возмущающего действия (в рассматриваемом случае потока токсичных веществ) формирование стационарной системы (возврат к стабильному состоянию) управляется законами минимизации энтропии, характерными для живых открытых систем всех уровней.

*Экосистема будет преобразовываться путем: восстановления сбалансированности потоков вещества и энергии; оптимизацией путей передачи энергии; снижением частоты итеративности.*

Накопленные в период загрязнения биогенные элементы вовлечены в биологический круговорот в экосистеме, о чем свидетельствует снижение концентраций минеральных форм фосфора и азота на фоне сохраняющихся общих концентраций, т. е. происходит более эффективная утилизация их биодоступных форм и передача по трофической структуре. Например, на оз. Имандра соотношение  $P_{\text{общ}}/PO_4$  после 2000 гг. стало 8,7 (после снижения загрязнения), тогда как в период загрязнения было 2,6 [Moiseenko et al., 2009]. Снижение концентраций биодоступных форм

фосфора и азота, а также кремния является следствием их поглощения диатомовыми водорослями, которые в период реколонизации занимают доминирующее положение, но в более высокой численности по сравнению с природными показателями. Высокие показатели биомассы водорослей, содержания хлорофилла *a* на протяжении последних десятилетий, которые не снижаются на фоне резкого уменьшения притока фосфора (энергетических субсидий), свидетельствует об аутогенном поддержании повышенной по отношению к природным показателям биопродуктивности. Сходная ситуация характерна и для других озер – Ладоги и Онеги [Антропогенное эвтрофирование..., 1982; Онежское озеро..., 1999]. Происходит более полная утилизация притока энергетических субсидий в биопродукционных процессах, которая подтверждает восстановление сбалансированности потоков вещества и энергии в новой структуре экосистемы.

Приведенные показатели модификации экосистем после токсичного стресса согласуются с характером восстановления в больших Американских озерах. Например, в озере Онтарио с 1968 по 1985 г. отмечалось плавное снижение концентраций биодоступного фосфора, количество которого уменьшилось вдвое к 1985 г., а к 2000 г. – до 6 мкг/л (уровень олиготрофного озера). Однако продукция фитопланктона и показатели хлорофилла *a* не изменялись до конца 1990-х гг., и только в последние годы обозначилась тенденция к их снижению [Great Lake Ecosystem..., 2000]. Для американских озер отмечается повышение роли хищных форм в сообществах зоопланктона и повышение рыбопродуктивности. Поддерживание продуктивности фитопланктонного сообщества при снижении фосфорной нагрузки объясняется в этой работе двумя механизмами: 1) низкой скоростью водообмена, т. е. в озере Онтарио тенденция к снижению биомассы и продуктивности озера обозначилась только через два полных водообмена (т. е. более чем через 20 лет); 2) изменением структуры фитопланктона и увеличением доли криптонад, которые развились в высокой численности.

Однако, по нашему мнению, возможно также влияние третьего ведущего аутогенного механизма – устойчивости сформировавшейся модификации экосистемы с новыми, отличными от природных характеристик свойствами, хотя очищение вод, бесспорно, вносит вклад в процессы восстановления.

**Закключение.** Важнейшая термодинамическая характеристика организмов, экосистем и биосферы в целом – состояние низкой энтропии, т. е. способность создавать и поддерживать высокую степень упорядоченности энергии. Токсикант действует на экосистему как дезорганизующий фактор, изменяет структуру и функции экосистемы,

что приводит к повышению энтропии и диссипации энергии. Уменьшение размеров членов сообщества и повышение численности устойчивых видов обеспечивают более эффективную утилизацию энергии, поступающей в виде энергетических субсидий или высвобождающейся вследствие нарушения ее передачи в трофической структуре экосистемы. Критическое состояние экосистемы в период токсичного загрязнения носит черты противодействия хаосу и снижения диссипации энергии путем преимущественного развития мелких форм, частая итеративность которых ускоряет оборот биомассы в экосистеме.

Развитие новой модификации водной экосистемы после снижения токсичного загрязнения согласуется с закономерностями сукцессий экосистем: от природной через критическую стадию к более стабильной ее модификации, но отличной по структуре от природной. Поэтому термин «восстановление экосистем» в данном случае нельзя отождествлять с понятием возвращения к природному состоянию, скорее, он может трактоваться как формирование устойчивости новой модификации экосистемы.

Главное свойство живых организмов – выживать и воспроизводиться в пределах, которые обеспечиваются энергетическими ресурсами экологических ниш и, в свою очередь, структурой всей экосистемы – определяет экологические законы их преобразования в условиях загрязнения и поддержания стабильности, которые согласуются с термодинамическими законами упорядочивания энергии в живых системах, направленных на уменьшение энтропии.

### Литература

*Алимов А. Ф.* Элементы теории функционирования водных экосистем. СПб.: Наука, 2000. 148 с.

*Антропогенное эвтрофирование* Ладожского озера / Под ред. Н. А. Петровой. Л.: Наука, 1982. 302 с.

*Антропогенные модификации* экосистемы озера Имандра / Под ред. Т. И. Моисеенко. М.: Наука, 2002. 476 с.

*Галимов Э. М.* Феномен Жизни: Между равновесием и нелинейностью. Происхождение и принципы эволюции. М.: Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2009. 269 с.

*Моисеенко Т. И.* Водная токсикология: фундаментальные и прикладные аспекты. М.: Наука, 2009. 400 с.

*Моисеенко Т. И.* Устойчивость водных экосистем и их изменчивость в условиях токсичного загрязнения // *Экология*. 2011. № 6. С. 441–448.

*Одум Ю.* Экология. Пер. с англ. / Под общей ред. А. М. Гилярова. М.: Мир, 1986. Т. I. 328 с.

*Онежское озеро: экологические проблемы* / Под ред. Н. Н. Филатова. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 1999. 398 с.

*Шварц С. С.* Эволюция биосферы и экологическое прогнозирование // Вестн. АН СССР. 1976. № 2. С. 2–8.

*Adams G. F., Olver C. H.* Yield properties and structure of boreal percid communities in Ontario // J. Fisheries Research Board of Canada. 1997. Vol. 34. P. 1613–1625.

*Cairns J. Jr.* Restoration Ecology and Ecotoxicology // Handbook of Ecotoxicology / Eds. Hoffman et al. N.Y.: Levis publishers Ltd., 2005. P. 1015–1029.

*Great Lakes Ecosystem: Report 2000.* EPA-905-R-01-001. Chicago: Published by U.S. Environmental Protected Agency, 2001. 106 p.

*Moiseenko T. I., Sharov A. N., Vandish O. I. et al.* Long-term modification of arctic lake ecosystem: reference condition, degradation and recovery // Limnologica. 2009. Vol. 39, N 1. P. 1–13.

*Palmer M. A., Ambrose R. F., Poff N. I.* Ecology theory and Community restoration Ecology // Restoration Ecology. 2007. Vol. 5, N 4. P. 291–300.

*Pratt J. R., Cains J.* Ecotoxicology and the Redundancy Problem: Understanding Effect on Community Structure and Function // Ecotoxicology: a Hierarchical Treatment. N.Y.: Levis publishers Ltd., 1996. P. 347–398.

*Walker C. H., Hopkin S. P., Sibly R. M. et al.* Principles of Ecotoxicology (Second Edition). London: Taylor&Francis Ltd., 2001. 309 p.

## **VARIABILITY OF LAKE ECOSYSTEMS UNDER HUMAN IMPACTS AND REGULARITIES OF THEIR RECOVERY**

**T. I. Moiseenko**

*Vernadsky Institute of Geochemistry and Analytical Chemistry RAS*

General trends in ecosystem transformation are explained in terms of theoretical ecology and thermodynamic mechanisms of energy ordering in living systems. Basic symptoms of disorganization in ecosystems under extreme loads and their regenerative organization afterwards are discussed. It is shown that the development of a new modification of an aquatic ecosystem after a decrease in toxic pollution complies with the pattern of ecosystem succession: from a natural ecosystem, via the critical stage, to its more stable but structurally different modification.

## **САКРАЛЬНЫЕ МЕСТА СВЯЩЕННОЙ ЛАДОГИ И ЕЕ ПОБЕРЕЖЬЯ**

**Н. А. Нестеров, В. А. Румянцев, А. И. Сорокин, В. В. Гузиватый**

*Институт наук о Земле РАН*

Рассмотрен специфический аспект использования воды в качестве объекта туризма и паломничества. Кратко представлены православные исторические объекты. Достаточное внимание уделено памятным местам Приладожья. В заключение затронуты актуальные проблемы превращения этого региона в один из крупнейших федеральных туристских центров.

Ладожское озеро – уникальное творение природы. Являясь самым большим озером в Европе, оно собирает дождевые и родниковые воды из сотен тысяч рек и проточных озер с большей части северо-запада России и, как терминальный резервуар, позволяет судить об экологическом состоянии этой обширной территории [Ладожское озеро..., 2015].

Ладога – один из признанных оплотов православия на Северо-Западе России. Многочисленные монастыри, лавры, храмы, церкви и погосты находятся на просторах Приладожья и на островах самого озера. Крупнейшим бриллиантом в Ладожском ожерелье является расположенный на острове Валаам и прилегающих к нему островах Валаамский Спасо-Преображенский мужской монастырь (рис. 1). Этот монастырь иногда называют Северным Афоном, Честною и Великою Лаврою. Он основан новгородцами не позднее начала XIV в. (по некоторым данным в XII в.). Много раз отражал нападения шведов, в 1611 г. был разорен ими. В 1715 г. восстановлен по указу Петра I.



**Рис. 1. Валаамский Спасо-Преображенский монастырь**

Согласно древнему преданию, впервые эти острова посетил апостол Андрей Первозванный, установивший здесь каменный крест. Несколько позднее Валаамского, в XIV в., новгородским монахом Арсением на острове Коневец, расположенном в 5 км от западного берега Ладожского озера, был основан Коневский Рождество-Богородичный мужской монастырь (рис. 2).

В монастырь Арсений, подвизавшийся до этого три года в одном из афонских монастырей, привез оттуда икону Божией Матери, получившую название Коневской, которая считается чудотворной. Большой

популярностью в Приладожье пользуются также основанный в 1484 г. Свято-Троицкий Александро-Свирский мужской монастырь, Введено-Оятский островной женский монастырь XVI в. со святым источником, Покрово-Тервенический женский монастырь, возрожденный в 1991 г. на берегу Покровского озера, и многие другие.



**Рис. 2. Конеvский Рождество-Богородичный мужской монастырь**

В России и далеко за ее пределами известен Тихвинский Богородичный Успенский мужской монастырь. Это древняя и знаменитая обитель известна благодаря находящейся в ней величайшей святыне православного мира – Чудотворной Тихвинской иконе Божией Матери. Тихвинский Богородицкий монастырь основан Иваном Грозным в 1560 г. на месте чудесно пришедшего в 1383 г. на Русь на берега реки Тихвинки образа Богородицы Одигитрии.

В 50 км к северу от Олонца, на берегу Важозера, расположен Важезерский Спасо-Преображенский монастырь, датой основания которого считается 1520 г.

На протяжении веков Ладога была центром притяжения жителей нынешнего Северо-Запада России и ряда европейских государств. Здесь проходили торговые пути «из варяг в греки». Это был морской и речной путь из Балтийского моря (от торговых центров Скандинавии, Германии и Польши) через Финский залив, порожистую Неву, великое озеро Нево (как названа Ладога в «Повести временных лет»), по реке Волхов, озеру Ильмень, реке Ловать, Западной Двине, Днепру к Черному морю.

Были и другие торговые пути варягов, включавшие в себя Волгу и Каспий (пути «из варяг в персы», «из варяг в хазары», «из варяг в булгары»). Но во всех случаях Ладожское озеро было неотъемлемой частью этих водных путей.

Ладожское озеро и прилегающие к нему районы обладают богатым культурно-историческим наследием [Кирпичников, 2003]. Здесь находится огромное число памятников федерального, регионального и местного значения. К ним относятся памятники археологии, крепости и фортификационные сооружения, многочисленные религиозные объекты, музеи, дворцы, усадьбы и т. д. Международную известность приобрели такие памятники истории и культуры, как крепости Корела, Орешек (Шлиссельбург) (рис. 3), Старая Ладога и др.

Первые археологические свидетельства присутствия здесь человека фиксируются серединой IX тыс. до н. э., со времени распространения boreальных лесов, совпадающего с максимумом анциловой трансгрессии, которая завершилась не позднее 8200 г. до н. э. Наибольшая концентрация археологических объектов от древности до Средневековья приходится на северо-западное Приладожье. Именно здесь проходила основная коммуникационная артерия, связывающая Балтийское море с внутренними территориями Карелии и Финляндии, – Хейнийокский пролив, соединявший до образования р. Невы Финский залив с Ладогой. Далее р. Вуокса соединяет Ладогу с оз. Сайма во внутренней части Финляндии. Даже после образования р. Невы Хейнийокский путь сохранял свое транспортное значение вплоть до нового времени. Движение водного транспорта с Балтики в Ладогу осуществлялось через систему волоков.

Ладожское озеро омывает своими водами территории девяти районов Ленинградской области и Республики Карелия с населением, превышающим 0,5 млн человек. Каждый из районов, окружающих Ладожское озеро, обладает многообразным и в значительной мере уникальным природно-ресурсным потенциалом развития рекреации и туризма.



**Рис. 3. Орешек (Шлиссельбург)**

На территории Всеволожского района располагаются памятники Зеленого пояса Славы, мемориалы и обелиски «Дороги жизни», комплекс Осиновецкого маяка, включая мыс Осиневец, где во время Великой Отечественной войны был создан порт, через который осуществлялась связь Ленинграда со страной [Чероков, 1988]. Здесь же, на ст. Ладожское озеро, находится музей «Дорога Жизни». На правом берегу Невы, у Ивановских порогов, расположен памятник «Безымянная высота» («Холм славы»). Это один из наиболее величественных памятников «Зеленого пояса Славы».

На территории Приозерского района насчитывается более 160 памятников истории и культуры федерального, регионального и местного значения. Большая часть культурно-исторического наследия района сконцентрирована в Приозерске, одном из древнейших поселений России, впервые упоминающемся в летописи под 1143 г. как город Корела. Город сохранил в своем облике следы разных исторических эпох, национальных культур и религий. Он был важным торгово-военным и религиозно-культурным центром на территории, где обитало летописное племя корела, на Карельском перешейке, в месте впадения северного рукава реки Вуоксы в Ладожское озеро.

На рубеже XIII–XIV вв. для защиты северо-западных земель Новгородской республики от шведов здесь была заложена крепость Корела (рис. 4). Старая крепость – выдающийся памятник древнерусского военно-оборонительного искусства. Ныне здесь действует удивительный музей – единственная земляная крепость, сохранившаяся с XIV в. до наших дней.

В XVIII в. большая часть Лахденпохьи была в собственности Валаамского монастыря. С начала XIX в. край был в составе Финляндии, что определило архитектурный облик построек. На острове Путсаари сохранился семиметровый гранитный поклонный крест, служивший одновременно маяком для судов.

Территория Питкярантского района за свою многолетнюю историю входила в состав Новгородской республики, Московского царства, Швеции, Финляндии и лишь в 1945 г. окончательно отошла к России. Свидетельством этих событий являются



Рис. 4. Старая крепость Корела

два пограничных камня близ деревни Погранкондуши. Варашев камень обозначал начало границы между Россией и Швецией от берега Ладожского озера на север в период с 1618 г. до заключения Ништадского мира в 1721 г.

В Питкярантском районе много исторических объектов, связанных с военными событиями XX в. Неподдалеку от Питкяранты расположены два мемориально-исторических комплекса. «Долина героев» – местность, где во время советско-финляндской войны 1939–1940 гг. шли наиболее ожесточенные бои, и «Ниегъярви» – участок «линии Маннергейма», где упорнейшие бои шли уже во время Великой Отечественной войны. В Олонецком районе лучше, чем в других местах, сохранились традиции карельского народа, своеобразная архитектура жилищных и хозяйственных построек. Олонец, старейший город Карелии, впервые упоминается в документах 1137 г. Город сохранил планировку XVIII в., в нем имеются постройки XIX – начала XX в.: бывшие купеческие дома, здания общественного и административного назначения, церкви. К историческим местам района относятся Сяндебская пустынь (XVI–XIX вв.). Живописны и богаты достопримечательностями деревни Олонецкого района, где сохранились церкви и деревянные часовни. Большая Сельга – пример традиционной карельской деревни.

В г. Лодейное Поле в 1702 г. Петр I заложил Олонецкую судостроительную верфь, на которой за 130 лет ее существования было построено 450 кораблей для Балтийского флота.

Жемчужиной Волховского района является Старая Ладога – один из древнейших населенных пунктов на Северо-Западе России. Поселение было основано в VIII в. и входило в состав Киевской Руси. Согласно Ипатьевскому списку «Повести временных лет», именно сюда, а не в Новгород в 862 г. прибыл варяжский князь Рюрик. По преданию, здесь умер от укуса змеи и похоронен «вещий» Олег.



**Рис. 5. Мемориал морякам Краснознаменной Ладожской военной флотилии и Северо-Западного речного пароходства**

Неизгладимый след в Ленинградской области оставила Великая Отечественная война. Рядом с г. Кировском в 1991 г. был создан музей-заповедник «Прорыв блокады Ленинграда». В Новой Ладоге находится мемориал, посвященный морякам Краснознаменной Ладожской военной флотилии и Северо-Западного речного пароходства (рис. 5).

Помимо сакральных мест, археологических и культурно-исторических памятников, хотелось бы отметить и природу Приладожья. Исключительно высокий уровень разнообразия природы Приладожья до сего времени обеспечивал ее равновесие и устойчивое развитие, даже несмотря на близость многомиллионного города, каким является Санкт-Петербург.

Сохранение биоразнообразия заключается в создании сети особо охраняемых природных территорий (ООПТ). Это национальные парки, заповедники, заказники, памятники природы, которые выполняют природоохранные задачи, а также становятся местами рекреации и повышения экологической грамотности населения. В настоящее время на территории Приладожья насчитывается 17 ООПТ и более 30 памятников природы. Среди них можно назвать заказники: Олонецкий, Андрусово, Вожозерский, Западный Архипелаг, Сортавальский, Бухта Петрокрепость и другие [Красная книга..., 1999]. Площадь ООПТ, находящихся на территории девяти административных районов, прилегающих к Ладожскому озеру, составляет около 2 тыс. км<sup>2</sup> (примерно 7 % от общей площади районов). Такое количество охраняемых природных территорий нельзя считать достаточным для обеспечения сохранения всего биоразнообразия региона.

Святые места, уникальные природные условия и культурно-исторические памятники Приладожья удачно взаимно дополняют и обогащают друг друга, что создает материальную и духовную основу развития всех видов и форм туризма путем создания туристско-рекреационного комплекса «Ладожское кольцо» («Ладожское ожерелье»).

Превращение существующего потенциала этого «кольца – ожерелья» в реальность богатейшего туристического района требует проведения целого комплекса мероприятий. К таким мероприятиям, прежде всего, можно отнести определение допустимых нагрузок на данную территорию и регулирование рекреационного использования акватории и берегов, что является непростой задачей, учитывая межрегиональность управления и противоречивость требований со стороны хозяйственного и рекреационного развития [Алхименко, 2008].

Важнейшими факторами развития туризма являются совершенствование дорожной сети, водного транспорта, создание системы гостиничного обеспечения, коттеджей, частных гостевых домов, а также информационное обеспечение туристской деятельности – создание туристских карт, атласов, документальных фильмов, буклетов и т. п. Важным элементом стимулирования туризма является вовлечение местного населения в сферу создания гостевых домов, развития народных промыслов, проведения национальных праздников [Алхименко, Цветков, 2010].

## Литература

Алхименко А. П. Состояние и перспективы становления и развития рекреационной и туристской деятельности на побережье и акватории Ладожского озера // Проблемы биологии, экологии, географии, образования: история и современность. Материалы 2-й междунар. науч.-практ. конф. СПб.: ЛГУ им. А. С. Пушкина, 2008. С. 312–331.

Алхименко А. П., Цветков В. Ю. Рекреационные ресурсы Ладожского озера // Сб. научных трудов «Геоэкологические проблемы Ладожского озера». СПб.: ИПК «Прикладная экология», 2010. С. 15–45.

Века А. В. История России с древнейших времен до наших дней. Минск: Современный литератор, 2003. 895 с.

Кирпичников А. Н. Ладога – культурный и исторический феномен России и Балтийского моря. М.; СПб.: Полития, 2003. С. 10–17.

Красная книга природы Ленинградской области. Т. I: Особо охраняемые природные территории. СПб.: Акционер и К°, 1999. 352 с.

Ладожское озеро и достопримечательности его побережья: Атлас / Отв. ред. акад. РАН В. А. Румянцев. СПб.: Нестор-История, 2015. 200 с.

Чероков В. С. Для тебя, Ленинград! Л.: Лениздат, 1988. 224 с.

## THE SACRED PLACES OF HOLY LADOGA AND ITS COAST

N. A. Nesterov, V. A. Rumyantsev, A. I. Sorokin, V. V. Guzivaty

*Institute of Earth Sciences, RAS*

The specific aspect of water use as an object of tourism and pilgrimage is considered. Destinations related to Orthodox heritage are briefly presented. Attention is given to noteworthy sites on the Ladoga coast. In conclusion, the current issues of the transformation of this region into one of the greatest tourist destinations in the country are outlined.

## ВОЗМОЖНОСТИ РАЗВИТИЯ ВОДНОГО ТУРИЗМА НА ТЕРРИТОРИИ МУРМАНСКОЙ ОБЛАСТИ

**М. Е. Павлова\***

*Петрозаводский государственный университет*

Статья посвящена раскрытию возможностей развития водного туризма в Мурманской области, которая имеет приморское положение и располагает значительным числом озер и рек. В статье дана краткая характеристика водных объектов, использующихся для водного туризма в регионе. Рассмотрены основные виды водного туризма и их современное состояние на территории области.

---

\* Студентка ПетрГУ.

Туристическая индустрия является одним из приоритетных направлений роста мировой экономики. Россия – одна из стран, обладающая высоким природным и культурно-историческим потенциалом для развития туризма [Мусиенко, Тихомиров, 2012].

Одним из самых интересных и познавательных видов туризма является водный туризм, где используются различные водные объекты (реки, озера, моря) и плавательные средства (байдарки, каяки, надувные спасательные плоты, лодки, рафты, катамараны, плоты и др.).

Россия богата водными объектами для развития различных видов водного туризма – миллионы рек общей протяженностью свыше 8 млн км, около 3 млн озер, тысячи водохранилищ, моря. Одним из регионов России, который хорошо обеспечен многими водными объектами для данного вида туризма, является Мурманская область, а ее ландшафтные, климатические особенности и культурно-исторический потенциал усиливают привлекательность региона. Его ежегодно посещают свыше 300 тыс. туристов, из которых более 40 тыс. человек – туристы из других стран [Туристский потенциал Мурманской области].

Для развития водного туризма в регионе имеются и моря, и озера, и реки. Кольский полуостров омывается двумя морями – Белым и Баренцевым. Среди морей, омывающих Россию, Белое море – одно из самых маленьких. Площадь его поверхности 90 тыс. км<sup>2</sup>, т. е. 1/16 часть площади Баренцева моря, объем всего 4,4 тыс. км<sup>3</sup>. В Белое море впадают крупные реки Кемь, Мезень, Онега, Поной, Северная Двина и множество мелких рек [Белое море]. Площадь Баренцева моря 1424 тыс. км<sup>2</sup>, глубина до 600 м. Море расположено на континентальном шельфе. Юго-западная часть моря зимой не замерзает из-за влияния Северо-Атлантического течения. Юго-восточная часть моря называется Печорским морем. Баренцево море имеет большое значение для транспорта и для рыболовства. Границей между Белым и Баренцевым морями считается линия, проведенная от мыса Святой Нос (Кольский полуостров) до мыса Канин Нос (полуостров Канин) [Баренцево море].

На территории области расположено около 111 тыс. озер, самые крупные – Имандра (81,2 тыс. га), Умбозеро (42,2 тыс. га) и Ловозеро (23,4 тыс. га), которые лежат в глубоких котловинах и имеют вытянутую форму и сложную береговую линию. Среди озер есть оз. Могильное, которое является гидрологическим памятником федерального значения. Уникальность озера заключается в том, что оно наполнено как соленой, так и пресной водой по слоям, и при этом водяные слои в нем не перемешиваются. Всего таких слоев четыре: придонный, богатый сероводородом и выделяющими его бактериями, соленый, слабосоленый и пресный. Помимо самого существования природного водного

градиента, уникально и то, что в каждом слое озера проживают организмы, типичные исключительно для своей среды обитания [Озеро Могильное].

В регионе развита речная сеть: 20 тыс. рек, общая протяженность которых свыше 60 тыс. км, что в 1,5 раза превышает длину экватора. Реки делятся на четыре основные группы: полуравнинные (Поной, Варзуга, Стрельна), реки-каналы (Нива, Варзина, Колвица), озерного типа (таких большинство, например, Восточная Лица, Рында, Умба, Дроздовка), горного типа (Малая Белая). Русла рек сложены скальными породами в сочетании с валунами, галькой, иногда песком. Реки имеют пороги и водопады.

Особенности имеющихся водных объектов дают возможности развития в регионе многих видов водного туризма.

Одним из известных и наиболее популярных видов водного туризма является рыболовный туризм. Спортивная и любительская рыбалка развивается быстрыми темпами, чему способствует строительство на берегах рек комфортабельных баз для размещения рыболовов, подготовленные гиды-проводники, которые обеспечивают безопасную рыбалку в удаленных от цивилизации местах. В регионе действуют около 30 туристических лагерей. Организацией спортивной и любительской рыбалки занимаются 20 компаний, которым предоставлены в пользование около 100 водных объектов, 78 из которых – семужьи реки. Традиционно семгу ловят на наиболее привлекательных реках: Поной, Варзина, Рында, Харловка, Йоканьга, Варзуга, Умба, Кола.

Набирающим в последние годы популярность направлением водного туризма является дайвинг. В Мурманской области дайвинг позволяет ознакомиться со своеобразием подводного мира арктической области морей (Баренцева и Белого). Появление надежного и качественного снаряжения для холодной воды позволяет при относительно низких температурах (летом +4 ... +14 °С) и хорошей видимости (местами до 40 м) познакомиться с особым подводным ландшафтом, бухтами, поросшими зарослями морской капусты, камчатскими крабами, морским гребешком, морским ежом, рыбой-пинагор, прочими морскими обитателями, характерными для холодных морей [Дайвинг на Баренцевом море].

В Мурманской области развивается и круизный туризм. На атомном ледоколе можно отправиться из Мурманска на Северный полюс. Несмотря на длительное путешествие (около двух недель), этот вид экзотического туризма пользуется большим спросом. Одни из самых популярных маршрутов – это экспедиционные туры на Шпицберген и Землю Франца-Иосифа, где можно увидеть моржей, тюленей и китов,

посетить живописные бухты с птичьими базарами. Помимо высадки на берег в диких местах, экспедиционные круизы включают и историко-познавательные программы, которые проводят опытные ученые-полярники. У Мурманска есть все возможности для того, чтобы стать арктическим центром круизного туризма. К 100-летию юбилею города реализуется проект «Арктическая гавань», включающий комплекс работ по созданию необходимой инфраструктуры для принятия и обслуживания круизных судов и паромов, в том числе удлинение пирса дальних линий, реконструкцию и расширение здания морского вокзала, установку пункта пропуска в пассажирском районе порта.

Другими популярными видами водного туризма являются каякинг – вид водного туризма с использованием каяков (проводят его по оз. Имандра; как правило, экскурсии на каяках начинаются в яхт-клубе в г. Мончегорске) – и рафтинг – сплав по горным рекам и искусственным гробным каналам с использованием надувного судна (рафта). Реки региона, как правило, короткие, часто мелкие, крутые каменные пороги разделены широкими, почти без течения, плесами. На многих реках есть падуны (водопады), на небольших реках часты лесные завалы. Реки доступны для сплава на байдарках и рафтах с середины июня до середины сентября. Крупные реки – Поной, Умба, Колвица, Кутсайоки [Рафтинг на реке Умба на Кольском полуострове].

Особое значение имеет яхтинг, который требует большую акваторию (свыше 400 га) с достаточной глубиной (от 3 м) и значительной изрезанностью береговой линии. Глубина определяется осадкой крупных парусных судов, которая нередко достигает 2 м. Для малых парусников достаточна глубина 2 м. Наиболее благоприятные условия для развития яхтинга отмечаются в морских заливах, крупных озерах и водохранилищах. Поэтому одним из самых популярных мест для яхтинга является Кандалакшская губа Белого моря [Колотова, 1999].

В регионе имеются возможности и для других видов водного туризма, таких как вейкбординг, водные лыжи, виндсерфинг, слаломный каякинг и др. [Студфайлы].

Таким образом, Мурманская область имеет очень высокий природный потенциал для развития различных видов водного туризма, который набирает популярность у российских и зарубежных туристов.

### Литература

*Баренцево море.* [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.smileplanet.ru/russia/barentsevo-more/>

*Белое море.* [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://komanda-k.ru/отчет-о-походе/белое-море>.

*Дайвинг* на Баренцевом море. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://vodabereg.ru/dayving/dayving-na-barencevom-more/>

*Колотова Е. В.* Рекреационное ресурсоведение: Учебное пособие для студентов, обучающихся по специальности «Менеджмент». М., 1999.

*Муслиенко И. В. Тихомиров.* Туриндустрия России в зеркале международных сопоставлений // Всероссийский экономический журнал. 2012. № 9. С. 40–56.

*Озеро Могильное.* [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://murmantourist.ru/mesta/mogilnoe/>

*Рафтинг* на реке Умба на Кольском полуострове. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://kolatravel.ru/ktra01.htm>.

*Студфайлы.* [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.studfiles.ru/preview/6211806/page:3/>

*Туристский потенциал* Мурманской области. [Электронный ресурс]. Режим доступа: [http://www.murmantourism.ru/sites/default/files/Docs/buklet\\_po\\_turizmu.pdf](http://www.murmantourism.ru/sites/default/files/Docs/buklet_po_turizmu.pdf).

## **POSSIBILITIES OF DEVELOPING WATER TOURISM IN THE MURMANSK REGION**

**M. E. Pavlova**

*Petrozavodsk State University*

The article attempt to expose the opportunities for the development of water tourism in the Murmansk Region, which has a seaside position as well as a significant number of lakes and rivers. A brief description of water bodies used for water tourism in the region is given. The main types of water tourism and their current scope in the territory are considered.

## **МЕЛКОВОДЬЯ ВЕРХНЕВОЛЖСКИХ ВОДОХРАНИЛИЩ И ИХ ЭКОЛОГИЧЕСКОЕ ЗНАЧЕНИЕ**

**С. А. Поддубный**

*Институт биологии внутренних вод им. И. Д. Папанина РАН*

Выделены типы защищенных мелководий в верхневолжских водохранилищах. Проведена классификация типов мелководий. Определены их морфометрические характеристики при нормальном подпорном уровне, а также в случае навигационной и предполоводной сработки уровня воды. Рассмотрены критерии выделения границы мелководной зоны водохранилищ. Охарактеризованы особенности за-растания разных типов защищённых мелководий верхневолжских водохранилищ.

Многолетние и сезонные колебания уровня воды в водохранилищах приводят к периодическому изменению их водной поверхности. В связи с этим в период сработки часть побережья осушается и переходит в терри-

торию побережья, а в период наполнения затапливается водой водохранилища. Периодическое осушение и затопление ложа водохранилища способствуют формированию на этой площади специфических условий обитания живых организмов, которые характерны, с одной стороны, для береговых, а с другой стороны – для аквальных экосистем. Такую территорию предложено именовать акватерриторией водохранилища (АТВ) [Эдельштейн, 1998]. В пределах большей части АТВ расположена мелководная зона водоемов.

Для выделения внутренней границы мелководной зоны используются гидрологические, проектно-технические, гидробиологические критерии. Наиболее приемлем, на наш взгляд, комплексный критерий, учитывающий ряд гидрологических и гидробиологических показателей: глубину начала эрозии донных наносов волновыми потоками, глубину распространения песков, глубину распространения нижней границы высшей водной растительности, глубину начала влияния максимальных орбитальных скоростей у дна в волновом потоке на биомассу бентоса.

Все рассмотренные критерии основаны на статическом принципе зонирования прибрежья и могут быть применимы лишь для малочисленных однофазных водохранилищ, не осуществляющих сезонного регулирования стока. Непригодность статического принципа зонирования очевидна для водохранилищ глубокого сезонного и многолетнего регулирования стока (Рыбинское водохранилище), поскольку в разные по водности годы и в разные сезоны года одни биотопы, прежде мелководные, будут при сработке обсыхать, а другие – превращаться из мелководных в мелководные [Эдельштейн, 1998]. Следовательно, применительно к Рыбинскому водохранилищу внутреннюю границу мелководной зоны необходимо считать подвижной, а значение глубины, соответствующее среднему многолетнему осушению АТВ, – отсчитывать от среднемесячного многолетнего максимального уровня наполнения водоема.

В настоящее время существует достаточно много классификационных схем мелководий (литорали) водохранилищ. Из основных видов литорали, определяющих абиотическую и биотическую структуру прибрежных экосистем, мы выделяем прибрежные защищенные и прибрежные открытые мелководья.

В результате обработки картографического материала среди защищенных мелководий выделены *заливы, заостровные пространства*, мелководья, отделенные от открытой литорали сплошными или прерывистыми косами, – *карманные*. Как правило, защищенные мелководья представляют собой комплекс отдельных типов мелководий (моноструктур) и по своей структуре могут быть отнесены к полиструктурным.

После создания верхневолжских водохранилищ большая часть форм рельефа поймы Волги была затоплена и переработана гидродинамическим воздействием. В местах оврагов, балок и долин малых притоков, сопряженных с поймой Волги, образовались защищенные мелководья в виде заливов. Заостровные мелководья сформировались за прибрежными песчаными островами (Иваньковское и Угличское водохранилище, Волжский плес Рыбинского водохранилища) и останцами, большая часть которых осталась после затопления речного участка Горьковского водохранилища. Ряд заостровных мелководий образовался в результате затопления приустьевых заболоченных территорий долин малых притоков Волги. Защищенные мелководья карманного типа могли сформироваться в местах бывших заводей, в затопленных низинах за песчаными островами или после затопления русел небольших притоков, которые при достижении поймы в тыловой ее части изменяли свое направление вдоль стариц и заводей параллельно руслу [Поддубный, 2013].

На водохранилищах, осуществляющих сезонное, ограниченное сезонное, недельное и суточное регулирование стока (Горьковское, Угличское и Иваньковское), уровень воды поддерживается на отметке НПУ или близкого к нему с момента окончания наполнения (май) до начала предполоводной сработки (март) [Поддубный, 2012]. В связи с этим морфометрические характеристики выделенных типов защищенных мелководий в период открытой воды практически не меняются. В Рыбинском водохранилище – водоеме глубокого сезонного и многолетнего регулирования стока – по мере сезонного снижения уровня морфометрия защищенных мелководий существенно изменяется, одни типы мелководий трансформируются в другие или полностью исчезают.

В Иваньковском, Угличском и Горьковском водохранилищах выявлено, что при сезонном осушении в первом из 47 км<sup>2</sup> под водой остается только 0,4 км<sup>2</sup> защищенных мелководий. В Угличском водохранилище осушается 86 % мелководий. В Горьковском водохранилище осушение происходит на площади 9,7 км<sup>2</sup>, обводненными остаются 2,3 км<sup>2</sup> защищенных мелководий.

В Рыбинском водохранилище при снижении уровня водоема на 1,9 м из 154 защищенных мелководий общей площадью 139 км<sup>2</sup> полностью обсыхают 82 мелководья на площади 32,5 км<sup>2</sup>. Уменьшаются в размерах, сохраняя свою структуру, 55 мелководий с суммарной площадью 104 км<sup>2</sup>. Трансформируются в новые типы (заливы, заостровные или карманные) 28 мелководий с общей площадью 5,7 км<sup>2</sup>. Полностью изолированными от открытой части водоема остаются 9 участков (малых водоемов) с суммарной площадью 1 км<sup>2</sup>. В период предполоводной сработки уровень понижается относительно НПУ на 3,4 м, и обводненные защищенные мелководья оста-

ются только на площади 7,5 км<sup>2</sup>, включая 1 км<sup>2</sup> изолированных ранее участков. Объем мелководий уменьшается на 95 %. Таким образом, за исключением короткого периода с максимальным уровнем воды защищенные мелководья Рыбинского водохранилища находятся в постоянной сезонной циклической пространственно-временной трансформации.

Местообитания (биотопы) защищенных мелководий (прибрежно-зарослевые ихтиоценозы) характеризуются условиями, оптимальными для формирования высшей водной растительности и повышенной седиментации взвесей. На биотопах открытого побережья (пойменных ихтиоценозах) сохраняется повышенная гидродинамическая активность водной массы. На первых видовое разнообразие гидробионтов наибольшее, на вторых – наблюдается минимальная ихтиомасса и устойчивость скоплений [Поддубный, 2006, 2013].

Среди исследованных водохранилищ наибольшее зарастание характерно для долинно-руслового Иваньковского – 23 %, при этом мелководья до 2 м здесь занимают около половины площади – 48 %. Угличское водохранилище руслового типа зарастает значительно меньше – 5 %, доля мелководий – 36 %. Рыбинское водохранилище долинного типа, зарастает очень слабо – в зависимости от уровня наполнения от 0,2 до 1,2 %, площадь мелководий при НПУ составляет 21 %. Горьковское водохранилище долинно-руслового типа зарастает не более чем на 1,4 %, мелководья занимают 9,7 %.

Корреляционным анализом выявлены связи между морфометрическими показателями мелководий и степенью их зарастания. Установлено, что степень зарастания мелководий возрастает с увеличением их изолированности и вытянутости, а также с уменьшением объема, площади и открытости мелководий. Изолированность участка в большей степени способствует зарастанию мелководий (вклад до 55 %). Объем и открытость участков играют вторичную роль (их вклады, соответственно, 37 и 8 %) [Поддубный и др., 2017].

## Литература

*Герасимов Ю. В., Поддубный С. А.* Роль гидрологического режима в формировании скоплений рыб на мелководьях равнинных водохранилищ. Ярославль: ЯГТУ, 1999. 172 с.

*Поддубный С. А.* Гидрологический режим местообитаний рыб в Рыбинском водохранилище // Изв. РАН, сер. Географическая. 2006. № 1. С. 121–128.

*Поддубный С. А.* Современное состояние и экологическое значение уровня воды в верхневолжских водохранилищах // Вода: химия и экология. 2012. № 12. С. 9–15.

*Поддубный С. А.* Защищенные мелководья верхневолжских водохранилищ и их экологическое значение // Вода: химия и экология. 2013. № 11. С. 25–40.

Поддубный С. А., [Лапченков В. Г.], Чемерис Е. В., Бобров А. А. Зарастание защищенных мелководий верхневолжских водохранилищ в связи с их морфометрией // Биология внутренних вод. 2017. № 1. С. 1–9.

Эдельштейн К. К. Водохранилища России: экологические проблемы, пути их решения. М.: ГЕОС, 1998. 277 с.

## SHALLOW AREAS IN THE UPPER VOLGA RESERVOIRS AND THEIR ECOLOGICAL IMPLICATIONS

S. A. Poddubny

*Papanin Institute for Biology of Inland Waters, Russian Academy of Sciences*

The types of protected shallow water areas in reservoirs of the Upper Volga were distinguished and classified. Their morphometric characteristics at the normal headwater level and water level drawdown for navigation and prior to flooding were determined. Criteria for outlining the shallow zone boundary in reservoirs are considered. Features of overgrowing of different types of protected shallow areas in the Upper Volga reservoirs are described.

## ПРИЧИНЫ И ПУТИ РАЗРЕШЕНИЯ ОСТРЫХ СОЦИАЛЬНО- ЭКОЛОГИЧЕСКИХ ПРОБЛЕМ ЛАДОЖСКОГО ОЗЕРА

Ш. Р. Поздняков, В. А. Румянцев

*Институт озероведения РАН*

Ладожское озеро – одно из самых северных среди величайших по площади озер мира, крупнейший пресноводный водоем Европы, имеющий стратегическое значение для развития Северо-Западного региона России.

Ладога является объектом различных видов водопользования. Оно представляет собой единственный безальтернативный источник питьевого водоснабжения Санкт-Петербурга. В то же время Ладога служит источником промышленного и сельскохозяйственного водоснабжения, а также приемником сточных вод, поступающих от огромного числа предприятий промышленности и агропромышленного комплекса.

Бассейн Ладожского озера представляет собой сложную природную систему, включающую водосборы крупных озер: Онежского – второго по величине озера Европы, а также Ильменя и Саймы (Финляндия). Рассматриваемые совместно, названные озера по аналогии с Великими американскими озерами образуют систему Великих европейских озер. Для бассейна Ладожского озера характерна развитая гидрографическая сеть, которая на российской части водосбора наиболее выражена в бассейне Онежского озера.

Поскольку Ладожское озеро представляет собой замыкающий водоем огромной озерно-речной системы, большинство происходящих в ней изменений, в конечном счете, сказывается на состоянии экосистемы и качестве озерной воды.

Площадь бассейна Ладожского озера составляет 98 % площади бассейна р. Невы, 66 % площади бассейна Финского залива и 18 % – бассейна Балтийского моря. Поэтому характер природопользования в бассейне Ладоги оказывает влияние на качество воды не только самого озера и р. Невы, но и Финского залива и Балтийского моря в целом, сохранение которых определено рядом международных обязательств России.

В силу неполного выполнения программы и недостатков методологического характера данные государственного мониторинга поверхностных вод Росгидромета не отражают реальное состояние крупнейших озер Европы. Из этих данных можно прийти к выводу, что состояние Ладоги вполне благополучное и не вызывает беспокойства. В действительности такое заключение является глубоким заблуждением и может привести к непоправимым последствиям. Результаты работ Института озераведения РАН, проводимые им Ладожском озере с 1955 г., свидетельствуют о противоположном: в Ладожском озере за последние 60 лет произошли кардинальные негативные изменения в состоянии экосистемы водоема и качестве воды, которые требуют глубокого изучения и принятия должных мер по исправлению положения.

До 60-х гг. прошлого века вся акватория Ладожского озера относилась к олиготрофному типу водоемов, а вода отличалась высоким качеством и считалась эталоном чистой воды. Во всех расположенных по берегам Ладоги населенных пунктах и городах, а также в Санкт-Петербурге ладожская вода использовалась для целей питьевого водоснабжения без применения специальных систем водоподготовки.

В середине 60-х гг. прошлого века в Ладожском озере появились первые признаки происходящих в нем негативных процессов, которые в связи с дальнейшим ростом антропогенной нагрузки на территории бассейна в 1976–1985 гг. привели к серьезным изменениям качества воды и состояния экосистемы озера и заставили говорить о приближении экологической катастрофы. В воде, донных отложениях и гидробионтах Ладожского озера появились токсические вещества, содержание которых часто превышало ПДК. Довольно высокого уровня достигло загрязнение озера тяжелыми металлами. В аномально загрязненных участках их концентрации значительно превышали фоновые значения. Изменение химического состава режима Ладоги не могло не сказаться на состоянии озерной экосистемы. В озере произошло нарушение продукционно-деструкционных процессов, наметились изменения структуры видов гидробионтов, снижалось их видовое разнообразие.

Опасные масштабы приобрел в озере процесс антропогенного эвтрофирования. Некоторые районы озера из олиготрофного состояния перешли в мезотрофное, а часть прибрежных районов – в эвтрофное. Развивающийся в озере процесс эвтрофирования привел к такому ранее не наблюдавшемуся отрицательному явлению, как массовое развитие синезеленых водорослей. В отдельные годы летом «цветение» воды охватывало обширные площади не только в мелководной южной части озера, но и в относительно глубоководных частях. Разложение на дне огромных объемов отмерших синезеленых водорослей сопровождалось большими затратами кислорода и приводило к образованию многочисленных заморных явлений и зон.

Ухудшения качества воды сказались практически на всей уникальной биоте Ладожского озера. Токсиканты не просто появились в воде, но и начали циркулировать в экосистеме Ладожского озера по трофическим цепям и накапливаться в верхнем звене – рыбе, в том числе промысловой. Увеличение антропогенной нагрузки на Ладожское озеро при отсутствии специальных систем водоподготовки питьевой воды, а также содержание токсических веществ в промысловой рыбе серьезно сказались на состоянии здоровья населения в данном регионе. Общий уровень заболеваемости жителей Ленинграда оказался одним из самых высоких в стране.

Указанный период был критическим для Ладожского озера, что потребовало принятия срочных мер по оздоровлению его состояния. В 1984 и 1986 гг. были приняты постановления, предусматривавшие дополнительные меры по охране и рациональному использованию водных ресурсов, закрытие Приозерского целлюлозно-бумажного комбината и перевод на оборотное водоснабжение Волховского алюминиевого завода. Несмотря на это, экологическая ситуация в Ладожском озере улучшалась крайне медленно, что определяется значительной инертностью внутриводоемных процессов огромного озера. И только в связи с резким изменением социально-экономической обстановки на территории водосборного бассейна Ладоги и обвальным снижением уровня производства с начала 90-х гг. прошлого столетия стало заметно ее улучшение. Существенно снизились концентрации загрязняющих веществ на подавляющей части озера, мезотрофные районы вернулись в олиготрофное состояние, а эвтрофные – в мезотрофные. Это повлекло за собой и снижение общей и онкологической заболеваемости населения, и эти показатели в Санкт-Петербурге в начале 2000-х гг. стали близки к средним по России значениям.

Отмеченный период некоторого оздоровления экосистемы и улучшения качества воды Ладоги важен тем, что озеро не дошло до предельного уровня, после которого процесс становится необратимым. Восстановле-

ние возможно, но это может занять не один десяток лет. Об этом, в частности, свидетельствуют данные изотопных исследований, которые показали наличие в Ладоге воды с возрастом более 40 лет. По существу, процесс оздоровления затронул лишь верхние слои воды, а не всю ее толщу и донные отложения с депонированными в них опасными химическими соединениями. Остались неохваченными «глубинные» водоемные процессы. Озеро находится в крайне неустойчивом напряженном состоянии, и небольшого дополнительного воздействия может оказаться достаточно для возвращения к прежнему депрессивному состоянию экосистемы и дальнейшему ухудшению качества воды Ладоги.

В 2001–2002 гг. в Ладожском озере появились новые негативные проявления, свидетельствующие о нарушении стабильности в экологической ситуации. В озере на участках, сильно загрязненных органическим веществом, обнаружены полисапробные зоны. В наиболее загрязненных участках и в местах поступления токсических соединений образуются «мертвые» зоны. В них водные беспозвоночные и рыбы полностью отсутствуют как в толще воды, так и на дне и в донных отложениях. Полисапробные и «мертвые» зоны образуются пока в береговой зоне, включая некоторые заливы и губы, которые оказываются своеобразной зоной повышенного риска. Однако возникает реальная угроза появления устойчивых и постепенно расширяющихся пятен отсутствия жизни в глубинных районах озера.

В районах сбросов промышленных сточных вод в водоем поступают значительные количества органических и токсических соединений, содержание которых нередко превышает предельно допустимые концентрации в 3 и более раз. Особенно высокий уровень загрязнения характерен для притоков Ладожского озера – рек Волхов, Сясь, Свирь, Вуокса и др., в которых содержание солей тяжелых металлов (медь, марганец, железо и др.) и нефтепродуктов превышает ПДК.

В 2004 г. в Ладоге впервые были обнаружены токсикогенные цианобактерии (синезеленые водоросли), вырабатывающие в процессе своей жизнедеятельности токсины, которые имеют достаточно широкий спектр воздействия на органы рыб и человека, а по степени опасности превосходят боевые отравляющие вещества.

В 2009 г. в Ладоге были обнаружены опасные химические вещества, которые, как и токсины цианобактерий, относятся к стойким органическим загрязнителям. Эти вещества представляют особую опасность. Период их полураспада превышает продолжительность жизни одного поколения людей. Попав в организм животного или человека, они могут годами сохраняться и накапливаться в нем, не обнаруживая себя какими-либо заметными проявлениями. Это продолжается до тех пор, пока концентра-

ция стойких органических загрязнителей не достигнет предельно допустимых значений, после чего возникают всевозможные заболевания в силу их широкого спектра действия на различные органы человека.

Выполненные впервые в мире для пресноводных водоемов съемки взвешенных в воде и находящихся в донных осадках частиц наномасштабных размеров показали, что они широко распространены в Ладоге. При этом в мелководном и переходном районах Ладожского озера отсутствует седиментация ультрадисперсных наночастиц, и обширные пространства дна южной части озера практически лишены покрова современных донных отложений. Наночастицы из мелководного и переходного районов озера уносятся стоком р. Невы, на которой расположены водозаборы некоторых городов Ленинградской области и Санкт-Петербурга. При этом выявленные в Ладоге размеры наночастиц представляют серьезную угрозу здоровью населения. Опасность для здоровья людей и рыб во много раз возрастает за счет их большой удельной поверхности и высокой сорбционной способности. Сорбируя на себя присутствующие в Ладоге стойкие органические загрязнители, токсины синезеленых водорослей и другие опасные химические соединения, наночастицы доставляют их к водозаборным сооружениям, через которые они без задержки свободно проходят и поступают в питьевую воду вместе с переносимыми ими токсинами. В организм человека опасные соединения попадают также в процессе употребления ладожской рыбы. В последнюю они проникают с наночастицами через рот, жабры и поры на туловище, накапливаясь, вызывают у рыб различные серьезные токсикозы.

Основная причина сложившейся в Ладожском озере проблемной экологической ситуации в 70–80-х гг. прошлого века была связана с экстенсивным характером развития экономики в ладожском бассейне в предшествующие 30–70-е гг. За эти годы на водосборном бассейне были введены в действие сотни крупных промышленных предприятий, построены крупнейшие в Европе животноводческие фермы, птицефабрики, предприятия по восстановлению и переработке растительной продукции и др. По интенсивности и объемам промышленного развития ладожский бассейн занял ведущее место в экономике страны.

Вместе с тем во властных структурах негласно существовало ошибочное мнение о том, что самоочищающая способность таких крупных водоемов, как Ладога, огромна. Поэтому при проведении природоохранной деятельности на практике придерживались остаточного принципа ее финансирования. Из-за ограниченных средств на предприятиях строились малоэффективные очистные сооружения, а неподлежащие общественному контролю предприятия оборонной промышленности сбрасывали сточные воды нередко вообще без очистки. Подобное отношение к природо-

охранной деятельности имело место и на предприятиях сельского хозяйства, где, в частности, отсутствовали оборудованные хранилища для удобрений и пестицидов, которые применялись в необоснованно завышенных размерах. Из-за низких цен на минеральные удобрения отсутствовало стремление к переработке и использованию навоза в качестве органического удобрения. Поэтому навоз просто накапливался и хранился в необорудованных для этого строениях. Во время дождей и снеготаяния происходило вымывание удобрений, пестицидов и навоза, и они вместе с водой стекали в водные объекты. В результате такого бесхозяйственного отношения к сохранению природы в Ладогу в больших объемах поступали различные загрязняющие вещества, сотни из которых были высокотоксичными, а также органические вещества и биогены. Свою лепту в нарушение устойчивости экосистемы внесли водный транспорт, гидроэнергетика, жилищно-коммунальное хозяйство, молевой сплав леса и др. За многие годы бесхозяйственного отношения к Ладожскому озеру уровень антропогенной нагрузки на водоем превысил его экологическую емкость и способность к самоочищению, следствием чего стали деградация экосистемы, рост уровня трофности и резкое ухудшение качества воды.

Присутствие в воде и донных отложениях Ладожского озера супертоксикантов, к которым относятся стойкие органические загрязнители, включая пестициды, синтетические красители, продукты разложения медицинских отходов и т. д., объясняется главным образом двумя причинами. Во-первых, наличием в ладожском бассейне огромного числа действующих плохо оборудованных и заброшенных полигонов промышленных отходов и несанкционированных свалок, расположенных в большинстве своем вблизи водотоков. Во-вторых, Санкт-Петербург является перевалочным пунктом поставок из-за рубежа потенциально опасных химических соединений. Отсутствие контроля за последующим перемещением, использованием и утилизацией таких соединений приводит к тому, что часть из них оседает в городе и распространяется в ладожском бассейне и нередко, в конечном счете, оказывается в воде и донных отложениях Ладоги. На состояние Ладоги значимое негативное влияние оказывают загрязнения, поступающие из оз. Ильмень, особенно в период весеннего половодья. Во время таяния снега воды Ильменя затапливают низменные прибрежные территории, по площади сопоставимые с акваторией водоема. В зону затопления попадают населенные пункты, разные предприятия, места отдыха местного и приезжающего населения. Во время спада половодья накопленные на территориях бытовые, строительные и другие отходы переносятся талой водой в озеро, где из-за малых глубин, частых сильных ветров и вызванного ими взмучивания поднимаются со дна и поступают в реку Волхов, а далее часть из них попадает с волховскими

водами в Волховскую губу Ладожского озера. По мере продвижения по реке, а также в губе химические загрязнения, в том числе токсичные, сорбируются наночастицами и оказываются в Ладоге, а затем в Неве.

Пример влияния оз. Ильмень на Ладогу свидетельствует о том, что нельзя обеспечить оздоровления экологической обстановки за счет проведения работ только в двух основных субъектах – Ленинградской области и Республики Карелия. В разной мере в них должны участвовать и другие регионы ладожского бассейна, не имеющие прямого выхода к берегам Ладоги и Онеги и поэтому не испытывающие непосредственного воздействия от состояния озер на свою экономику и здоровье населения. Кроме того, обязательным является и участие Санкт-Петербурга как наиболее заинтересованного субъекта РФ в разрешении ладожской проблемы.

Для эффективного, не допускающего промедления решения обозначенной проблемы требуется комплексный подход, опирающийся на объективную информацию и включающий в себя построение правовой базы, а также единая для всех участников работ программа целенаправленных мер. В этой связи требуется:

- принятие Федерального закона «Об охране Ладожского и Онежского озер»;
- принятие Федеральной целевой программы мер по восстановлению биологического потенциала и качества водных ресурсов Ладожского и Онежского озер;
- строительство водовода Ладожское озеро – Санкт-Петербург.

Принятие Федерального закона «Об охране Ладожского и Онежского озер» позволит ликвидировать существующие пробелы в природоохранном законодательстве, обеспечит ориентацию расположенных в ладожском бассейне субъектов РФ на осуществление целенаправленных мер по оздоровлению экологической ситуации в озерах и на водосборном бассейне и создаст правовую основу для их выполнения.

Федеральная целевая программа мер по восстановлению биологического потенциала и качества водных ресурсов Ладожского и Онежского озер должна включать работы, направленные на полноценное обеспечение природоохранной деятельности (развитие системы мониторинга водных объектов, создание работоспособной системы контроля за стойкими органическими загрязнителями, установление на водосборе водоохраных зон требующейся ширины и т. д.), а также меры по снижению угрозы значимого воздействия хозяйственной деятельности на состояние Ладожского озера. Программа должна выполняться за счет федеральных средств при долевым участии всех расположенных в ладожском бассейне субъектов РФ.

Строительство трубопровода для забора воды из наиболее чистых глубинных районов Ладоги и подачи ее в Санкт-Петербург позволит существенно повысить безопасность питьевого водоснабжения, что приведет к снижению заболеваемости жителей города.

Реализация трех обозначенных блоков позволит не только кардинально улучшить экологическую обстановку и снизить заболеваемость жителей Санкт-Петербурга, но и обеспечит возможность экспортных поставок питьевой воды из Ладоги в нуждающиеся в ней зарубежные страны.

## **CAUSES OF AND POTENTIAL SOLUTIONS FOR PRESSING SOCIO-ECOLOGICAL PROBLEMS OF LAKE LADOGA**

**Sh. R. Pozdnyakov, V. A. Rumyantsev**

*Institute of Limnology, Russian Academy of Sciences*

Lake Ladoga is the largest freshwater body of Europe. The currently growing human pressure in the catchment area leads to transformation of both aquatic and terrestrial ecosystems. The rate and scope of anthropogenic eutrophication has become alarming. The main reason for the present-day ecological situation at Lake Ladoga is the extensive mode of economic development in the previous years. To effectively resolve the problem an integrated approach is needed, including generation of proper legislation and a program of targeted actions.

## **ИСТОРИКО-ГЕОГРАФИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ КАК ИСТОЧНИК ИНФОРМАЦИИ О КЛИМАТО- ГИДРОЛОГИЧЕСКИХ АНОМАЛИЯХ ПРОШЛОГО**

**С. Б. Потахин**

*Петрозаводский государственный университет*

Экстремальные (аномальные, опасные и неблагоприятные) природные процессы и явления – это события естественного происхождения или элементов природной среды, которые по масштабу распространения, силе, а также продолжительности оказывают негативное воздействие на жизнедеятельность людей. К ним относят холодные зимы и снежные лавины, затяжные осенние дожди и летние жары, нашествия саранчи и многое другое.

Стихийные бедствия, являющиеся крайней формой проявления неблагоприятных и опасных природных процессов и явлений, парализуют жизнедеятельность населения в затронутом районе и наносят материальный ущерб. Однако и относительно слабые виды неблагоприятных явлений, как-то: туман, утренние заморозки, гололед, град и т. п., также могут

отразиться на различных видах хозяйственной деятельности населения, сказаться на здоровье человека и, как следствие, нанести определенный ущерб.

Выделяется пять групп неблагоприятных и опасных природных процессов и явлений: солнечно-космические, геолого-геоморфологические, климато-гидрологические, геохимические и биологические. В каждой из приведённых групп определяют виды процессов, оказывающие ударное, разрушительное воздействие и проявляющиеся эпизодически (например, тайфуны и ураганы) и оказывающие угнетающее воздействие, повторяющиеся регулярно или непрерывно (например, засухи, воздействие кровососущих насекомых и т. д.). По площади проявления их разделяют на резко ограниченные и слабо ограниченные.

Для Европейского Севера России наиболее широко представлены неблагоприятные и опасные (аномальные) процессы и явления климато-гидрологического генезиса: градобития, молнии, кратковременные засухи, экстремальные температуры, осадки и скорости ветра, сезонные колебания речного стока и другие. Без сомнения, сказываются и геолого-геоморфологические явления, такие как речная эрозия, абразия береговой линии водоемов. Из явлений и процессов биологического генезиса отметим массовое размножение вредителей сельскохозяйственных культур, воздействие кровососущих насекомых, эпидемии и эпизоотии, пожары. Геохимические и солнечно-космические процессы и явления практически не представлены или незначительно сказываются на жизнедеятельности населения.

Поскольку наиболее часты и наиболее ощутимы для населения явления климато-гидрологической группы, им всегда уделялось большее внимание: они фиксировались в летописях, монастырских хрониках, дневниках путешественников, сельскохозяйственных отчетах и других исторических документах.

Наиболее достоверными источниками являются гидрометеорологические данные, которые позволяют характеризовать погодные условия в масштабах десятилетий и первых столетий. Однако период инструментальных наблюдений в России довольно короткий. К тому же сеть метеорологических станций не всегда полностью охватывает территорию какой-нибудь административной единицы. Различные события (в первую очередь, войны) нарушали работу метеостанций и служили причиной появления пропусков в гидрометеорологических рядах.

Дополнительными источниками информации об аномальных процессах и явлениях служат дневники путешественников, различные исторические источники и даже литературные произведения.

*Гидрометеорологические наблюдения.* В России регулярные метеорологические наблюдения начались при Петре I. В 1700 г. метеорологические приборы были установлены в Москве на Сухаревской башне. В 1716 г. была создана метеорологическая обсерватория в Санкт-Петербурге [Храбров, 1974]. С 1725 по 1800 г. в России появилось более 50 метеорологических станций. Начало постоянных научно обоснованных метеорологических наблюдений в России связано с созданием в апреле 1849 г. при Институте Корпуса горных инженеров Главной физической (ныне геофизической) обсерватории в Санкт-Петербурге. Основателем и первым директором был академик А. Я. Купфер.

Число метеостанций в дореволюционной России увеличивалось довольно быстрыми темпами: в 1872 г. их было 71, в 1880 – 158, в 1890 – 421, а в 1912 г. – уже 1209. Сведения о первых метеорологических наблюдениях в Олонецкой губернии относятся к 1810 г. [Климат Петрозаводска, 1982]. С 1816 по 1835 г. сбор метеоданных в г. Петрозаводске проводился полковником корпуса горных инженеров Кларком, с 1839 г. – Веселовским [Список..., 1879]. В 1860 г. секретарем Олонецкого губернского статистического комитета А. И. Ивановым были обобщены средние температурные показатели по г. Петрозаводску за период с 1816 по 1839 г. [Иванов, 1860].

В дореволюционное время метеостанции и посты были также созданы на Валааме (1859 г.), в Олонце (1896 г.), Паданах (1889), Повенце (1875). В начале XX в. в Олонецкой губернии функционировало 8 станций II разряда I класса и 13 станций III разряда [НА РК. Ф.10. Оп. 1. Д. 4/13. Л. 3–3об.].

*Сельскохозяйственные отчеты.* В 1786 г. в России была создана структура эстафетных сообщений о погоде, видах на урожай и ценах на сельскохозяйственную продукцию. Широкое распространение она получила в начале 1802 г., когда были созданы министерства. Министерству Внутренних Дел было получено собирать сведения о погоде во всех губерниях России, состоянии посевов и продовольственном обеспечении населения. Эта информация передавалась по цепочке: волостное правление (оно давало сведения по сельским обществам волости) – уездное правление – Канцелярия губернатора – Министерство Внутренних Дел. В регулярных волостных и уездных отчетах Архангельской и Олонецкой губерний «О произрастании хлебов и трав» довольно часто встречаются записи об опасных для сельскохозяйственной деятельности явлениях. Эти материалы хранятся в фондах I «Канцелярия Олонецкого губернатора» и 10 «Олонецкая губернская земская управа» Национального архива Республики Карелия (НА РК).

*Монастырские хроники.* Монастырские и другие церковные документы представляют большой интерес для широкого круга исследователей. Используются они и представителями географических наук. Так, например, Ф. С. Родриго и др. [Rodrigo et al., 1998] была изучена климатическая информация, содержащаяся в более чем 1000 писем, принадлежащих переписке ордена иезуитов за 1634–1648 гг., и касающаяся в основном территории Кастилии (Испания). Исследователи выяснили, что этот промежуток времени отличался обильными осадками и сильными холодами.

Нами в ходе выполнения данного исследования проанализированы обнаруженные в Национальном архиве Республики Карелия (НА РК. Ф. 65) документы Палеостровского монастыря, располагавшегося на острове Палеостров в Повенецком заливе Онежского озера, в пяти километрах от села Толвуя [Потахин, 2008]. В «Журнале записи о работах и происшествиях Палеостровского монастыря» наряду с информацией, касающейся хозяйственной деятельности братии монастыря, содержатся сведения о погодных условиях, включая данные об аномальных явлениях и процессах.

Монахи занимались земледелием, животноводством и рыбной ловлей. Именно потому в монастырских записях содержится большое количество упоминаний, касающихся состояния погоды. Указаны, в частности, случаи выпадения снега в мае и сентябре, июньские заморозки, сильные ветры и др. Данный документ помог более подробно осветить погодные условия начала XIX в., периода, когда отсутствовали материалы сельскохозяйственных отчетов и данные метеорологических станций.

*Материалы периодической печати.* Один из довольно нестандартных приемов фиксирования опасных и неблагоприятных природных процессов и явлений прошлого – использование материалов периодической печати. М. Пирсон [Pearson, 1978], например, проанализировал изменения погоды в Шотландии в XVIII–XIX вв. на основе газетных сообщений. К. Грегори и Р. Уильямс [Gregory, Williams, 1981] при составлении карты распространения стихийных бедствий в Дербишире в 1879–1978 гг. привлекли материалы, опубликованные в газете «Derby Evening Telegraph».

В Олонецкой губернии XIX – начала XX столетия основным периодическим изданием была газета «Олонецкие губернские ведомости» (ОГВ), учрежденная в 1838 г. С 1865 г. в этой газете стали публиковаться метеорологические сведения.

Информация метеорологического характера содержалась также в журнале «Вестник Олонецкого губернского ведомства», выходивший с 1907 по 1917 г. по 24 номера в год, «Известиях общества изучения Олонецкой губернии» и в выпусках «Текущей сельскохозяйственной статистики Олонецкой губернии» (1901–1914). Гидрометеорологические сведения публиковались в ежегодных «Приложениях ко Всеподданнейшему отчету Олонецкого губернатора. . .».

*Литературные произведения.* Довольно интересную информацию о неблагоприятных и опасных природных процессах и явлениях могут дать отдельные литературные произведения. Примером является поэма А. С. Пушкин «Евгений Онегин», где описано позднее наступление зимы 1824–1825 года: «Снег выпал только в январе На третье в ночь...» (15 января по новому стилю).

Другие примеры относятся к поэзии У. Шекспира [Айнбиндер и др., 1988], который в свои произведения вставлял описания увиденных им природных процессов. В пьесе «Сон в летнюю ночь», датируемой 1595 г., он описал сильные дожди с начала мая по конец июня 1584 г., уничтожившие посевы зерновых на значительных площадях. В пьесе «Антоний и Клеопатра» (1607) упоминается очень глубокий снег, а в «Кориолане» (1607–1608) – костры на льду. Летописи же свидетельствуют, что в 1607–1608 гг. в Англии была очень холодная зима. Сильные морозы зарегистрированы с 5 декабря по 14 февраля. В эту зиму заморзла Темза, и на льду развели костры. 16 января начался невиданный снегопад. Снег прибывал с каждым днем до 12 марта, шел он и в апреле, а заносы сохранились до конца мая.

Для территории Олонецкой губернии подобным произведением стала поэма Ф. Н. Глинки «Карелия» [Глинка, 1980]. Описывая природу Карелии, в частности климат, автор постоянно обращает внимание на суровые условия Севера [Потахин, 1996]. Это упоминания о сильных зимних морозах, о поздно приходящей весне, о майских заморозках, о пасмурном лете.

Одно из экстремальных природных явлений – исключительно жаркое лето, послужившее причиной пожаров по всей южной Карелии, Ф. Н. Глинка описал очень подробно. Повествование о пожаре Ф. Н. Глинка ведет устами своего героя – монаха-отшельника, уроженца Греции. Однако при чтении отрывка создается впечатление, что автор сам наблюдал это стихийное бедствие. Подтверждением служат сведения, приводимые Е. П. Борисенковым и В. М. Пасецким [1988, с. 390], о том, что в 1826 г., в год приезда Глинки в Петрозаводск, на территории европейской части России сильная жара началась в мае и продолжалась с необыкновенным постоянством до осенних месяцев.

В опубликованных дневниках и отчетах путешественников-исследователей Европейского Севера XVIII–XIX вв. также содержатся сведения об аномальных явлениях. Это касается отчетов академиков И. И. Лепехина и Н. Я. Озерецковского, Г. П. Гельмерсена, И. С. Полякова, а также «Подённых записок...» гражданского губернатора Олонецкого наместничества Г. Р. Державина. Однако сведения, приводимые в этих источниках, затрагивают короткий временной период – время проведения экспедиционных работ и поездок, реже в них содержатся данные, полученные при проведении опроса местного населения.

Таким образом, можно констатировать, что приведенные источники позволяют «углубиться» во времени и «расшириться» в пространстве в вопросе, касающемся проявления неблагоприятных и опасных (аномальных) процессов на определенной территории.

### Литература

*Айнбиндер М. И., Добромыслова Л. В., Имень Е. В.* Шекспир и погода // Человек и стихия-89. Л.: Гидрометеиздат, 1988. С. 88–89.

*Борисенков Е. П., Пасецкий В. М.* Тысячелетняя летопись необычайных явлений природы. М.: Мысль, 1988. 522 с.

*Глинка Ф. Н.* Карелия: Описательное стихотворение в четырех частях. Петрозаводск: Карелия, 1980. 118 с.

*Иванов А. И.* Очерк Олонецкой губернии // Олонецкие губернские ведомости. 1860. № 3.

*Потахин С. Б.* Природа и хозяйство Олонецкой губернии в поэме Ф. Н. Глинки «Карелия» // Изв. Русского географического общества. 1996. Т. 128, вып. 1. С. 81–88.

*Потахин С. Б.* Погодные аномалии 1809–1819 гг. в хрониках Палеостровского монастыря // Православие в Карелии: Материалы III региональной науч. конф., посвящ. 780-летию крещения карелов / Отв. ред. В. М. Пивоев. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2008. С. 77–78.

*Храбров Ю. Б.* Прогноз погоды. М.: Знание, 1974. 64 с. (Новое в жизни, науке, технике. Сер. Науки о Земле. № 9.)

*Gregory K. J., Williams R. F.* Physical geography from the newspaper // Geography. 1981. N 66. P. 42–52.

*Pearson M. G.* Snowstorms in Scotland 1831 to 1861 // Weather. 1978. N 33. P. 393–399.

*Rodrigo F. S., Esteban-Parra M. J., Castro-Dier Y.* On the use of the Jesuit order private correspondence records in climate reconstructions: A case study from Castille (Spain) for 1634–1648 A.D. // Clim. Change. 1998. T. 40, N 3–4. P. 625–645.

## HISTORICAL-GEOGRAPHICAL MATERIALS AS A SOURCE OF INFORMATION ON PAST CLIMATIC AND HYDROLOGICAL ANOMALIES

S. B. Potakhin

*Petrozavodsk State University*

The study of anomalous (extreme) climate and hydrological processes is needed for identifying the frequency of their manifestations. Basic information about them is contained in the data collected and provided by the meteorological service. Other sources are, however, also very important. They are, for instance, agricultural reports, monastic and ecclesiastical chronicles, periodicals, literary works. The article contains information about these sources for the territory of the European North of Russia.

## СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ, ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ ИЗУЧЕНИЯ ТЕЛЕЦКОГО ОЗЕРА (РЕСПУБЛИКА АЛТАЙ)

**А. В. Пузанов, Д. М. Безматерных, Ю. И. Винокуров,  
В. В. Кириллов, А. Т. Зиновьев**

*Институт водных и экологических проблем СО РАН*

Охарактеризованы основные параметры экосистемы уникального маломинерализованного глубоководного горного Телецкого озера, расположенного на Алтае. Приведены основные экологические проблемы озера и его водосборного бассейна. Предложена программа научных исследований по оценке и прогнозу состояния экосистемы оз. Телецкого в связи с возросшим уровнем антропогенной нагрузки и изменениями климата. В результате выполнения программы будет сделан анализ современного состояния и перспектив развития водохозяйственного комплекса и экономики в целом бассейна озера.

Телецкое – озеро на северо-востоке Алтая. Административно расположено в Турочакском и Улаганском районах Республики Алтай. Один из центров туризма и отдыха на Алтае. Телецкое озеро – пресноводный, слабоминерализованный, богатый кислородом, холодноводный, проточный горный водоем со снеговым, дождевым и подземным питанием. Основные морфометрические характеристики озера: длина – 77,8 км, ширина – 0,6–5,2 км, площадь акватории – 223 км<sup>2</sup>, объем – 40 км<sup>3</sup>, наибольшая глубина – 325 м, средняя глубина – 174 м, площадь водосбора – 19 500 км<sup>2</sup> [Селегей, Селегей, 1978; Selegei et al., 2001]. В озеро впадает 70 рек и 150 временных водотоков, более 70 % всей поступающей воды дает р. Чулышман. Из озера вытекает одна река – Бия. Озеро Телецкое – самое глубокое в Западной Сибири, оно занимает 39-е место среди глубочайших озер мира. В бассейне озера расположены уникальные по своему биоразнообразию горные ландшафты, обитает большое количество «краснокнижных» видов растений и животных. Уникальными являются сиг Телецкий, сиг Правдина, обитающие только в Телецком озере.

Озеро и прилегающие территории – место традиционного природопользования коренных малочисленных народов, их хозяйственной деятельности и промысла. Восточный берег и часть акватории входят в состав Государственного природного биосферного заповедника «Алтайский», озеро включено ЮНЕСКО в 1998 г. в список объектов мирового наследия в составе комплексного объекта «Золотые горы Алтая».

ИВЭП СО РАН имеет большой опыт в выполнении комплексных исследований экосистемы Телецкого озера и его водосборного бассейна [Васильев и др., 1996; Черных, Ротанова, 2006; Безматерных и др., 2007;

Кириллов и др., 2007; Телецкое озеро, 2012; Кузнецова и др., 2014; Zinoviev et al., 2014]. Сотрудниками института получены оригинальные данные по гидрофизике и гидрохимии водоема, основным звеньям трофической цепи экосистемы озера, а именно: бактери-, пико-, фито-, протисто- и зоопланктону, фито- и зообентосу, фито- и зооперифитону, высшим водным растениям, рыбам, дана оценка содержания фотосинтетических пигментов в клетках водорослей, охарактеризованы донные отложения озера и диатомовые водоросли в них как индикаторы климатических изменений, получена оценка качества воды озера методами биоиндикации. Исследованы ландшафты и особенности природопользования на территории водосборного бассейна озера. По программам Роскосмоса ведется экологическое сопровождение космической деятельности в районах падения отделяемых частей ракет-носителей.

Накопленные данные натурных исследований послужили основой для моделирования гидрофизических (гидротермические 1DV и 3D модели) и гидрохимических (кислородный режим) процессов в Телецком озере – как водоема-аналога глубоких сибирских водохранилищ [Зиновьев и др., 2005, 2013; Зиновьев, Кошелев, 2010, 2016], а также для разработки информационно-вычислительного комплекса [Данчев, Пушистов, 2013; Пушистов, Викторов, 2016].

**Основные экологические проблемы.** За последние годы в связи с активным развитием туризма на Алтае резко возросла антропогенная нагрузка на Телецкое озеро, особенно в его северной части. Это сопровождается воздействием как на природные ландшафты его водосборного бассейна (строительство объектов туристической инфраструктуры, нарушение растительности вследствие вытаптывания и замусоривания, фактор беспокойства для животных), так и на саму экосистему озера (поступление неочищенных сточных вод от туристических объектов и домохозяйств, загрязнение нефтепродуктами от многократно возросшего по численности водного транспорта: моторных лодок, катеров и теплоходов). В связи с этим возникает вопрос об эвтрофировании отдельных участков озера. Также на водосборном бассейне озера располагаются одни из наиболее задействованных районов падения отделяемых частей ракет-носителей «Протон», запускаемых с космодрома «Байконур». В этих районах возможны шумовое, пирогенное, механическое (падение обломков) и химическое (пролив компонентов ракетных топлив, включая токсичный гептил) воздействия.

**Оценка современного состояния.** В соответствии с планом экспедиционных исследований на научно-исследовательских судах Федерального агентства научных организаций России на 2016 г. ИВЭП СО РАН выполнены междисциплинарные экспедиционные водно-экологические ис-

следования Телецкого озера с использованием научного флота. Основная цель экспедиции – сбор натурных данных о состоянии экосистемы озера, в том числе с целью математического описания гидрофизических, гидрохимических и гидробиологических процессов.

В 2016 г. было проведено пять экспедиционных выездов на Телецком озере. В ходе выполнения экспедиционных работ на Телецком озере с использованием современного измерительного оборудования получены подробные гидрофизические, гидрологические и гидрохимические характеристики водоема и уточняющая информация о таксономическом составе, структуре и функционировании водных экологических сообществ. По результатам выполненных гидрохимического и гидробиологического анализов дана оценка современного состояния экосистемы озера. Дана биогеохимическая оценка почв Прителецкой тайги как важного фактора формирования качества воды, охарактеризован макрокомпонентный (гидрокарбонаты, сульфаты, хлориды, кальций, магний и др.) и микроэлементный (железо, марганец, медь, цинк, свинец, кадмий) состав вод притоков озера. Установлено, что существенная часть металлов в поверхностных водах транспортируется в составе взвеси.

Как известно, экосистемы холодноводных олиготрофных озер наиболее уязвимы к внешнему воздействию. Пониженная температура воды, низкие концентрации биогенов и значительная гидродинамическая активность в поверхностном слое воды до 50 м в результате ветрового воздействия, даже при значительной (до 14 м по диску Секки) прозрачности воды, определяют низкий уровень развития биоценозов пелагиали в Телецком озере. Но на мелководных участках литорали с глубиной до 10 м, составляющих около 8 % акватории, происходит формирование основной части первичной продукции за счет развития до мезотрофного уровня литофильных альгоценозов и макрофитов в этой экотональной зоне [Kirillov et al., 1996, 1999; Кириллов и др., 2010]. Несмотря на возросшую рекреационную нагрузку Телецкое было и остается типичным олиготрофным и даже ультраолиготрофным водоемом с элементами мезотрофии на литорали, на участках впадения крупных притоков и расположения населенных пунктов. Невысокий уровень развития гидробионтов в подобных водоемах определяет низкий потенциал биологического самоочищения для поступающих с водосбора растворенных, взвешенных и слаборастворимых веществ, которые могут изменить интенсивность внутриводоемных процессов и качество воды.

Для сохранения уникального водного объекта – Телецкого озера – необходимо принять федеральный закон, который бы предусматривал введение системы ограничений и норм хозяйственной деятельности на его водосборном бассейне и акватории (установление экологических зон,

нормирование допустимых воздействий на экосистему, ландшафтное планирование, экологическая паспортизация, экологический мониторинг и контроль негативного воздействия), проведение регулярных лимноэкологических и ландшафтно-экологических научных исследований актуального состояния озера и его водосборного бассейна, а также возложение на один из федеральных органов исполнительной власти в области охраны отдельных видов природных ресурсов и охраны окружающей природной среды соответствующих функций в области охраны озера в целях осуществления единой государственной политики и решения задач по его охране.

**Перспективы изучения.** Для научного обеспечения мероприятий по охране озера ИВЭП СО РАН была разработана Комплексная научная программа «Научные исследования по оценке и прогнозу состояния уникальной экосистемы Телецкого озера в связи с возросшим уровнем антропогенной нагрузки и изменениями климата».

Целью программы являются научные исследования по оценке и прогнозу состояния уникальной экосистемы Телецкого озера в связи с возросшим уровнем антропогенной нагрузки и изменениями климата. Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи: провести анализ современного состояния и перспектив развития водохозяйственного комплекса бассейна озера; оценить современное состояние экосистем озера и его водосборного бассейна на основе ретроспективных и современных натурных данных; дать научно-обоснованную оценку возможных изменений экологического состояния озера в связи изменениями климата, увеличением антропогенной нагрузки и с планируемым социально-экономическим развитием в его бассейне; выявить возможные риски природопользования в бассейне озера в связи с возрастанием антропогенной нагрузки и изменениями климата; провести оценку экологически допустимого уровня воздействия на водосборный бассейн и экосистему озера с учетом требований водопользователей и водопотребителей; подготовить научно обоснованные предложения по сохранению и рациональному использованию природных ресурсов озера и его водосборного бассейна.

Выполнение программы предложено провести в два этапа. *Этап 1.* Провести анализ современного состояния и перспектив развития водохозяйственного комплекса и экономики в целом бассейна Телецкого озера. Оценка современного состояния экосистем озера и его водосборного бассейна. На этом этапе запланированы следующие виды работ: 1) анализ современного состояния и перспектив развития экономики и водохозяйственного комплекса в бассейне озера на период до 2025 г.; 2) анализ современного состояния и перспектив развития туристической отрасли в

бассейне озера, включающий существующие, строящиеся, проектируемые и возможные туристические объекты, и их характеристики; определение качественных и количественных характеристик воздействия этих объектов на озеро; 3) оценка современного состояния экосистем озера и его водосборного бассейна на основе ретроспективных и современных натуральных данных, а также полевых исследований и результатов моделирования. Оценка должна включать сравнительный анализ основных гидрофизических, гидрологических, гидрохимических, биогеохимических и гидробиологических характеристик экосистемы на различных участках озера за весь период их исследований. Оценку состояния ландшафтов водосборного бассейна озера, включая последствия использования части бассейна в качестве района падения отделяемых частей ракетносителей. Составление ландшафтно-экологической карты бассейна.

*Этап 2.* Научно обоснованная оценка возможных изменений экологического состояния Телецкого озера в связи с изменением климата, увеличением антропогенной нагрузки и планируемым социально-экономическим развитием в его бассейне. Данный этап включает следующие виды работ: 1) выявление возможных рисков воздействия эксплуатации и строительства новых хозяйственных и туристических объектов в бассейне озера; 2) оценку возможного влияния на основные компоненты экосистемы озера (включая качество воды) эксплуатации и строительства новых туристических объектов в бассейне озера, водного транспорта, функционирования и развития населенных пунктов Артыбаш, Иогач и Яйлю с их инфраструктурой; 3) оценку современного локального климата в бассейне озера, его изменения с начала метеорологических наблюдений в бассейне и тренды его динамики в будущем в связи с известными моделями изменений глобального климата; 4) оценку возможного влияния на основные компоненты экосистемы озера наблюдаемых и прогнозируемых изменений климата; 5) научно обоснованные предложения по сохранению и рациональному использованию природных ресурсов озера и его водосборного бассейна, содержащие предложения по совершенствованию системы его экологического мониторинга и разработке системы поддержки принятия решений, рекомендации по сохранению озера как объекта всемирного природного наследия ЮНЕСКО.

Разработанный проект программы был направлен в Министерство природных ресурсов и экологии России для включения в Федеральную целевую программу «Развитие водохозяйственного комплекса Российской Федерации в 2012–2020 годах», а также в приоритетный проект «Сохранение Телецкого озера», в связи с Годом экологии в России и во исполнение поручений Президента Российской Федерации.

Независимо от результатов прохождения и утверждения предложенной программы ИВЭП СО РАН в рамках своего государственного задания и при поддержке Федерального агентства научных организаций в рамках Сводного плана экспедиционных исследований на научно-исследовательских судах на 2017–2018 гг. планирует осуществить ежегодные исследования гидрофизических, гидрохимических, биогеохимических и гидробиологических характеристик Телецкого озера в период открытой воды, в том числе: продолжить наблюдения вертикального распределения температуры воды, содержания растворенного кислорода и других характеристик воды с целью уточнения динамики и механизмов формирования температурной и химической неоднородностей; изучить распределение макро- и микроэлементов, изотопного состава в пелагиали, литорали и приустьевой части основных притоков; выявить влияние биогеохимических и почвенно-геохимических условий водосборов на качество воды рек бассейна озера; изучить распределение фито- и зоопланктона в пелагиали и литорали, фито- и зооперифитона, зообентоса в литорали и устье основных притоков; оценить уровень развития биоценозов литорали и пелагиали по разнообразию и количеству гидробионтов; оценить качество воды в озере в целом и на отдельных участках.

Работа выполнена при поддержке СО РАН (проект П.2П/IX.134-1) и ФАНО (Сводный план экспедиционных исследований на научно-исследовательских судах).

### Литература

*Безматерных Д. М., Архипов И. А., Бурмистрова О. С. и др.* Биологические индикаторы как интегральные показатели состояния экосистемы Телецкого озера // Материалы V конф., посвящ. М. А. Лаврентьеву. Ч. 2. Новосибирск, 2007. С. 117–119.

*Васильев О. Ф., Кириллов В. В., Клеркс Я., Селегей В. В.* Комплексные исследования экосистемы Телецкого озера // Гидрологические и экологические процессы в водоемах и их водосборных бассейнах: Материалы междунар. симпоз. Новосибирск: ИГиЛ СО РАН, 1996. С. 120–122.

*Данчев В. Н., Пушистов П. Ю.* Количественная оценка прогностического потенциала информационно-вычислительного комплекса «Телецкое озеро» // Вестн. Бурятского гос. ун-та. 2013. № 9. С. 161–166.

*Зиновьев А. Т., Кошелев К. Б.* Температурный режим Телецкого озера. Моделирование и эксперимент // Мир науки, культуры, образования. 2010. № 6. С. 285–289.

*Зиновьев А. Т., Кошелев К. Б.* Моделирование гидроледотермических процессов в Телецком озере с использованием данных измерений температуры воды // Ледовые и термические процессы на водных объектах России: Науч. тр. V Всерос. конф. М.: РГАУ-МСХА, 2016. С. 176–181.

*Зиновьев А. Т., Кириллов В. В., Марусин К. В.* Кислородный режим Телецкого озера: моделирование и натурные данные // *Фундаментальные проблемы изучения и использования воды и водных ресурсов: Материалы II всерос. конф.* Иркутск: ИГ СО РАН, 2005. С. 416–418.

*Зиновьев А. Т., Марусин К. В., Дьяченко А. В. и др.* Комплексные гидрофизические исследования Телецкого озера // *Современные проблемы водохранилищ и их водосборов: Тр. междунар. науч.-практ. конф. Т. I.* Пермь: ПГУ, 2013. С. 197–202.

*Кириллов В. В., Безматерных Д. М., Егоркина Г. И. и др.* Лаборатория водной экологии. Исследование водных экосистем бассейна Оби и Обь-Иртышского междуречья // *Сб. ст., посвящ. 20-летн. юбилею ИВЭП СО РАН.* Барнаул: ИВЭП СО РАН, 2007. С. 90–112.

*Кириллов В. В., Зарубина Е. Ю., Ким Г. В. и др.* Значимость литоральных фитocenozов в первичной продукции Телецкого озера // *Фундаментальные проблемы воды и водных ресурсов: Материалы III всерос. конф.* Барнаул: АРТ, 2010. С. 113–116.

*Кузнецова О. В., Ельчинонова О. А., Пузанов А. В.* Роль почв в устойчивости ландшафтов бассейна Телецкого озера к загрязнению тяжелыми металлами // *География и природные ресурсы.* 2014. № 3. С. 48–52.

*Пушистов П. Ю., Викторов Е. В.* Прикладной системный анализ циркуляций и термического режима Телецкого озера. Барнаул: Пять плюс, 2016. 152 с.

*Селегей В. В., Селегей Т. С.* Телецкое озеро. Л.: Гидрометеиздат, 1978. 142 с.

*Телецкое озеро* / Отв. ред. Е. Ю. Митрофанова, В. В. Кириллов. Новосибирск: СО РАН, 2012. 28 с.

*Черных Д. В., Ротанова И. Н.* Современные ландшафты Прителецкого района (Горный Алтай) // *География и природные ресурсы.* 2006. № 1. С. 150–154.

*Kirillov V. V., Kim G. V., Mitrofanova E. J. et al.* Algal and Macrophyte Communities of the Deepest Lake in Western Siberia, Lake Teletskoye // *16<sup>th</sup> Annual Intern. Symposium on Lake, Reservoir and Watershed Management.* Minneapolis/St. Paul, 1996. P. 92.

*Kirillov V. V., Selegey V. V., Kim G. V. et al.* The outbreaks of life in the littoral algal cenoses of the deepest lake in Western Siberia, Lake Teletskoye // *8<sup>th</sup> Intern. Conf. on the Conservation and Management of Lakes.* Copenhagen, 1999. P. 119–120.

*Selegei V., Dehandschutter B., Klerks J., Vysotsky A.* Physical and geological environment of Lake Teletskoye // *Annales Sciences Geologiques.* Tervuren, Belgique, 2001. Vol. 105. P. 1–310.

*Zinoviev A. T., Vinokurov Yu. I., Mitrofanova E. Yu.* Integrated studies of lake Teletskoye for its conservation and sustainable use (Altai, Russia) // *Sustainable management of water resources and conservation of mountain lake ecosystems of Asian countries: Proc. Regional AASSA-IAP Workshop.* Yerevan: IGS NAS RA, 2014. P. 76–86.

## **CURRENT STATE, ENVIRONMENTAL PROBLEMS AND PROSPECTS FOR STUDYING LAKE TELETSKOYE (REPUBLIC OF ALTAI)**

**A. V. Puzanov, D. M. Bezmaternyh, Yu. I. Vinokurov,  
V. V. Kirillov, A. T. Zinoviev**

*Institute for Water and Environmental Problems, Siberian Branch of RAS*

The main parameters of the ecosystem of the unique low-mineralized deep-water mountain lake Teletskoye, located in the Altai, are described. The main environmental problems of the lake and its catchment are presented. The program for assessment and forecasting of the state of the lake ecosystem in relation to the increased human pressure and climate change is proposed. Upon the program implementation, the current state and the prospects for water management and overall economic development in the catchment will be analyzed.

## **КОСМИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ МИНЕРАЛИЗОВАННЫХ ОЗЕР НА ЮГЕ ЗАПАДНОЙ СИБИРИ**

**А. Н. Романов, И. В. Хвостов**

*Институт водных и экологических проблем СО РАН, г. Барнаул*

Приведены результаты исследований микроволнового излучения минерализованных озер на примере горько-соленого Кулундинского озера. Анализ пространственного распределения радиоярких температур подстилающей поверхности выполнен по данным спутника SMOS. В годовом ходе радиоярких температур выделяются четыре временных периода, связанные с понижением температуры ниже температуры замерзания соленой воды, образованием на поверхности воды снежно-ледового покрова, таянием, наполнением озера внешними водами, затоплением берегов, увеличением площади водного зеркала, опреснением.

Внутренние соленые озера широко распространены во всем мире, часто встречаются в полусухих и засушливых климатических зонах. Для их изучения используются микроволновые методы дистанционного зондирования, основанные на зависимостях излучательных характеристик воды от температуры и солености [Ballabrera-Poy et al., 2009; Subrahmanyam et al., 2011; McCulloch et al., 2012]. На основе дистанционных данных разрабатываются гидрологические прогнозы [Sorooshian, Imam, 2003], ведутся дистанционные исследования гидрологических процессов, включая оценку состояния поверхностных вод, использование воды в экосистемах, изменение облачности, водяного пара, осадков [Schaepman, 2007; Su et al., 2011].

Соленость воды оценивается по радиоярким температурам подстилающей поверхности, измеренным со спутника SMOS на частоте

1,41 ГГц с использованием разработанных методов интерпретации [Talone, Sabia, 2010; Wigneron et al., 2012]. Для учета неоднородностей подстилающей поверхности и выделения вкладов в излучение от водоемов, лесных массивов и почвенного покрова предложен алгоритм обработки космической информации, получаемой аппаратурой SMOS [Panciera et al., 2011].

### Методика исследований

В данной работе приведены результаты трехлетних исследований сезонных вариаций радиоярких температур горько-соленого Кулундинского озера, расположенного на юге Западной Сибири и входящего в число крупнейших озер России. Основным источником питания озера являются реки, подземные воды и снежный покров. В результате усыхания площадь водной поверхности озера в течение года уменьшается с 728 до 615 км<sup>2</sup>. По химическому составу вода из озера относится к сульфатно-натриевому типу с присутствием всех сульфатных солей. Прилегающая к озеру территория представляет собой степь, свободную от древесной растительности.

Радиояркая температура  $T_B$  подстилающей поверхности рассчитывалась по формуле

$$T_B = \sum_{j=1}^n T_B^j S_j / \sum_{j=1}^n S_j,$$

где  $T_B^j, S_j$  – радиояркие температуры отдельных участков и процентные доли их площадей. Радиояркая температура  $T_B^i$  отдельного участка площадью  $S_i$  рассчитывалась по формуле:

$$T_B^i = \left( T_B \cdot \sum_{j=1}^n S_j - \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n T_B^j S_j \right) / S_i. \quad (1)$$

Для определения  $T_B$  использовался продукт L1C SMOS [Gutierrez, Castro, 2010], полученный для угла зондирования 42,5° на горизонтальной поляризации. Данные L1C привязаны к дискретной геодезической сетке DGG ISEA 4H9 [Sahr et al., 2003]. Линейный размер ячейки составляет ~16 км.  $T_B$  ячейки, включающей оз. Кулундинское, формируется самим озером, площадью 35–44 % от площади зондируемого участка (в зависимости от времени года), и прилегающей степью (56–65 %).

$T_B$  озера рассчитывалась по формуле (1) с использованием радиоярких температур подстилающей поверхности на двух тестовых участках: степь и степь с озером. Температура подстилающей поверхности определялась по ежедневным данным инфракрасного радиометра MODIS (спутник Terra, продукт MOD11A1), полученным из открытой базы LP DAAC (<https://lpdaac.usgs.gov>). Для восстановления температур использовались алгоритмы MODIS [Wan, 1999], основанные на результатах пассивного сканирования восходящего излучения с длиной волны 10–12 мкм.

### Результаты исследований

На рис. 1 приведены вариации  $T_B^{1059037}$  ячейки DGG ID 1059037, формируемой только степью, и  $T_B^{1059554}$  ячейки DGG ID 1059554, формируемой Кулундинским озером (35 %) и прилегающими к нему степными территориями (65 %). К данным L1C предварительно применялся критерий селекции, исключающий данные с радиометрической погрешностью более 5 К (единичные случаи). Для примера представлены данные за период с 01.01.2013 (0 JD<sub>2013</sub>) по 30.11.2013 (334 JD<sub>2013</sub>).

При отрицательных температурах вариации  $T_B$  двух ячеек совпадают в пределах погрешности измерений ( $\Delta T_B \leq 5 \text{ K}$ ). Это связано с тем, что почва находится в мерзлом состоянии, а водная поверхность озера покрыта льдом. Диэлектрические характеристики льда и мерзлой почвы имеют близкие значения, соответственно, их радиояркие температуры зависят от разности температур.

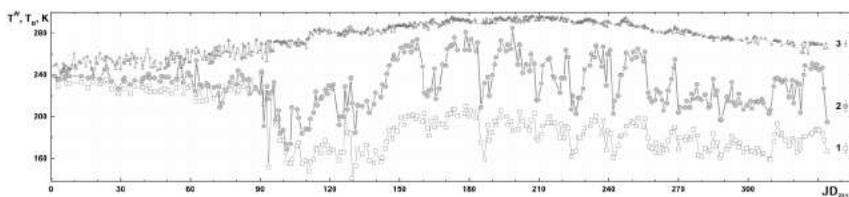


Рис. 1. Сезонные вариации радиоярких температур для ячеек DGG ID 1059554 (1) и DGG ID 1059037 (2), вариации температуры поверхности озера (3)

В период положительных температур вариации  $T_B^{1059037}$  связаны с увлажнением почвы за счет атмосферных осадков. Аналогичные вариации  $T_B^{1059554}$ , но с меньшей амплитудой, наблюдаемые для DGG

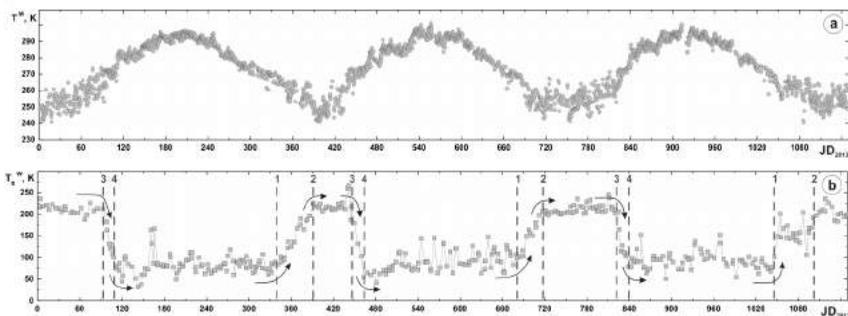
ID 1059554, связаны с увлажнением почвы, с опреснением воды в озере. Так как скин-слои соленой воды и сильно увлажненной засоленной почвы не превышают долей сантиметра, то вся территория может восприниматься как водная поверхность, площадь которой превосходит площадь озера.

Рассчитаем радиояркостную температуру минерализованного озера  $T_B^W$  по формуле (1), преобразованной к следующему виду:

$$T_B^W = (T_B^{1059554} - T_B^S S_S) / S_W,$$

где  $T_B^{1059554}$ ,  $T_B^S$ ,  $T_B^W$ ,  $S_S$ ,  $S_W$  – радиояркостные температуры геодезической ячейки DGG ID 1059554 и входящих в нее участков степи и воды, а также их площади, взятые в процентном отношении от общей площади зондируемого участка. В качестве  $T_B^S$  использовалась измеренная со спутника SMOS радиояркостная температура  $T_B^{1059037}$  геодезической ячейки DGG ID 1059037, соответствующей степному участку.

На рис. 2 приведены вычисленные значения  $T_B^W$  озера и динамика температуры водной поверхности оз. Кулундинское  $T^W$ , определенной по данным MODIS. Значения  $T^W$  осреднены по территории озера. Годовые графики температуры водной поверхности  $T^W$  (JD) (а) имеют характерный вид полусфер с минимумом в декабре-январе и максимумом в июле-августе. Положение минимальных и максимальных температур на временной шкале зависит от погодных и климатических условий данной местности и в разные годы может меняться.



**Рис. 2.** Радиояркостная температура водной поверхности Кулундинского озера, вычисленная путем исключения вклада (65 %) прилегающих степных территорий (b), и температура озера, определенная по данным MODIS (a)

Сезонные вариации  $T_B^W$  зависят от температуры, минерализации, наличия льда на поверхности воды, его толщины. На зависимости  $T_B^W(JD)$  (b) в течение года выделяются 4 временных периода с различным поведением радиоизлучательных характеристик минерализованного озера. Цифрами 1–4 обозначены точки, соответствующие качественным изменениям  $T_B^W$  подстилающей поверхности.

Сопоставление зависимостей  $T_B^W(JD)$  и  $T^W(JD)$  указывает на то, что изменения  $T_B^W$  в точке 1 соответствуют температуре начала замерзания соленой воды, образования льда. Точка 2 соответствует моменту, когда толщина льда превысит толщину скин-слоя. Дальнейшее увеличение толщины льда не ведет к заметному изменению  $T_B^W$ . Величина  $T_B^W$  зависит от температуры льда, наличия снежиц на его поверхности во время оттепелей. Точки 3 и 4 соответствуют началу и окончанию таяния соленого льда.

В соответствии с точками изломов 1–4 возникают следующие временные периоды, в которых поведение зависимостей  $T_B^W(JD)$  не изменяется:

1. Период от точки 1 до точки 2 начинается с момента понижения температуры соленой воды ниже температуры ее замерзания и заканчивается при толщине льда ( $d$ ), большей скин-слоя  $L$ . Величина  $L$  зависит от диэлектрических свойств подстилающей поверхности и длины волны  $\lambda$ , на которой ведется зондирование [Sharkov, 2003]. В этот период значения  $T_B^W$  возрастают от 80 до 240 К. Вариации  $T_B^W$  связаны с изменением минерализации воды при изменении ее температуры, выпадением отдельных солей в осадок, появлением на поверхности воды льда, увеличением его толщины  $d$  и, соответственно, возникновением интерференции при изменении соотношения ( $\lambda/d$ ). Скорость изменения  $\partial T_B^W / \partial JD$  характеризует скорость ледообразования.

2. Период от точки 2 до точки 3 характерен для отрицательных температур, при наличии на поверхности воды льда толщиной  $d > L$ . Вариации  $T_B^W$  изменяются от 200 до 250 К, зависят от температуры льда, наличия на его поверхности снежиц, возникающих во время оттепелей. Данные о наличии и толщине льда на поверхности озера могут быть использованы для уточнения климатических особенностей территории.

3. Период от точки 3 до точки 4 является переходным от отрицательных температур к положительным. Значения  $T_B^W$  понижаются с 200–250 до 90 К. Вариации  $T_B^W$  вызваны таянием льда, наполнением озера внешними водами, затоплением берегов, увеличением площади водного зеркала, опреснением. Скин-слой для воды на частоте 1,41 ГГц составляет доли сантиметра. Появление снежиц оказывает сильное экранирующее влияние на микроволновое излучение ледового покрова.

4. Период от точки 4 до точки 1 следующего временного цикла характерен для положительных температур. В этот период значения  $T_B^W$  изменяются от 90 до 150 К. Вариации  $T_B^W$  зависят от температуры  $T$  и минерализации  $Z$  воды, а также от уменьшения площади водной поверхности в результате усыхания озера.

### Заключение

Совместный анализ спутниковых данных SMOS, MODIS, наземных и лабораторных измерений позволил выявить сезонные изменения микроволнового излучения минерализованных озер. Выделено четыре временных интервала, в каждом из которых радиояркостьные характеристики водной поверхности зависят от скоростей образования или таяния льда на водной поверхности, температуры и минерализации воды, площади водного зеркала, появления участков оголенного дна, радиоизлучательные характеристики которого зависят от температуры, влажности и засоленности донных отложений.

Данные SMOS получены в рамках проекта ESA № 4747 «Remote mapping of Siberian saline soils». Экспедиционное обследование территории выполнено при финансовой поддержке грантов РФФИ № 13-05-98041, 15-05-05018, № 15-45-04060, 17-45-220460.

### Литература

*Ballabrera-Poy J., Mourre B., Garcia-Ladona E.* Linear and non-linear T–S models for the eastern North Atlantic from Argo data: Role of surface salinity observations // Deep Sea Research. Part I: Oceanographic Research Papers. 2009. Vol. 56, N 10. P. 1605–1614.

*Gutierrez A., Castro R.* SMOS L1 Processor L1c Data Processing Model. SO-DS-DME-L1PP-0009, N 2.7. 2010. URL: <http://www.smos.com.pt/downloads/release/documents/SO-DS-DME-L1PP-0009-DPM-L1c.pdf>.

*McCulloch M. E., Spurgeon P., Chuprin A.* Have mid-latitude ocean rain-lenses been seen by the SMOS satellite? // Ocean Modelling. 2012. Vol. 43–44. P. 108–111.

*Pancieria R., Walker J. P., Kalma J.* A proposed extension to the soil moisture and ocean salinity level 2 algorithm for mixed forest and moderate vegetation pixels // *Remote Sensing of Environment*. 2011. Vol. 115, N 12. P. 3343–3354.

*Sahr K., White D., Kimerling A. J.* Geodesic Discrete Global Grid Systems // *Cartography and Geographic Information Science*. 2003. N 30. P. 121–134.

*Schaepman M. E.* Spectrodirectional remote sensing: From pixels to processes // *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. 2007. Vol. 9, N 2. P. 204–223.

*Sharkov E. A.* Passive Microwave Remote Sensing of the Earth: physical foundations. Berlin, N.Y., London, Paris, Tokyo: Springer/PRAXIS, 2003. 612 p.

*Sorooshian S., Imam B.* Hydrologic sciences and water resources management issues in a changing world // *Developments in Water Science*. 2003. Vol. 50. P. 83–92.

*Su Z., Roebeling R. A., Schulz J.* Observation of Hydrological Processes Using Remote Sensing // *Treatise on Water Science*. 2011. Vol. 2. P. 351–399.

*Subrahmanyam B., Murty V. S. N., Heffner D. M.* Sea surface salinity variability in the tropical Indian Ocean // *Remote Sensing of Environment*. 2011. Vol. 115, N 3. P. 944–956.

*Talone M., Sabia R.* Sea surface salinity retrievals from HUT-2D L-band radiometric measurements // *Remote Sensing of Environment*. 2010. Vol. 114, N 8. P. 1756–1764.

*Wan Z.* MODIS Land-Surface Temperature Algorithm Theoretical Background Document (LST ATBD). Washington: National Aeronautics and Space U.S. Department of Commerce. 1999. URL: [http://modis.gsfc.nasa.gov/data/atbd/atbd\\_mod11.pdf](http://modis.gsfc.nasa.gov/data/atbd/atbd_mod11.pdf).

*Wigneron J.-P., Schwank M., Baeza E. L.* First evaluation of the simultaneous SMOS and ELBARA-II observations in the Mediterranean region // *Remote Sensing of Environment*. 2012. Vol. 124. P. 26–37.

## **SATELLITE MONITORING OF MINERALIZED LAKES IN THE SOUTH OF WEST SIBERIA**

**A. N. Romanov, I. V. Khvostov**

*Institute of Water and Environmental Problems, SB RAS, Barnaul*

The paper presents the results of three-year (2013–2015) investigations of seasonal variation of microwave radiation of a brackish Lake Kulundinskoye situated in the south of Western Siberia. The analysis of the spatial distribution of brightness and thermodynamic temperature of the underlying surface is made on the basis of SMOS (Soil Moisture and Ocean Salinity). Annual graphs of the brightness temperature show four periods with different emissivity of saline lakes induced by temperature drop below the freezing point for salt water, the snow-ice cover formation on the water surface, melting, filling of the lake with spring waters and the related coast flooding, increase in water surface area and desalination of the lake.

## НОВЫЙ АТЛАС ГЛАВНОГО ОЗЕРА СРЕДИ ВЕЛИКИХ ОЗЕР ЕВРОПЫ

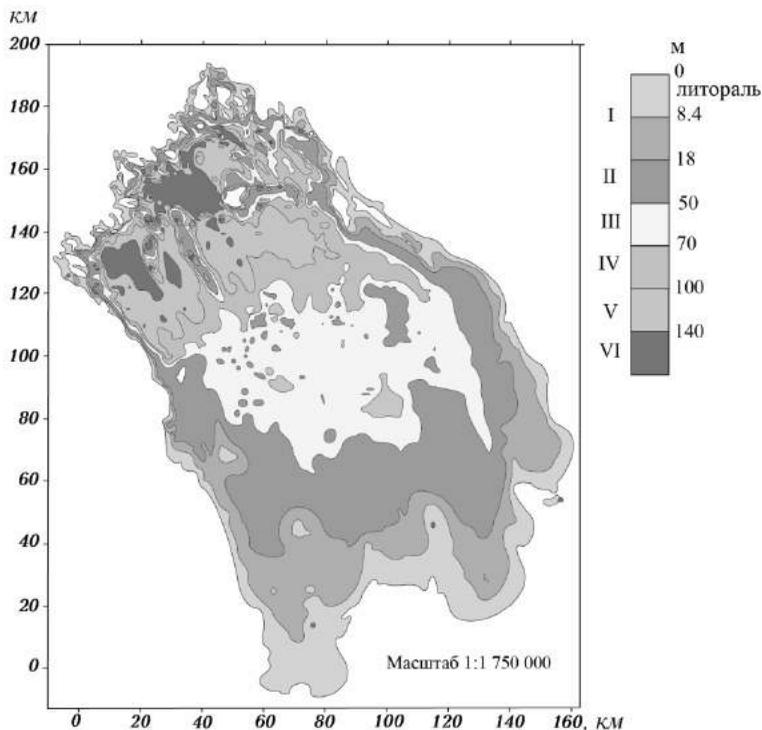
А. И. Сорокин, Н. А. Нестеров

*Институт наук о Земле РАН*

Приводится информация о выходе в свет нового картографического атласа Ладожского озера и краткие сведения о его содержании. Особое внимание уделено экологическим картам. Затронуты вопросы дальнейшего развития в этой сфере.

В 2015 г. издан новый атлас «Ладожское озеро и достопримечательности его побережья». Он является дальнейшим развитием вышедшего в 2002 г. и отмеченного Почетным дипломом Русского географического общества атласа «Ладожское озеро». Тематика нового атласа существенно расширена. Кроме того, дополнены, уточнены и приведены на уровень современности остальные разделы атласа. Атлас издан на средства гранта РГО, условия получения которого определили необходимость расширения прежней тематики за счет включения в неё достопримечательностей побережья, представляющих интерес для широкого круга читателей. Эта часть атласа содержит четыре раздела: «Особо охраняемые природные территории», «Геологические памятники и памятники природы», «Археологические памятники Приладожья» и «Достопримечательности и культурно-исторические памятники». Здесь представлены картосхемы расположения этих достопримечательностей, дано их краткое описание и фотоизображения. Основной объем приходится на главный объект нашего рассмотрения, а именно – на географические характеристики озерной среды, обусловленные как природными, так и антропогенными факторами. Прежде всего, здесь приводится общая характеристика Ладоги как крупнейшего озера Европы и главного по его значению озера России. В вводной части, наряду с историей проведения исследований озера и некоторыми статистическими данными, описываются роль и значение Дороги Жизни в героической обороне Ленинграда.

При составлении атласа были использованы результаты новейших лимнологических исследований, проведенных за последние 20 лет. По ряду направлений продолжительность наблюдений охватывает значительно больший период времени. Например, данные о ледовых условиях на озере собраны и представлены за 70 лет, а о колебаниях уровня озера – за 150 лет. В разделе «Общая характеристика озера» отмечается, что Ладожское озеро – крупнейшее озеро Европы и одно из самых северных среди великих озер мира. Оно занимает площадь  $18\,329\text{ км}^2$ , объем водной массы озера –  $848\text{ км}^3$ , длина береговой линии без учета длины береговой линии островов составляет 1570 км. Здесь же приводятся сведения о глубинах (рис. 1).

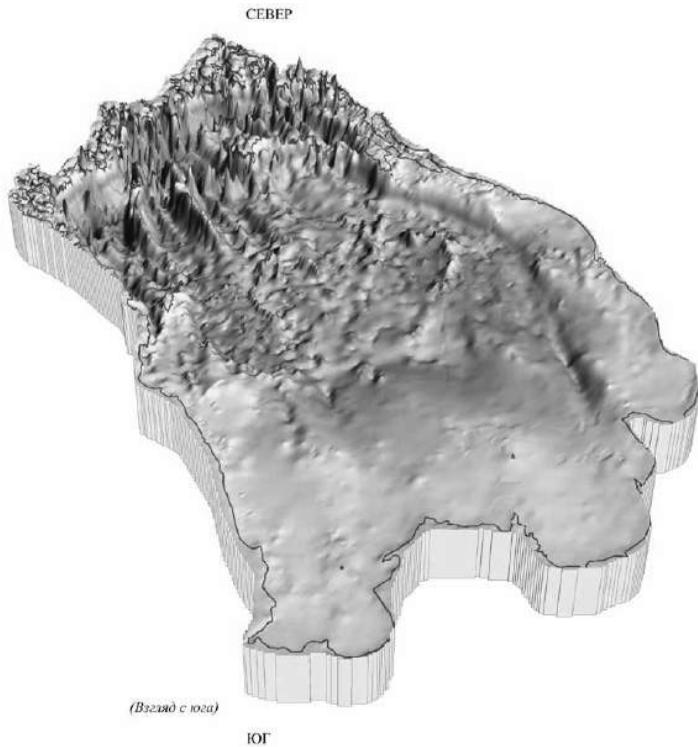


**Рис. 1. Лимнические зоны (районирование озера по глубинам)**

Климат в районе Ладожского озера описывается в разделе «Климатическая характеристика». Приводятся данные о температуре, влажности воздуха, ветрах, туманах, видимости, облачности, осадках и другие гидрометеорологические характеристики.

Крупными разделами атласа являются «Котловина озера» и «Водная масса», где приводятся сведения о геологии и геоморфологии озерной котловины, описывается гидрология и гидрофизика. В атласе представлено трехмерное изображение рельефа озера (рис. 2).

Строение и форма котловины Ладожского озера обуславливают неоднородность ряда гидрологических и гидрофизических характеристик его водной массы. В атласе приводятся данные о водном балансе, его изменчивости, распределении суммарного притока, стоке основных рек. Показаны многолетние колебания уровня озера, повторяемость течений по скорости и направлению и характеристики волнения, изображения ледяного покрова со спутника MODIS (рис. 3–5).



(Взгляд с юга)

Рис. 2. Трехмерное изображение рельефа Ладожского озера

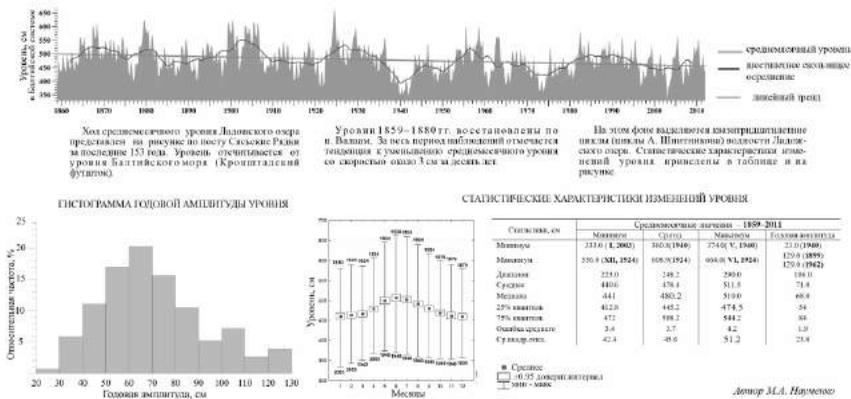
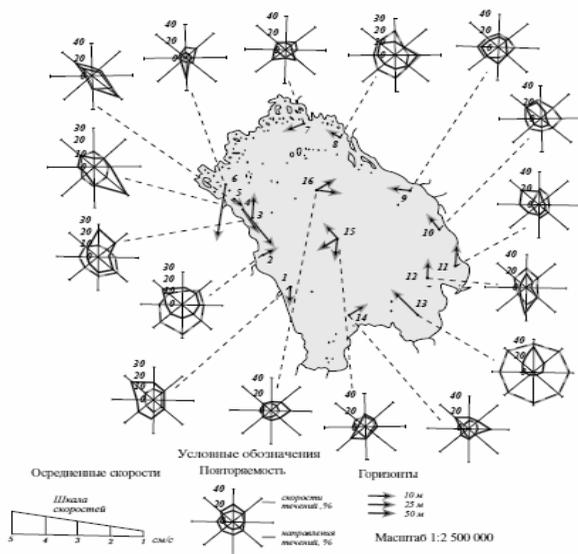
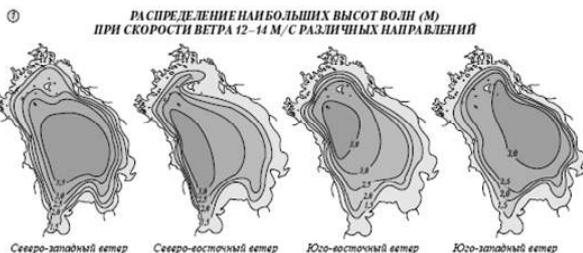


Рис. 3. Многолетние колебания уровня Ладожского озера

**ПОВТОРЯЕМОСТЬ ТЕЧЕНИЙ ПО СКОРОСТИ И НАПРАВЛЕНИЮ**

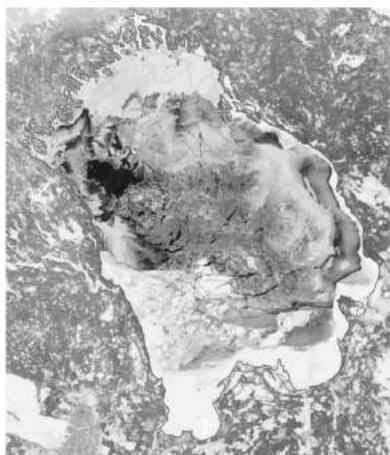


а)



б)

**Рис. 4. Повторяемость течений по скорости и направлению (а), характеристики волнения (б)**



10 февраля 2007 г.



24 марта 2007 г.

Масштаб 1:2 000 000

**Рис. 5. Изображения ледяного покрова со спутника MODIS**

Значимость изданного атласа определяется исключительной важностью для Санкт-Петербурга самого объекта картографирования, поскольку Ладожское озеро, представляющее собой терминальный водоём обширной озерно-речной экосистемы, является не только источником жизненно важных водных, пищевых, сырьевых, рекреационных и других ресурсов, но и высокочувствительным индикатором экологического состояния всей промышленно-сельскохозяйственной зоны северо-запада России и юго-восточной части Финляндии.

Подчеркивается, что состояние экосистемы озера является результатом сложного взаимодействия процессов, происходящих на водосборе и в водоеме под воздействием различных природных и антропогенных факторов. Учитывая, что вопросы экологии озера и водосбора играют определяющую роль в поддержании здоровья и достойной продолжительности жизни населения, этим вопросам в новом атласе уделено значительно больше внимания. Поэтому не случайно эти вопросы отражены как в основных разделах атласа – о котловине озера (в том числе в подразделе о донных осадках), водной массе, ее гидрохимии и гидробиологии, так и в специальных подразделах, таких как

- факторы возможного негативного воздействия на качество воды Ладожского озера и схема районов повышенного его загрязнения,
- качество поверхностных вод водосборного бассейна Ладожского озера,

- загрязняющие вещества в донных отложениях (хлорорганические соединения, нефтяные углеводороды, фенолы, распределение концентрации 3,4-бензопирена),

- загрязняющие вещества в воде Ладожского озера (синтетические поверхностно-активные вещества, хлорорганические соединения, нефтяные углеводороды, фенолы),

- районы озера с повышенным содержанием микроэлементов в моллюсках,

- зоны сапробности (загрязненности) по макробентосу в шхерных районах озера.

К теме повышения качества решения экологических проблем можно отнести раздел второй части атласа «Особо охраняемые природные территории», посвященный национальным паркам, заповедникам, заказникам и памятникам природы.

Необходимо отметить и такой важный элемент, связанный с дальнейшим развитием современных технологий, как появление осадков и взвесей, состоящих из мельчайших частиц, представляющих еще недостаточно изученную опасность для человека. Эти частицы, размеры которых составляют сотни или даже десятки нанометров, имеют повышенную возможность проникновения через кожу и другие ткани человеческого организма. В атласе впервые представлено распределение процентного содержания этих мельчайших частиц в диапазонах менее 1 микрона, менее 200 и 100 нанометров (с. 48). При этом отмечено, что зоны аккумуляции донных отложений со значительным содержанием частиц в диапазоне крупности менее 1 микрона сосредоточены преимущественно в центральном районе озера. Наиболее мелкие донные отложения сосредоточены в зонах повышенных глубин.

Атлас вышел в хорошем полиграфическом исполнении. Хотелось бы выразить признательность руководству РГО за решение оказать финансовую поддержку, без которой издание этого атласа в настоящее время было бы маловероятным.

Таким образом, можно считать, что выход атласа в свет в какой-то мере подводит итоги деятельности Института озераведения РАН за пройденный период времени. Впереди предстоит большая работа по дальнейшему совершенствованию картографического обеспечения экологического мониторинга озера и его водосборного бассейна. В частности, это включает в себя создание оценочных карт (по оценке существующих и вновь возникающих рисков), а также прогнозных и сценарных карт, позволяющих предвидеть пути возникновения и развития природных и антропогенных аварийных ситуаций и катастроф – с целью их предсказания и реального снижения тяжести наступающих последствий [Сорокин, 2012].

В качестве расширения района комплексного изучения и картографирования всей экосистемы Ладожского озера можно рассматривать подготовку и издание давно уже задуманной серии томов на русском и английском языках под названием Великие озера Северо-Запада России – эколого-географический атлас, включающий, в первую очередь, три главных озера – Ладогу, Онего и Ильмень. Учитывая большой объем информации, ее изменчивость и желательность удобного ее использования в научных и практических целях, подобный атлас можно считать частью комплексной геоинформационной системы.

Первым шагом по созданию необходимого документа, охватывающего описание всей озерно-речной экосистемы региона, было бы составление «Экологического атласа водосборного бассейна Великих европейских озер» (по аналогии с Великими американскими озерами), включающего помимо вышеупомянутых еще финское озеро Сайма. Отметим, что подобный атлас для бассейна озера Байкал уже издан в 2016 г. и получил высокую оценку научной общественности.

Для создания подобного научного труда имеется хороший задел – два уже опубликованных атласа Ладожского озера и первый выпущенный Институтом водных проблем Севера в 2010 г. атлас Онежского озера, а также результаты многолетних исследований на озере Ильмень. Объединение в одном атласе четырех великих озер существенно сокращает его объем, поскольку позволяет представить единый водосборный бассейн, включающий в себя такие частные водосборы, как Саймо-Вуоксинский, Онежско-Свирский и Ильмень-Волховский. Этот атлас в дальнейшем может рассматриваться как часть более крупного проекта – «Россия – страна озер», провозглашенного в капитальном справочнике «Озера Карелии», вышедшем в 2013 г., и «Экологическом атласе бассейна озера Байкал» [2015].

### Литература

*Ладожское озеро.* Атлас / Отв. ред. акад. РАН В. А. Румянцев. СПб.: ИНОЗ РАН, 444 ВКФ.МО РФ, 2002. 130 с.

*Ладожское озеро и достопримечательности его побережья.* Атлас / Отв. ред. акад. РАН В. А. Румянцев. СПб.: ИНОЗ РАН, «Нестор-История», 2015. 200 с.

*Озера Карелии.* Справочник / Под ред. чл.-корр. РАН Н. Н. Филатова, к. б. н. В. И. Кухарева. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2013. 464 с.

*Онежское озеро.* Атлас / Отв. ред. чл.-корр. РАН Н. Н. Филатов. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2010. 150 с.

*Сорокин А. И.* Антропогенные и природные нагрузки на озерные экосистемы, оценка ожидаемых рисков // Региональная экология. 2012. Т. 1–2, № 33. С. 21–24.

*Экологический атлас* бассейна озера Байкал. Иркутск: Изд-во Ин-та географии им. В. Б. Сочавы СО РАН, 2015. 145 с.

## THE NEW ATLAS OF LAKE LADOGA

A. I. Sorokin, N. A. Nesterov

*Institute of Earth Sciences, RAS*

Information on the new Lake Ladoga cartographic atlas and a brief description of its contents are presented. Particular attention is given to ecological maps. Potential further developments in this sphere are touched upon.

## АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ГИДРОЛОГИЧЕСКОГО РЕЖИМА И ИЗМЕНЕНИЯ ЭКОСИСТЕМ ОЗЕР ЕВРАЗИИ

Н. Н. Филатов

*Институт водных проблем Севера КарНЦ РАН*

Обсуждаются подходы, которые разрабатываются для совершенствования долгосрочного прогноза гидрологического режима, уровня и экосистем крупнейших озер Евразии. Рассматриваются пути решения проблем создания систем поддержки принятия управленческих решений для озер Евразии. Представлены разработки и результаты диагноза и прогноза экосистем Ладожского и Онежского озер, показана определяющая роль антропогенных факторов по сравнению с климатическими в изменении экосистем в масштабах десятилетий. Предлагаются инновационные подходы для исследования малоизученных озер Евразии.

Крупнейшие (великие) озера Евразии (Байкал, Каспий, Ладожское и Онежское) имеют стратегическое значение для развития экономики России и ряда других стран. Необходимость сохранения и восстановления ресурсов озер Байкал, Ладожского и Онежского обсуждалась на Совете Безопасности РФ 20.11.2013 г., на саммите Каспийских государств в ноябре 2014 г. отмечалась ключевая роль гидрометеорологического обеспечения исследований Каспия [Филатов и др., 2016]. В работе рассмотрен ряд актуальных проблем изучения крупных озер Евразии:

– совершенствование прогноза гидрологического режима и уровня воды, что необходимо для долгосрочного планирования экономической деятельности и сохранения экосистем озер;

– создание интегрированных систем управления водопользованием крупных озер Евразии, обеспечивающих информационную поддержку органов природоохраны;

– разработка методов и математических моделей для оценки критической нагрузки, ассимиляционного потенциала (АП) озер [Руховец, Филатов, 2014]. Модели такого класса для оценки АП, критической нагрузки

по биогенным и загрязняющим веществам (ЗВ) до сих пор не разработаны для Каспия и Байкала;

– разработка подходов для понимания причин и механизмов восстановления трофического статуса, экосистем озер. По определению, данному Т. И. Моисеенко (2011), «...„восстановление экосистем“... нельзя отождествлять с понятием возвращения к природному состоянию, скорее, оно может трактоваться как формирование устойчивости новой модификации экосистемы»;

– разработка и внедрение инновационных моделей конечных автоматов (cellular automata) для моделирования сложных систем озер, моделей оценки состояния и изменений трофического статуса, качества вод, водных и биологических ресурсов малоизученных или вовсе не изученных озер Евразии, которых здесь миллионы. Поскольку исследованиями охвачены менее 1 % озер, такие разработки должны быть основаны на базах данных и знаний с применением методов нечетких множеств, искусственного интеллекта, логико-лингвистических и когнитивных моделей [Меншуткин и др., 2010].

Очевидно, имеется множество других важных проблем современной лимнологии, объем которых можно представить по тому, что они обсуждались на заседаниях 38 секций 33-го конгресса SIL в Италии в 2016 г.

Задача создания интегрированных систем управления водопользованием крупных озер Евразии, таких как Байкал и Каспий, при современном состоянии знаний об объектах управления и особенно их реакции на внешние воздействия еще далека от практического решения [Зилов, 2006; Меншуткин, 2010]. Несмотря на многолетнюю историю исследований и попыток прогноза гидрологического режима, уровня воды и состояния экосистем этих крупнейших озер Евразии, до сих пор не получены надежные долгосрочные прогнозы не только их сложных экосистем, но даже уровня воды [Малинин, 1994; Панин и др., 2015; Выручалкина и др., 2016; Филатов и др., 2016].

Из-за ошибочных долгосрочных прогнозов уровня воды Каспия в 80-х гг. XX в. в СССР были приняты неверные практические решения по перераспределению водных ресурсов европейской части СССР [Фролов, 2003]. Основной причиной ошибочных прогнозов уровня воды было недостаточное понимание механизмов многолетних изменений гидрологического режима Каспия [Малинин, 1994; Водный баланс..., 2016]. Прогнозирование внутривековых колебаний уровня, элементов гидрологического режима Каспия необходимо выполнять в рамках совместного анализа уравнения водного баланса водоема и уравнения баланса влаги региона, включающего конкретный водоем и его бассейн, а также путем проведения экспериментов с помощью МОЦАО, разработанной в ИВМ

РАН с целью исследования влияния Атлантического океана на формирование климатической изменчивости озер европейской части России. Такой подход позволяет дать физически полное объяснение изменения уровня изменений крупных озер, включая Каспийское море, Ладожское, Онежское и Байкал, и, следовательно, сформировать его прогноз [Выручалкина и др., 2016].

Почти 60 лет обсуждаются многочисленные проблемы озера Байкал: влияние Байкальского ЦБК на ухудшение качества вод, эвтрофирование, массовая гибель уникальных пресноводных губок, вселенцы, нитчатая водоросль спиригира, регулирование уровня воды Иркутской ГЭС, низкое качество прогнозов сезонных и многолетних колебаний уровня воды озера, влияние изменений климата и др. Из-за относительно низкого уровня воды оз. Байкал в последние несколько лет, обусловленного изменениями климата, возникли сложные проблемы управления ресурсами озера, которые, несмотря на существующий Закон об охране озера Байкал, принятый в 1999 г., пришлось решать Правительству РФ путем принятия специального постановления об использовании водных ресурсов озера Байкал (от 04.02.2015 г. № 97). Нерешенные проблемы озера-водохранилища Байкал связаны с отсутствием системного эколого-социо-экономического подхода по исследованию водоема и водосбора; разрозненностью усилий разных научных организаций из-за недостаточной координации работ; несовершенством существующей системы мониторинга; отсутствием интегрированных систем управления водопользованием этого водоема, основанных на данных и знаниях и соответствующих математических моделях. В работе [Бычков, Никитин, 2015] отмечается, что «при соблюдении приоритета сохранения уникальной экосистемы Байкала должен использоваться комплексный подход... Объектом исследований и согласований должны стать не только вопросы регулирования уровня озера, но и эффективное функционирование и развитие единой природно-технической и социально-экономической системы». Таким образом, ключевым фактором в решении проблем озера является неиспользование системного подхода и соответствующих математических моделей озера – водосбор, наподобие тех, что были разработаны и использовались для диагноза и прогноза экосистем Ладожского и Онежского озер [Меншуткин и др., 2014; Rukhovets, Filatov, 2010]. Основа для разработки и внедрения таких моделей для оз. Байкал имеется: Е. А. Цветовой созданы трехмерные модели термогидродинамики, выполнены теоретические разработки для моделирования экосистемы озера [Зилов, 2006; Меншуткин, 2010], имеются необходимые данные и знания. Таким образом, необходима координация исследований и практических разработок на основе федеральной комплексной программы научных исследований (КПНИ),

которая позволит консолидировать усилия разных организаций, устранив ведомственную монополию на научно-техническую информацию о состоянии озерной экосистемы и водосбора и позволит создать интегрированную систему управления озеро – водосбор.

Как показала практика последних десятилетий, реализация такой программы будет успешной при координации работ Российской академией наук, а не ведомствами, как например, Росводресурсы Минприроды РФ или Росгидромет. Пример этому – положительный опыт решения подобных крупных проблем в области озераведения в СССР. Например, Программа «Большие озера СССР» или Севанская проблема реализовывались по постановлениям Государственного комитета СССР по науке и технике при СМ СССР. Для выполнения этих проектов были созданы соответствующие координационные советы, и по результатам исследований под руководством ИНОЗ АН СССР и организаций-соисполнителей проведены комплексные исследования, разработаны модели, на основе которых были приняты соответствующие практические решения.

Для решения проблем оценки критической нагрузки биогенными веществами, АП, диагноза и прогноза экосистем Ладожского и Онежского озер были разработаны и внедрены математические модели [Ладога, 2013; Меншуткин и др., 2014]. Среди важнейших проблем, которые предстоит решить, – понимание причин медленного восстановления экосистем крупных озер Евразии после резкого уменьшения биогенной нагрузки; оценка роли бактериопланктона и водных грибов в восстановлении экосистем озер, изучение роли вселенцев в изменении экосистем озер, совершенствование законодательства для охраны и рационального использования озер. Для этого на основе кооперации разных организаций (ИНОЗ, СПб ЭМИ РАН, ИВПС, ИВМ, ААНИИ, Росгидромета, а также Финляндии, Швейцарии и других стран) создаются математические модели, совершенствуется система мониторинга, выполняются исследования зимнего режима, разрабатываются системы поддержки принятия управленческих решений. Актуальная проблема – создать более совершенную, чем ранее для Ладоги и Онега, модель [Меншуткин и др., 2014] для прогноза ТГД и экосистем – решается в рамках гранта РФФИ на основе ранее разработанной чл.-корр. РАН Р. А. Ибраевым модели ТГД для Каспия. Важная задача при этом – воспроизвести климатическую циркуляцию вод озер путем построения периодического решения на значительное физическое время, кратное времени условного водообмена озера, т. е. не менее чем на 12–14 лет [Зверев и др., 2016]. Созданная и апробированная модель экосистемы озера будет апробирована на примере Ладожского и Онежского озер и в перспективе будет использоваться для диагноза и прогноза изменения экосистем оз. Байкал и других озер Евразии.

Будут созданы основы системы поддержки принятия управленческих решений на примере Онежского озера-водохранилища для дальнейшего ее использования для оз. Байкал – Иркутского водохранилища. Такая система позволит отказаться от принятия малообоснованных управленческих решений. На основе этих разработок будут созданы интегрированные системы управления водопользованием крупных озер Евразии, в том числе и для оз. Байкал, обеспечивающие информационную поддержку органов природоохраны.

Таких целей не ставит проектное предложение «Байкал: великое озеро – великой страны», разработанное в 2016 г. Аналитическим центром при правительстве РФ. Основная цель этой программы – «построение единой системы управления озером Байкал для экологоориентированного экономического развития Байкальской природной территории». Программа направлена в основном на экономическое развитие Байкальской природной территории. Сохранение и восстановление ресурсов, экосистем оз. Байкал в целях этой программы отсутствует. В качестве основных задач предложены следующие: комплексное развитие инфраструктуры прибрежной территории Байкала, переформатирование системы экологической защиты, формирование международного центра экологических исследований и деловых коммуникаций на Байкале, освоение туристического потенциала, формирование единого Байкальского туристического кластера. Среди приоритетов программы отмечается необходимость повышения уровня качества жизни населения, долгосрочная стратегия работы с иностранными инвесторами, поддержка туристических продуктов в формате «environment-friendly». Непонятно почему, это представлено на английском языке. Судя по формулировкам, это проектное предложение подготовлено чиновниками и имеет в качестве основной цели развитие бизнеса, что, конечно, важно, но не отвечает приоритетным задачам. Поэтому здесь уместно привести слова проф. Е. Зилова: «Принимая важные политические, экономические и законодательные решения без серьезного научного экспертного анализа последствий для Байкала, для этого уникального, древнейшего и чистейшего озера, можно натворить множество бед».

Среди важных лимнологических проблем Евразии – консолидация усилий разных стран для оценки ресурсного потенциала, качества вод разнообразных озер, которых на этом континенте несколько миллионов. В настоящее время изучено менее 1 % озер. Это означает, что до сих пор не оценены корректно водные, энергетические, биологические и другие ресурсы. Поэтому важно создать системы баз данных и знаний для озерных регионов Евразии, наподобие тех, что были разработаны для Карелии. С использованием этих БД и БЗ и применением инноваци-

онных подходов – методов нечетких множеств, искусственного интеллекта, логико-лингвистических и когнитивных моделей [Меншуткин, 2010] можно оценить качество вод, трофический статус, ресурсы малоизученных или вовсе не исследованных озер Евразии. Указанные модели создаются и используются, прежде всего, в тех случаях, когда уровень знаний о моделируемых процессах или явлениях не позволяет применять формальный аппарат или когда отношения между объектами в модели не имеют количественной оценки и регулируются только причинно-следственными связями. В качестве новых подходов при описании синергетики химико-физико-биологических процессов и явлений Ладожского и Онежского озер предложено применение метода клеточных автоматов для описания экосистем.

Работа выполнена по гранту РНФ № 14-17-00740-П.

### Литература

*Бычков И. В., Никитин В. М.* Регулирование уровня озера Байкал // География и природные ресурсы. 2015. № 3. С. 5–16.

*Водный баланс* и колебания уровня Каспийского моря. Моделирование и прогноз. М.: Триада лтд, 2016. 378 с.

*Выручалкина Т. Ю., Филатов Н. Н., Дианский Н. А., Гусев А. В.* О прогнозе многолетних изменений уровня воды крупных озер // Тр. КарНЦ РАН, сер. Лимнология. 2016. № 9. С. 3–16.

*Зверев И. С., Ушаков К. В., Шипунова Е. А. и др.* Моделирование гидротермодинамики Ладожского озера // Всерос. конф. по крупным внутренним водоемам (V Ладожский симпозиум). Сб. науч. тр. конф. СПб.: Лема, 2016. С. 41–49.

*Зилов Е. А.* Математическое моделирование экосистемы озера Байкал: вчера, сегодня, завтра // Изв. Самарского НЦ РАН. 2006. Т. 8. С. 58–64.

*Ладога* / Под. ред. В. А. Румянцева, С. А. Кондратьева. СПб.: Нестор-История, 2013. 468 с.

*Малинин В. Н.* Проблема прогноза уровня Каспийского моря. СПб.: РГГМУ, 1994. 159 с.

*Меншуткин В. В.* Искусство моделирования (экология, физиология, эволюция). Петрозаводск; СПб., 2010. 419 с.

*Меншуткин В. В., Руховец Л. А., Филатов Н. Н.* Моделирование экосистем пресноводных озер (обзор). 2. Модели экосистем пресноводных озер // Водные ресурсы. 2014. Т. 41, № 1. С. 24–38.

*Панин Г. Н., Выручалкина Т. Ю., Соломонова И. В.* Воздействие Северной Атлантики на гидрологический режим бассейна Каспийского моря // Водные ресурсы. 2015. Т. 42, № 4. С. 442–452.

*Руховец Л. А., Филатов Н. Н.* Озера и климат: модели и методы // Модели и методы в проблеме взаимодействия атмосферы и гидросферы / Под ред. В. П. Дымникова, В. Н. Лыкосова, Е. П. Гордова. Томск: ТГУ, 2014. С. 256–326.

Филатов Н. Н., Выручалкина Т. Ю., Дианский Н. А. и др. Внутривековая изменчивость уровня крупнейших озер России // Докл. Академии наук. 2016. Т. 467, № 5. С. 589–593.

Фролов А. В. Моделирование многолетних колебаний уровня Каспийского моря: теория и приложения. М.: Геос, 2003. 170 с.

Rukhovets L., Filatov N. (Eds.) Ladoga and Onego – Great European Lakes. Observation and Modeling. Springer Praxis. 2010. 302 p.

## **CURRENT PROBLEMS OF FORECASTING THE HYDROLOGICAL REGIME AND CHANGES IN ECOSYSTEMS OF EURASIAN LAKES**

**N. N. Filatov**

*Northern Water Problems Institute, KarRC RAS*

New approaches and models are being considered to improve the long-term forecast of the hydrological regime, water level and ecosystems of the largest lakes of Eurasia. The ways of resolving the problems involved in creation of the systems to support decision-making for lakes of Eurasia are discussed. The developments and outputs of the diagnosis and prognosis of Ladoga and Onego ecosystems are presented, and the decisive role of anthropogenic factors in comparison with climatic influence in ecosystem change is shown. New innovative approaches are proposed for insufficiently studied lakes of Eurasia.

## **ОСОБЕННОСТИ МНОГОЛЕТНИХ КОЛЕБАНИЙ УРОВНЯ ОЗЕРА БАЙКАЛ И СТОКА РЕКИ АНГАРЫ ДЛЯ РЕЖИМОВ ДО И ПОСЛЕ ЗАПОЛНЕНИЯ ИРКУТСКОГО ВОДОХРАНИЛИЩА**

**А. В. Фролов, Т. Ю. Выручалкина**

*Институт водных проблем РАН*

Изложены результаты моделирования многолетних колебаний уровня воды в оз. Байкал и стока р. Ангары. Получены аналитические зависимости между статистическими характеристиками уровня воды в Байкале и параметрами вынуждающих процессов. Показано, что параметр  $\lambda$ , определяющий инерционность колебаний уровня Байкала, уменьшился примерно в 3 раза после заполнения Иркутского водохранилища. Это способствовало увеличению дисперсии колебаний уровня воды в озере. Уменьшение дисперсии колебаний уровня воды в Байкале вызывает увеличение дисперсии стока Ангары и наоборот. Результаты имитационного моделирования показывают, что изъятия воды из притока к озеру негативно влияют на режим стока р. Ангары.

Колебания уровня воды в Байкале и сток р. Ангары естественно рассматривать как выходные процессы гидрологической системы, механизм которой описывается стохастическим уравнением водного баланса. Под

входными процессами этой системы понимаются суммарный речной приток (включая подземный) и эффективное испарение с поверхности Байкала (разность между слоями испарения и осадков на поверхности озера). Для исследования особенности режимов многолетних колебаний уровня Байкала и стока р. Ангары до и после заполнения Иркутского водохранилища нами использовалась соответствующая динамико-стохастическая модель указанной выше гидрологической системы [Фролов, Выручалкина, 2017].

Уравнение, описывающее колебания уровня  $h_t$  проточного озера, имеет вид

$$h_t = h_{t-1} + q_t - v_t - e_t, \quad (1)$$

где  $t$ , годы – время;  $q_t$  – слой суммарного притока в озеро;  $q_t = Q_t/F_t$ ,  $F_t$  – площадь поверхности озера;  $v_t = V_t/F_t$  – слой стока из озера, функционально зависящий от уровня  $h_t$ ;  $Q_t$  и  $V_t$  – объемы притока в озеро и стока из него;  $e_t$  – слой эффективного испарения.

Приток и эффективное испарение моделируются процессами авторегрессии первого порядка (марковскими последовательностями)

$$q_t = \rho_q q_{t-1} + n_t^q, \quad (2)$$

$$e_t = \rho_e e_{t-1} + n_t^e, \quad (3)$$

где  $\rho_q$  и  $\rho_e$  – параметры авторегрессии,  $n_t^q$  и  $n_t^e$  – белые шумы с известными средними значениями и дисперсиями  $\sigma_{n_t^q}^2$  и  $\sigma_{n_t^e}^2$ . В

[Фролов, 1985] было показано, что зависимости стока воды из многих проточных озер от их уровня близки к линейным. Поэтому предполагается, что  $v(h_t)$  может быть аппроксимирована линейной зависимостью

$$v(h_t) = \lambda h_t, \quad (4)$$

$h$  считают от максимальной глубины в истоке реки, вытекающей из озера,  $\lambda$  – коэффициент, показывающий изменение стока при единичном изменении уровня воды в озере.

Зависимость площади зеркала озера от уровня воды в озере для реального диапазона колебаний уровня часто принимается в виде

$$F = a + bh, \quad (5)$$

где  $a$  и  $b$  – числовые коэффициенты. Поскольку Байкал имеет крутые берега [Шерстянкин и др., 2006], т. е.  $bh/a \approx 0,001$ , то для реального диапазона колебаний уровня  $F = \text{const} \cong 31\,500 \text{ км}^2$ .

Модель (1)–(3) представляет собой систему с двумя входными процессами – притоком и эффективным испарением. Для этой дискретной модели мы получили выражения для статистических характеристик колебаний уровня проточного озера как функций

параметров взаимно коррелированных притока и эффективного испарения. Ковариационная функция уровня  $R^h(\tau)$  имеет вид:

$$R^h(\tau) = \frac{\beta}{1-\beta^2} \{ \mathcal{A} + \mathcal{B} - r_{q\sigma} \sigma_q \sigma_\sigma \{ \mathcal{C} + \mathcal{D} \} \}, \quad (6)$$

где

$$\beta = 1/(1 + \lambda), \quad \mathcal{A} = \frac{\sigma_q^2 [(1-\beta^2) \rho_q^{|\tau|+2} - (1-\rho_q^2) \beta^{|\tau|+2}]}{(\rho_q - \beta)(1-\rho_q \beta)},$$

$$\mathcal{B} = \frac{\sigma_\sigma^2 [(1-\beta^2) \rho_\sigma^{|\tau|+2} - (1-\rho_\sigma^2) \beta^{|\tau|+2}]}{(\rho_\sigma - \beta)(1-\rho_\sigma \beta)},$$

$$\mathcal{C} = \frac{(1-\beta^2) \rho_q^{|\tau|+2} - (1-\rho_q^2) \beta^{|\tau|+2}}{(1-\rho_q^2)(\rho_q - \beta)(1-\rho_q \beta)}, \quad \mathcal{D} = \frac{(1-\beta^2) \rho_\sigma^{|\tau|+2} - (1-\rho_\sigma^2) \beta^{|\tau|+2}}{(1-\rho_\sigma^2)(\rho_\sigma - \beta)(1-\rho_\sigma \beta)}.$$

Из (6), полагая  $\tau = 0$ , получаем дисперсию уровня  $\sigma_h^2$ ,

$$\sigma_h^2 = \frac{\beta}{1-\beta^2} (\mathcal{M} + \mathcal{N} - r_{q\sigma} \sigma_q \sigma_\sigma \mathcal{O}), \quad (7)$$

где

$$\mathcal{M} = \frac{\sigma_q^2 (1 + \rho_q \beta)}{(1 - \rho_q \beta)}, \quad \mathcal{N} = \frac{\sigma_\sigma^2 (1 + \rho_\sigma \beta)}{(1 - \rho_\sigma \beta)}, \quad \mathcal{O} = \frac{(1 + \rho_q \beta) \rho_q}{(1 - \rho_q^2)(1 - \rho_q \beta)} + \frac{(1 + \rho_\sigma \beta) \rho_\sigma}{(1 - \rho_\sigma^2)(1 - \rho_\sigma \beta)}.$$

Аналогичные результаты для непрерывной модели колебаний уровня в бессточном озере представлены в [Музылев и др., 1982]. При  $r_{q\sigma} = 0$  выражение (6) совпадает с точностью до обозначений с ковариационной функцией уровня бессточного озера, по дискретной модели, предложенной в [Привальный, 1985]. Дисперсия стока воды из озера с учетом линейной зависимости (4) дается формулой:

$$\sigma_v^2 = \lambda^2 \sigma_h^2. \quad (8)$$

Нормированная автокорреляционная функция уровня воды в озере дается выражением:

$$r_h(\tau) = \frac{R^h(\tau)}{\sigma_h^2}, \quad (9)$$

где  $R^h(\tau)$  и  $\sigma_h^2$  задаются формулами (6) и (7) соответственно. В силу (4) автокорреляционная функция стока из озера в точности совпадает с (9). Взаимная ковариационная функция для уровня воды в озере и притока  $R_{hq}(\tau)$  имеет вид:

$$R_{hq}(\tau) = \begin{cases} \beta \frac{\rho_q^\tau}{1-\rho_q \beta} \left[ \frac{\sigma_q^2}{1-\rho_q^2} - \frac{r_{q\sigma} \sigma_q \sigma_\sigma}{1-\rho_q \rho_\sigma} \right], & \tau \geq 0 \\ \frac{\beta \sigma_q}{(1-\rho_q \beta)} (\mathcal{P} - \mathcal{Q}), & \tau < 0 \end{cases}, \quad (10)$$

где

$$P = \frac{\sigma_q}{(\beta - \rho_q)} \frac{(1 - \rho_q \beta)^{\beta^2 - \tau} - (1 - \rho_q \beta) \rho_q^{\beta^2 - \tau}}{(1 - \rho_q^2)},$$

$$Q = r_{qe} \sigma_e \frac{(1 - \rho_q \rho_e)^{\beta^2 - \tau} - (1 - \rho_q \beta) \rho_q^{\beta^2 - \tau}}{(1 - \rho_q \rho_e)}.$$

Из (7) и (10) получаем коэффициент взаимной корреляции между уровнем воды и притоком  $r_{hq}$ ,

$$r_{hq} = \langle h_t q_t \rangle / (\sigma_h \sigma_q) = \frac{\beta}{1 - \rho_q \beta} [\sigma_q - r_{qe} \sigma_e] / \sigma_h, \quad (11)$$

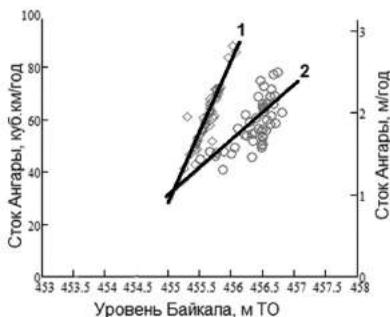
где угловые скобки здесь и далее означают статистическое усреднение. Аналогичным образом находится коэффициент взаимной корреляции между испарением и притоком:

$$r_{he} = \langle h_t e_t \rangle / (\sigma_h \sigma_e) = \frac{\beta}{1 - \rho_q \beta} [-\sigma_e + r_{qe} \sigma_q] / \sigma_h. \quad (12)$$

Аналитические зависимости (7)–(12) применимы для решения двух задач – прямой и обратной. Под прямой задачей понимается нахождение по известным характеристикам входных процессов соответствующих характеристик выходных процессов. Обратная задача – нахождение по известным характеристикам выходных процессов статистических характеристик входных процессов [Фролов, 2014]. Нами была решена обратная задача для нахождения оценок дисперсии и коэффициента автокорреляции эффективного испарения, а также для коэффициента взаимной корреляции между испарением и речным притоком. В результате численного решения нелинейной системы, состоящей из уравнений (7), (9) при  $\tau = 1$  и (11), были получены следующие статистические характеристики эффективного испарения (для периода 1901–1955 гг.): дисперсия  $\sigma_e^2 = 0,02 \text{ м}^2/\text{год}^2$ , коэффициент автокорреляции  $\rho_e = 0,12$ , коэффициент взаимной корреляции между притоком и эффективным испарением  $r_{qe} = -0,11$ .

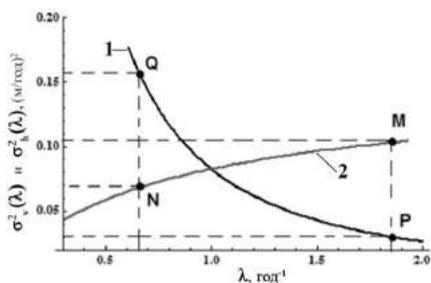
Уравнения зависимости слоя стока Ангары от уровня воды в озере, отсчитываемого от отметки 453,53 м, принимаемой за нулевую, имеют вид: для периода 1901–1958 гг.  $v(h) = 1,87h$ , для периода 1959–1997 г.  $v(h) = 0,67h$ , размерность стока  $v$  – м/год, уровня  $h$  – м, коэффициентов при  $h$  – год<sup>-1</sup> (рис. 1).

В соответствии с (7) и (8) дисперсии уровня воды в Байкале  $\sigma_h^2$  и стока р. Ангары  $\sigma_v^2$  как функции  $\lambda$  находятся в противофазе (рис. 2).



**Рис. 1. Зависимости стока Ангары от уровня воды в Байкале:**

1 – до заполнения Иркутского водохранилища, 2 – после заполнения



**Рис. 2. Зависимости дисперсий уровня воды в Байкале  $\sigma_v^2$  (1) и стока р. Ангары  $\sigma_s^2$  (2) от параметра  $\lambda$**

При прочих равных условиях,  $\sigma_s^2$  с увеличением  $\lambda$  уменьшается,  $\sigma_v^2$ , наоборот, возрастает. Справедливо утверждение – управление, направленное на минимизацию колебаний уровня воды в Байкале, с неизбежностью приведет к увеличению  $\sigma_s^2$ , увеличивая тем самым вероятность неблагоприятных экстремальных величин стока. Это обстоятельство должно учитываться при попытках управления уровнем Байкала [Синюкович, 2016]. Точки *P* и *M* на рис. 2 соответствуют режиму колебаний уровня Байкала и стока Ангары до 1958 г. при  $\lambda = 1,87 \text{ год}^{-1}$ . После 1959 г. при  $\lambda = 0,67 \text{ год}^{-1}$  соответствуют точки *N* и *Q* на графике. Для периодов до и после заполнения Иркутского водохранилища  $\sigma_s^2$  была примерно одинакова – 0,14 и 0,12  $\text{м}^2/\text{год}^2$ , соответственно. Уменьшение коэффициента автокорреляции притока почти до нуля может быть связано с изменениями основных энергонесущих колебаний [Филатов, 1998; Филатов и др., 2016].

Реализация планов строительства ГЭС в монгольской части бассейна р. Селенги с неизбежностью приведет к уменьшению стока этой реки и, соответственно, к уменьшению притока в Байкал.

Для оценки обеспеченностей отметок уровня воды в Байкале и стока Ангары при различных вариантах изъятий из притока к озеру был применен метод имитационного моделирования. Приток в Байкал и эффективное испарение с поверхности озера задавались процессами (2) и (3). Для получения искусственных рядов притока и эффективного испарения применялся алгоритм, изложенный в [Фролов и др., 2014]. Длина рядов  $N = 10\,000$ , что обеспечивало достаточную точность моделирования. Зависимость стока Ангары от уровня воды в Байкале принималась в виде

$$q(h) = 0.67h + n(t), \quad (13)$$

где  $n(t)$  – белый гауссов шум с нулевым средним и  $\sigma_n^2 = 0,04 \text{ м}^2/\text{год}^2$ , учитывающий отклонение реального стока Ангары от вычисленного по линейной аппроксимации.

В результате моделирования показано, что изъятия из притока наиболее сильно сказываются на экстремально малых величинах стока р. Ангары (табл.). Именно этот эффект относительно небольших изъятий из притока к Байкалу может существенно помешать устойчивому функционированию ангарских ГЭС, промышленно-коммунальному водоснабжению и обеспечению требований судоходства по Ангаре, негативно сказаться на экологических характеристиках Байкала.

### Квантили распределений уровня воды Байкала и стока Ангары

Изъятия из притока, км <sup>3</sup> /год	Обеспеченность, %				
	99	75	50	25	1
0	<u>1,74</u>	<u>2,18</u>	<u>2,43</u>	<u>2,66</u>	<u>3,36</u>
	1,10	1,46	1,64	1,80	2,28
0,5	<u>1,72</u>	<u>2,16</u>	<u>2,40</u>	<u>2,63</u>	<u>3,35</u>
	0,93	1,40	1,60	1,82	2,39
1	<u>1,68</u>	<u>2,14</u>	<u>2,38</u>	<u>2,61</u>	<u>3,34</u>
	0,92	1,38	1,58	1,79	2,36
3	<u>1,59</u>	<u>2,05</u>	<u>2,28</u>	<u>2,52</u>	<u>3,24</u>
	0,86	1,31	1,53	1,75	2,20

*Примечание.* В числителе – уровень, м; в знаменателе – слой стока Ангары, м/год.

**Выводы.** На основе дискретной динамико-стохастической модели были получены аналитические зависимости между статистическими характеристиками притока и эффективного испарения, с одной стороны, и статистическими характеристиками колебаний уровня воды Байкала и стока Ангары – с другой. Эти зависимости были использованы для исследования особенностей режима многолетних колебаний уровня Байкала и стока р. Ангары для периодов до и после создания Иркутского водохранилища.

Установлена зависимость дисперсий колебаний уровня воды Байкала и стока р. Ангары от параметра  $\lambda$ . Чем меньше  $\lambda$ , тем больше дисперсия уровня Байкала и тем меньше дисперсия стока р. Ангары. Минимизация дисперсии колебаний уровня воды озера с неизбежностью ведет к увеличению дисперсии колебаний стока р. Ангары.

В результате имитационного моделирования показана значительная чувствительность стока Ангары к изъятиям. Даже при варианте с минимальными изъятиями 0,5 км<sup>3</sup>/год (0,9 % от среднего притока в Байкал) сток Ангары 99%-й обеспеченности уменьшается на ~15 % по сравнению с отсутствием изъятий.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 15-05-06160).

### Литература

Музылев С. В., Привальский В. Е., Раткович Д. Я. Стохастические модели в инженерной гидрологии. М.: Наука, 1982. 184 с.

Привальский В. Е. Климатическая изменчивость. Стохастические модели, предсказуемость, спектры. М.: Наука, 1985. 183 с.

Синюкович В. Н. Проблемы регулирования уровня озера Байкал в условиях аномальной водности // Водное хозяйство России. 2016. № 1. С. 42–51.

Филатов Н. Н. Колебания уровня крупных озер Европы и изменчивость климата // Докл. РАН. 1998. Т. 3590, № 2. С. 255–257.

Филатов Н. Н., Выручалкина Т. Ю., Дианский Н. А. и др. Внутривековая изменчивость уровня крупнейших озер России // Докл. РАН. 2016. Т. 467, № 5. С. 589–593.

Фролов А. В. Динамико-стохастические модели многолетних колебаний уровня проточных озер. М.: Наука, 1985. 103 с.

Фролов А. В. Оценка статистических характеристик многолетних колебаний испарения с крупных речных водосборов // Докл. РАН. 2014. Т. 458, № 3. С. 345–348.

Фролов А. В., Выручалкина Т. Ю. Динамико-стохастическое моделирование многолетних колебаний уровня озера Байкал и стока реки Ангары // Водные ресурсы. 2017. Т. 44, № 3 (в печати).

Фролов А. В., Выручалкина Т. Ю., Соломонова И. В. Моделирование негавусова векторного процесса в приложении к гидрологии // Водные ресурсы. 2014. Т. 41, № 6. С. 559–564.

Шерстянкин П. П., Алексеев С. П., Абрамов А. М. и др. Батиметрическая электронная карта озера Байкал // Докл. РАН. 2006. Т. 408, № 1. С. 102–107.

## PECULIARITIES OF LONG-TERM FLUCTUATIONS OF LAKE BAIKAL WATER LEVELS AND THE ANGARA RIVER RUNOFF BEFORE AND AFTER FILLING OF THE IRKUTSKOYE RESERVOIR

A. V. Frolov, T. Yu. Vyruchalkina

*Water Problems Institute of RAS*

The features of long-term fluctuations in Lake Baikal water levels and the Angara river runoff were studied. Analytical relations between statistical characteristics of the Baikal water level fluctuations and parameters of their driving forces were obtained. It is shown that the parameter  $\lambda$  determining the inertia of Baikal water level fluctuations has decreased  $\approx 3$ -fold after filling of the Irkutskoye reservoir. As a consequence, the variance of the Baikal level fluctuations increased. Decrease of the Baikal level variance causes an increase in the variance of the Angara river runoff and vice versa. The results of numerical simulation of the Baikal level fluctuations show that water withdrawals from the inflows into Baikal negatively affect the Angara river runoff regime.

## ТРАНСГРАНИЧНЫЕ ВОДНЫЕ ОБЪЕКТЫ: ПРОБЛЕМЫ И ПУТИ РЕШЕНИЯ

Г. Т. Фрумин, Ю. А. Фетисова

*Российский государственный гидрометеорологический университет*

Рассмотрены три актуальные проблемы трансграничных водных объектов: проблема оценки качества воды, проблема оценки трофического статуса озер, проблема квотирования биогенных нагрузок на трансграничные водные объекты – и возможные пути их решения.

Российская Федерация граничит с 14 государствами Европы и Азии. Государственную границу пересекает свыше 800 различных водных объектов. 70 больших и средних рек относятся к трансграничным, причем большинство из них являются жизненно важными как для России, так и для граничащих с ней государств. За последние полвека проблемы, связанные с трансграничными водными ресурсами, стали причиной более 500 международных конфликтов и около 40 взаимных претензий на грани конфликтов с применением насилия.

В 1992 г. Россия присоединилась к Конвенции по охране и использованию трансграничных водотоков и международных озер, подписанной в том же году странами ЕС в Хельсинки. Россия имеет соглашения, регулирующие использование трансграничных водных ресурсов с Азербайджаном, Латвией, Литвой, КНР, Казахстаном, Эстонией и Финляндией.

В процессе совместного использования трансграничных водных объектов между государствами возникает множество проблем и спорных вопросов, в особенности в оценке объемов и последствий оказываемого антропогенного воздействия [Рысбеков, 2009; Фрумин, Тимофеева, 2014].

Необходимость совместного использования трансграничных вод практически всегда приводит к возникновению определенной напряженности в обществах, которые они объединяют. Это обусловлено разнообразными факторами, которые, помимо отношений между странами, включают вопросы национальной безопасности, развития экономического потенциала, открытости и экологической стабильности. Управление трансграничными водными ресурсами (ТВР) может стать как объединяющим моментом, так и причиной конфликта; направленность во многом обусловлена политической волей.

Международные конвенции и соглашения, регламентирующие взаимоотношения государств при совместном пользовании водными объектами, охватывают широкий круг проблем, среди которых до настоящего времени весьма актуальными являются проблема оценки качества воды,

проблема оценки трофического статуса трансграничных водоемов, проблема квотирования биогенной нагрузки на трансграничные водные объекты.

**Проблема оценки качества воды.** Правовую основу использования водных ресурсов в Европе обеспечивает Рамочная директива по воде (РДВ) (2000/60/ЕС), принятая ЕС в 2000 г. Этот документ регламентирует подходы к политике охраны, использования и управления водными ресурсами и призван к 2015 г. гармонизировать и унифицировать подходы стран ЕС к управлению водными ресурсами и их охране [Семенченко, Разлуцкий, 2011]. Природоохранной целью РДВ является достижение «хорошего статуса» всех грунтовых и поверхностных вод. РДВ содержит ряд общих требований по экологической защите поверхностных вод («хороший экологический статус») и общие минимальные требования по химическим параметрам («хороший химический статус»). К примеру, в Эстонии используют следующие показатели: биологические, физико-химические и гидроморфологические. Общая оценка состояния водного объекта дается на основании самого худшего показателя. В Российской Федерации с 2002 г. степень загрязненности вод оценивается гидрохимическими показателями с использованием «удельного комбинаторного индекса загрязненности воды» (УКИЗВ) (РД 52.24.643 – 2002 «Метод комплексной оценки степени загрязненности поверхностных вод по гидрохимическим показателям»). Осложняет сотрудничество в сфере охраны трансграничных водных объектов отсутствие единых критериев оценки степени их загрязненности.

Попытка оценить качество речных вод на основе химических критериев была сделана в Баварской службе использования вод. Этот метод основан на исследованиях, проведенных ранее в США и Шотландии [Кимстач, 1993]. Метод включает измерение ряда химических параметров в пробах воды с последующим представлением полученной комбинации результатов в виде одного числа (химического индекса), который представляет собой обобщенное качество воды в данной пробе.

Химический индекс является мультипликативным и выражается в следующей форме:

$$CJ = \prod_{i=1}^n q_i^{w_i} = q_1^{w_1} \cdot q_2^{w_2} \dots q_n^{w_n}$$

где  $CJ$  – химический индекс, безразмерная величина непрерывной шкалы от 0 до 100 (здесь 0 – худшее и 100 – лучшее качество воды);  $n$  – число параметров;  $q_i$  – подиндекс для  $i$ -го параметра (безразмерная величина между 0 и 100, являющаяся функцией от  $i$ -го параметра);  $w_i$  – вес  $i$ -го параметра, число между 0 и 1, причем сумма весов равна 1.

В дополнение к изложенному была разработана классификационная система оценки качества трансграничных водных объектов на основе модели «разломанного стержня» [Мостеллер, 1971]. При этом было принято во внимание, что величина  $CJ$  варьирует от 0 до 100 ( $0 \leq CJ \leq 100$ ). Количество классов качества вод было принято равным пяти ( $n = 5$ ) [Фрумин, Фетисова, 2016].

Для иллюстрации приводим табл. 1 и 2, в которых обобщены расчеты средних величин химических индексов ( $CJ$ ) за период 2000–2015 гг.

**Таблица 1. Усредненные значения химических индексов за период наблюдений и качество воды рек бассейна трансграничной реки Нарва**

Река	$CJ$	Качество воды	Класс качества
Гдовка (створ – г. Гдов)	87,7	Слабо загрязненная	2
Пиуза (створ – г. Печоры)	92,2	Слабо загрязненная	2
Плюсса (створ – г. Сланцы)	91,0	Слабо загрязненная	2
Желча (створ – пос. Ямм)	93,5	Слабо загрязненная	2
Эмайыги (створ – Кавасту)	87,0	Загрязненная	3
Раннапунгерья (створ – Йисаку-Авинурме)	84,9	Загрязненная	3

**Таблица 2. Качество вод трансграничного Псковско-Чудского озерного комплекса**

Озеро	Химический индекс, $CJ$	Качество воды	Класс качества
Чудское	92,4	Слабо загрязненная	2
Теплое	90,8	Слабо загрязненная	2
Псковское	91,1	Слабо загрязненная	2

Разработанный альтернативный комплексный гидрохимический подход к оценке качества воды трансграничных водотоков может быть применен в гидрохимической практике при мониторинге трансграничных водотоков и водоемов. Этот подход позволяет оценивать межгодовое, межсезонное и внутригодовое качество воды.

**Проблема оценки трофического статуса трансграничных водоемов.** Среди современных проблем водной экологии центральное место занимает проблема эвтрофирования. Эвтрофирование представляет собой естественный процесс эволюции водоема, обусловленный поступлением и накоплением различных биогенных элементов. Решающую роль в его развитии в водоемах зоны умеренного климата играет фосфор. Под воздействием хозяйственной деятельности естественный процесс старения водоема приобретает специфические черты и становится антропогенным. Поскольку эвтрофирование водоемов стало серьезной глобальной экологической проблемой, по линии ЮНЕСКО начаты работы по мониторингу внутренних вод и контролю за эвтрофированием водоемов планеты.

Существующие классификации трофического статуса водных объектов ориентированы на разные показатели и их комплексы. К настоящему времени разработано более 50 методов оценки трофности водных экосистем, существенно различающихся применяемыми индикаторами трофического статуса [Гальцова, Дмитриев, 2007; Фрумин, Хуан, 2011]. Отсутствие единого метода оценки трофического статуса трансграничных водоемов является серьезной нерешенной проблемой международных водных отношений, сдерживающей развитие деятельности по оздоровлению трансграничных водных объектов.

Для оценки трофического статуса озер был использован вероятностный подход, разработанный Организацией экономического развития и кооперации (ОЭРК) и базирующийся на данных о содержании фосфора общего, средней концентрации хлорофилла *a* и средней прозрачности по диску Секки. Для оценки уровня трофности были использованы пять градаций:  $\mu_{yO}$  – вероятность ультраолиготрофного состояния,  $\mu_o$  – вероятность олиготрофного состояния,  $\mu_M$  – вероятность мезотрофного состояния,  $\mu_z$  – вероятность эвтрофного состояния и  $\mu_{HT}$  – вероятность гипертрофного состояния. Кривые вероятностной классификации трофического статуса озер, разработанные ОЭРК, были аппроксимированы аналитическими зависимостями (табл. 3–6). Это обусловлено тем, что использование кривых вероятностного распределения не очень удобно, поскольку не позволяет давать точные оценки трофических состояний.

**Таблица 3. Формулы для расчетов вероятностей трофического статуса водоемов по средним за год концентрациям фосфора общего (ТР), мг/м<sup>3</sup>**

Трофический статус	Формула
Ультраолиготрофный	$\mu(ТР)_{yo} = 1 - \exp\{-\exp[-0,357 \cdot (ТР) + 1,25]\}$
Олиготрофный	$\mu(ТР)_o = 0,66 \cdot \exp\{-[-0,947 \cdot \ln(ТР/8)]^2\}$
Мезотрофный	$\mu(ТР)_M = 0,66 \cdot \exp\{-[-0,995 \cdot \ln(ТР/26)]^2\}$
Эвтрофный	$\mu(ТР)_z = 0,66 \cdot \exp\{-[-0,964 \cdot \ln(ТР/89)]^2\}$
Гипертрофный	$\mu(ТР)_{HT} = \exp\{-\exp[-0,0123 \cdot (ТР) + 1,65]\}$

**Таблица 4. Формулы для расчетов вероятностей трофического статуса водоемов по средним за год концентрациям хлорофилла *a*, мг/м<sup>3</sup>**

Трофический статус	Формула
Ультраолиготрофный	$\mu(Chl a)_{yo} = 1 - \exp\{-\exp[-2,281 \cdot (Chl a)^{0,9} + 1,6547]\}$
Олиготрофный	$\mu(Chl a)_o = 0,62 \cdot \exp\{-[-0,8757 \cdot \ln(Chl a/1,5)]^2\}$
Мезотрофный	$\mu(Chl a)_M = 0,62 \cdot \exp\{-[-1,0037 \cdot \ln(Chl a/4,8)]^2\}$
Эвтрофный	$\mu(Chl a)_z = 0,62 \cdot \exp\{-[-0,9495 \cdot \ln(Chl a/15)]^2\}$
Гипертрофный	$\mu(Chl a)_{HT} = \exp\{-\exp[-0,6455 \cdot (Chl a)^{0,5} + 2,958]\}$

**Таблица 5. Формулы для расчетов вероятностей трофического статуса водоемов по средним за год величинам прозрачности воды по диску Секки (SD), м**

Трофический статус	Формула
Ультраолиготрофный	$\mu(SD)_{yo} = \exp\{-\exp[(-0,7028 \cdot SD^{0,6} + 3,275)]\}$
Олиготрофный	$\mu(SD)_o = 0,55 \cdot \exp\{-[-1,2818 \cdot \ln(SD/11)]^2\}$
Мезотрофный	$\mu(SD)_m = 0,55 \cdot \exp\{-[-1,2683 \cdot \ln(SD/5)]^2\}$
Эвтрофный	$\mu(SD)_e = 0,55 \cdot \exp\{-[-1,2878 \cdot \ln(SD/2,3)]^2\}$
Гипертрофный	$\mu(SD)_{гг} = 1 - \exp\{-\exp[-1,5837 \cdot (SD)^{0,9} + 2,144]\}$

**Таблица 6. Вероятностная оценка трофического статуса трансграничного Псковско-Чудского озерного комплекса в 2010 г. по содержанию фосфора общего**

Озеро	TP, мг/м <sup>3</sup>	$\mu_o$	$\mu_m$	$\mu_e$	$\mu_{гг}$	Трофический статус
Псковское	85	0,00	0,17	0,67	0,16	Мезотрофно-эвтрофный
Теплое	101	0,00	0,11	0,65	0,24	Гипертрофно-эвтрофный
Чудское	48	0,04	0,45	0,46	0,05	Мезотрофно-эвтрофный

**Проблема квотирования биогенной нагрузки на трансграничные водные объекты.** В основу квотирования были положены результаты анализа экспорта биогенных элементов (общего фосфора и общего азота) в Балтийское море со стоком 14 трансграничных рек. Цель этого исследования заключалась в отыскании наиболее информативных дескрипторов для количественного описания связи между поступлением фосфора общего ( $QP$ ) и азота общего ( $QN$ ) в Балтийское море со стоком 14 трансграничных рек и характеристиками их водосборных бассейнов. В качестве дескрипторов были рассмотрены численность населения на водосборе ( $x_1$ , человек), площадь водосборного бассейна ( $x_2$ , км<sup>2</sup>), расход воды ( $x_3$ , м<sup>3</sup>/год·10<sup>6</sup>), плотность населения на водосборе ( $x_4$ , чел./км<sup>2</sup>), площадь леса на водосборе ( $x_5$ , км<sup>2</sup>), площадь пахотных угодий на водосборе ( $x_6$ , км<sup>2</sup>) и площадь кустарников или травянистого покрова ( $x_7$ , км<sup>2</sup>). Кроме того, в качестве дескриптора была использована площадь водных объектов на водосборных бассейнах рассмотренных рек ( $x_8$ , км<sup>2</sup>). Было установлено, что наиболее информативными показателями являются численность населения на территории водосборного бассейна и площадь пахотных угодий.

На основе выявленных закономерностей предложено два подхода к квотированию антропогенной биогенной нагрузки на трансграничные водные объекты. Согласно первому подходу, распределение антропогенной биогенной нагрузки между сопредельными государствами целесообразно рассчитывать пропорционально долям населения на водосборной территории. Второй подход предполагает проведение расчетов пропорционально долям распаханых земель. Третий подход, предложенный эстонскими специалистами, предполагает проведение расчетов пропорционально площадям водосборов (табл. 7).

**Таблица 7. Распределение максимально допустимого поступления фосфора общего (ТР) с рекой Нарва в Нарвский залив между Россией и Эстонией, т/год**

Принцип квотирования	Российская Федерация	Эстония
Пропорционально численности населения	153	106
Пропорционально площадям распаханных земель	137	122
Пропорционально площадям водосборов	166	78
Среднее	152	102

Наличие рассмотренных проблем во многом обусловлено несовершенством существующих систем нормирования качества природной среды, отсутствием единых подходов в этой сфере. Результаты выполненных в последнее время исследований демонстрируют перспективность решения некоторых из этих проблем.

### Литература

*Гальцова В. В., Дмитриев В. В.* Практикум по водной экологии и мониторингу состояния водных экосистем. СПб.: СПбГУ, РГГМУ, 2007. 364 с.

*Кимстач В. А.* Классификация качества поверхностных вод в странах Европейского экономического сообщества. СПб.: Гидрометеоздат, 1993. 48 с.

*Мостеллер Ф.* Пятьдесят занимательных вероятностных задач с решениями. М.: Наука, 1971. 104 с.

*Рысбеков Ю. Х.* Трансграничное сотрудничество на международных реках: проблемы, опыт, уроки, прогнозы экспертов / Под ред. В. А. Духовного. Ташкент: НИЦ МКВК, 2009. 204 с.

*Семенченко В. П., Разлуцкий В. И.* Экологическое качество поверхностных вод. Минск: Белорусская наука, 2011. 329 с.

*Фрумин Г. Т., Тимофеева Л. А.* Трансграничные водные объекты и водосборы России: проблемы и пути решения // Биосфера. 2014. Т. 6, № 1. С. 174–189.

*Фрумин Г. Т., Фетисова Ю. А.* Трансграничные водные объекты. Проблема оценки качества воды // Коллективная монография по материалам V Междунар. науч.-практ. конф. 27–28 окт. 2016 г. СПб.: РГПУ им. А. И. Герцена, 2016. С. 569–571.

*Фрумин Г. Т., Хуан Жань-Жань.* Трофическое состояние пресноводных озер Китая // Экологическая химия. 2011. Т. 20, вып. 1. С. 11–16.

## TRANSBOUNDARY WATER BODIES: PROBLEMS AND SOLUTIONS

**G. T. Frumin, Yu. A. Fetisova**

*Russian State Hydrometeorological University*

Three topical problems of transboundary water bodies are considered: the problem of assessing water quality, the problem of assessing the trophic status of lakes, the problem of quotas for nutrient loads on transboundary water bodies, and possible solutions are discussed.

# О ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОГО КОМПЛЕКСА JASMINE ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ КРУПНОГО ОЗЕРА

И. А. Чернов<sup>1</sup>, А. В. Толстик<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*Институт прикладных математических исследований КарНЦ РАН*

<sup>2</sup>*Институт водных проблем Севера КарНЦ РАН*

Рассматривается возможность применения вычислительного комплекса JASMINE, предназначенного для моделирования термогидродинамических и экосистемных параметров Белого моря, для крупного озера. Показаны пути адаптивирования расчетных алгоритмов и сложности, которые могут возникнуть при модификации модели к условиям нового водного объекта. Цель доклада – представить перспективную задачу.

Математическое и численное моделирование природных объектов является одним из инструментов их изучения. Спектр возможностей этого подхода широк. Помимо прогноза, модель может выявить причины тех или иных событий, помочь сравнить степень влияния различных факторов на наблюдаемое состояние объекта или изучить течение отдельных процессов, оценить величины, которые затруднительно, дорого или невозможно измерить. Важность моделирования существенно возросла за последние несколько десятилетий за счет бурного развития вычислительных устройств – как их быстродействия, так и доступности. Следует отметить также и развитие коммуникационных сетей и открытых баз данных: имеется достаточно много данных в открытом доступе.

Математическая модель – это всегда компромисс между детальностью описания процессов и наличием информации о них. Рост доступной вычислительной мощности повышает интерес к комплексным моделям водоемов, принимающим во внимание множество взаимодействующих одновременных процессов. Так, при моделировании моря, очевидно, следует учесть течения, распределение температуры и солености воды, изменение уровня моря, приливы и т. д. С методологической точки зрения представляется предпочтительным учесть больше факторов и затем сузить задачу, нежели пытаться расширить изначально узкие предположения.

В Институте прикладных математических исследований и Институте водных проблем Севера КарНЦ РАН при поддержке ИБМ РАН развивается и поддерживается вычислительный комплекс JASMINE, предназначенный для моделирования Белого моря [Чернов и др., 2016]. Комплекс основан на модели ФЕМО Северного Ледовитого океана [Яковлев, 2009], он описывает трехмерную структуру течений, температуры и солености, динамику уровня моря, а также морской лед как ансамбль дрей-

фьющих льдин различной толщины со снегом, покрывающих некоторую долю площади моря. Учет свободной поверхности моря позволяет эффективно описывать приливы, играющие в Белом море важнейшую роль. Алгоритм адвекции с коррекцией по потоку вычислительно дорог, однако обладает монотонностью – важным свойством, существенным для переноса примесей с малой концентрацией. Численный комплекс JASMINE функционирует на кластере Карельского научного центра РАН.

Комплекс дополнен блоком биогеохимической подсистемы моря на основе открытой модели BFM [Vichi et al., 2015; Biogeochemical..., 2017], разрабатываемой консорциумом научно-исследовательских институтов (в основном, в Италии). Модель описывает нижнюю часть пелагической трофической сети: растворенное и взвешенное в воде органическое и неорганическое вещество, бактерии, по четыре группы фитопланктона и зоопланктона. Подход к описанию экосистемы стехиометрический, при котором описывается переход вещества между группами в силу различных процессов (хищничество, фотосинтез и т. п.). Описаны циклы углерода, фосфора, азота, кремния, а также производство хлорофилла. Отметим, что «псевдоэлемент» хлорофилл не консервативен (в отличие от элементов) в модели: он производится «из ничего» и разрушается «в никуда». Явное описание хлорофилла, концентрация которого интересна для приложений, измеряется в экспедициях и наблюдается (хотя с оговорками) со спутников, является важным преимуществом модели. Другим преимуществом является гибкость: число групп органического вещества (детрит, растворенное вещество, лабильное взвешенное вещество и т. п.), автотрофных организмов (диатомовые водоросли, единственно потребляющие соединения кремния в модели, синезеленые водоросли, отделяемые от нефотосинтезирующих бактерий, жгутиконосцы и крупный фитопланктон), гетеротрофных организмов может быть изменено. Добавляются или исключаются циклы отдельных элементов. Так, в модели реализован (но нами не используется) цикл железа. Для разных целей число переменных может варьироваться. Например, для описания экосистемы Мирового океана [Vichi et al., 2007] применяется предположение о постоянном составе автотрофных организмов, число групп которых сокращено до трех (исключен крупный фитопланктон, играющий важную роль, в основном, в прибрежных районах). Помимо Мирового океана, BFM применялась и для водоемов высоких широт, например, для Северного моря [Van der Molen et al., 2015].

Большое число групп живых организмов позволяет, в принципе, воспроизводить наблюдаемые в природе замещения одних преобладающих видов другими. В частности, такое замещение приводит к двум или более пикам на кривой зависимости концентрации хлорофилла или биомассы

планктона от времени; воспроизвести такую мультимодальную кривую в модели с одной группой автотрофных организмов вряд ли возможно.

Недостатком модели является большое число переменных, которые представляют собой трехмерные поля. На расчет их адвекции, диффузии, гравитационного осаждения требуются значительные вычислительные ресурсы, а кроме того, необходимо задавать граничные значения всех полей, в том числе концентрацию в речном стоке.

Вместе с тем большое число переменных модели не затрудняет ее верификацию, поскольку агрегация переменных не представляет сложности. В частности, доступны для сравнения с наблюдениями такие агрегированные поля, как концентрация хлорофилла, биомасса планктона, масса органического азота и т. п.

Отметим, что группы организмов описывают большое количество видов, демонстрирующих, с точки зрения модели, сходное поведение. Так, единственная группа бактерий включает в себя все многообразие пелагических бактерий, за исключением учтенных в отдельной группе фотосинтезирующих синезеленых водорослей (цианобактерий).

Модель BFM содержит блок бентосной экосистемы в нескольких уровнях детализации. Однако было принято решение описать обмен вещества с донным отложениями простейшей схемой реминерализации [Soetaert et al., 1996]. Ряд переменных гравитационно осаждается: имеет вертикальную скорость относительно воды по направлению ко дну, переменную или постоянную (5 метров в сутки). В чисто пелагической модели вещество задерживается в нижнем слое и реминерализуется пелагическими бактериями. При учете обмена с дном вещество падает на дно, изымаясь из пелагической модели, и реминерализуется бентосным сообществом. Имеет место поток неорганики в воду, пропорциональный количеству накопленного на дне вещества. Различаются «медленная» и «быстрая» фракции с эмпирическим соотношением 1 : 3. Для кремния фракция одна. Учет взаимодействия с бентосом существенно изменил динамику экосистемы Белого моря в модели, в особенности в мелководном Онежском заливе и глубоководном Кандалакшском. В других частях моря влияние обмена сказалось несущественно.

Консорциумом BFM разрабатывается также блок экосистемы морского льда [Tedesco, Vichi, 2014], который будет доступен в ближайшем будущем. Взаимодействие моделей осуществляется в процедурном стиле: библиотечные вызовы BFM принимают информацию о состоянии в узле сетки (температуру, соленость и плотность воды, освещенность, длину светового дня, скорость ветра и содержание углекислого газа в приповерхностном слое воздуха, долю площади, покрытую льдом, и вертикальную толщину ячейки) и возвращают скорости изменения всех переменных,

скорости гравитационного осаждения тех из них, для которых она отличается от нуля и непостоянна, а также большое число величин, зависящих от переменных, но не относящихся к ним. В число этих последних входят такие полезные показатели, как валовая и чистая первичная продукция, продукция бактерий, дыхание различных групп организмов, отношение содержания азота, фосфора или кремния к углероду и другие. Адвекцию, диффузию и гравитационное осаждение осуществляет геофизический блок. Возможен учет затенения за счет изменения прозрачности воды. Процедуры расчета адвекции-диффузии абстрактны и могут применяться для переноса произвольной трехмерной или плавучей примеси (загрязнений, нефтяных пятен, пластика, планктонных организмов и т. п.). Есть возможность задавать потоки из дна и атмосферы, функционирование источников и стоков в толще, гравитационное осаждение, переменную плотность взвешенного вещества.

Адаптация модели к другому водоему нетривиальна. Ее применение не для моря, а для пресноводного озера детально не рассматривалось, однако принципиально возможно. С точки зрения моделирования Белое море имеет определенное сходство с крупным озером (таким, например, как Ладожское). Так, его размеры относительно малы, равно как и глубина. Белое море обладает единственной жидкой границей с другим морем. Объем речного стока сравнительно велик, соленость ниже, чем у соседнего Баренцева моря.

Принципиальные отличия озера от моря – пресноводность и наличие вытекающих рек. Подробный обзор существующих моделей экосистем крупных озер представлен в [Меншуткин и др., 2014]. Уравнение состояния морской воды формально работоспособно и при близких к нулю значениях солености, однако замена уравнения состояния на пресноводное не представляет труда. Впадающие реки описаны как проливы, аналогично может быть задана и вытекающая река. Альтернативным способом задания речного стока является задание потока пресной воды (и всех необходимых веществ) через верхнюю границу (как фиктивный дождь). Вытекающую реку можно описать как фиктивное испарение (уносящее с собой также и вещество).

Лед Ладожского озера напоминает беломорский по особенностям распространения: припай по периметру и льдины в средней части озера [Лочия..., 2017]. Блок морского льда комплекса JASMINE, вероятно, способен описывать такой лед. Кроме того, для крупных озер (например, Байкала, Ладожского, Онежского и др.) накоплен значительный массив данных, которыми охвачены практически все районы водоемов во все сезоны. Это значительно упрощает задачу верификации и валидации модели по сравнению с такой же задачей для Белого моря.

Трудности могут быть связаны с малым размером озера и заданием граничных условий. Так, шаг по времени согласно условию Куранта должен быть согласован с пространственным разрешением модели; это накладывает тем более серьезные ограничения на быстродействие вычислительных устройств, чем меньше водоем и больше число узлов расчетной сетки.

Кроме того, модель ВФМ не применялась (насколько нам известно) для пресноводных водоемов и адекватность заложенных в нее предположений следует проверять. Известно, что соленость морской воды влияет на цикл углерода (в частности, на щелочность воды), но существенно ниже ее влияние на цикл других элементов. Поскольку группы организмов в ВФМ объединяют множество видов со схожим поведением, вполне вероятно, что эти группы применимы и к описанию экосистемы озера (разумеется, их точный состав, не играющий роли для вычислений, окажется совсем иным), с необходимой настройкой параметров взаимодействия этих групп.

Таким образом, применение комплексной трехмерной модели динамики вод, льда и экосистемы моря для крупного озера является новой, интересной и актуальной задачей, ждущей своего исследователя.

Авторы благодарят Н. Г. Яковлева (ИВМ РАН, г. Москва) и P. Lazzari (OGS, Триест, Италия) за помощь и поддержку.

Работа по моделированию экосистемных параметров Белого моря выполняется при поддержке гранта РФФИ № 16-45-100162 p\_a.

### Литература

*Меншуткин В. В., Руховец Л. А., Филатов Н. Н.* Моделирование экосистем пресноводных озер (обзор). 2. Модели экосистем пресноводных озер // Водные ресурсы. 2014. Т. 41, № 1. С. 24–38.

*Чернов И. А., Толстиков А. В., Яковлев Н. Г.* Комплексная модель Белого моря: гидротермодинамика вод и морского льда // Тр. КарНЦ РАН, сер. Математическое моделирование и информационные технологии. 2016. № 8. С. 116–128.

*Яковлев Н. Г.* Воспроизведение крупномасштабного состояния вод и морского льда Северного Ледовитого океана в 1948–2002 гг. Ч. 1: Численная модель и среднее состояние // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2009. Т. 45, № 3. С. 1–16.

*Soetaert K., Herman P. M. J., Middelburg J. J.* A model of early diagenetic processes from the shelf to abyssal depths // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 1996. Vol. 60 (6). P. 1019–1040.

*Tedesco L., Vichi M.* Sea Ice Biogeochemistry: A Guide for Modellers // *Dias. PLoS ONE*. 2014. Vol. 9, N 2.

*Van der Molen J., van Beek K., Augustine S. et al.* Modelling survival and connectivity of *Mnemiopsis leidyi* in the south-western North Sea and Scheldt estuaries // *Ocean Science*. 2015. Vol. 11. P. 405–424.

*Vichi M., Masina S., Navarra A.* A generalized model of pelagic biogeochemistry for the global ocean ecosystem. Part II: numerical simulations // *Journal of Marine Systems*. 2007. Vol. 64. P. 110–134.

*Vichi M., Lovato T., Lazzari P. et al.* The Biogeochemical Flux Model (BFM): Equation Description and User Manual. BFM version 5.1. BFM Report series N. 1, Release 1.1, July 2015, Bologna, Italy, 2015. <http://bfm-community.eu>. P. 104.

Лоция Ладожского озера. [Электронный ресурс]. URL: <http://www.ladoga-lake.ru/pages/artcl-ladoga-sailing-04.php> (дата обращения: 16.05.2017).

Biogeochemical Flux Model (BFM). [Электронный ресурс]. URL: <http://bfm-community.eu> (дата обращения: 16.05.2017).

## ON THE APPLICABILITY OF THE NUMERICAL MODEL JASMINE FOR SIMULATION OF A LARGE LAKE

I. A. Chernov<sup>1</sup>, A. V. Tolstikov<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*Institute of Applied Mathematical Research, KarRC RAS*

<sup>2</sup>*Northern Water Problems Institute, KarRC RAS*

We consider the applicability of the numerical software JASMINE for simulation of a large lake. JASMINE currently models the thermo- and hydrodynamics of the White Sea, sea ice, and ecological system. Ways to adapt the algorithms for the new object and the related challenges are discussed. The aim of the paper is to present a promising problem to young researchers.

## ГЕОФИЗИКА И СРЕДА ОБИТАНИЯ

Н. В. Шаров

*Институт геологии КарНЦ РАН, Петрозаводский государственный университет*

Земля сложна, в ней постоянно происходят изменения под влиянием непрерывной подпитки энергией как из ее недр, так и из космоса. Развитие Земли – это процесс кооперативного взаимопонимания различных природных явлений, которое и составляет сущность геологической самоорганизации. Во многих случаях для всех этих разнородных явлений характерно то, что они не допускают достаточно надежного и точного прогнозирования их течения на сколько-нибудь значительный период, как бы точно и подробно мы ни пытались измерить их в настоящий момент времени. Можно говорить о том, что литосфера все время находится в состоянии динамического равновесия с внешним миром, живо реагируя на все происходящие в ней изменения не только естественного, но и антропогенного происхождения.

Велико есть дело достигать во глубину  
земную разумом, когда рукам и оку  
досягнуть возбраняет натура;  
странствовать размышлениями в  
преисподней, проникать рассуждением  
сквозь тесные расселины, и вечною  
ночью помраченные вещи и деяния  
выводить на солнечную ясность.

*М. Ломоносов. О слоях земных (1757)*

**Введение.** Парадоксально, но факт: человек научился определять состав звезд, удаленных на миллиарды километров, познавать процессы, происходящие в их глубинах, но еще лишь на подступах к недрам Земли. Ведь при ее радиусе более чем 6350 км самая глубокая в мире Кольская скважина достигла лишь 12,2-километровой отметки. Наша планета состоит из твердого тела собственно Земли, Мирового океана (гидросфера), атмосферы (газообразная оболочка) и магнитосферы. И все они вместе составляют ту среду, в которой существует человечество.

И все-таки люди нашли способ «заглядывать» в глубь своей планеты: наши представления о внутреннем строении Земли основаны на анализе физических полей – сейсмического, гравитационного, электромагнитного, термического, радиоактивного и др. Физическими полями и физическими свойствами вещества Земли занимается планетарная геофизика. Геофизики еще в начале века установили, что наша планета имеет плотное ядро, мощную мантию и сравнительно тонкую кору. В дальнейшем было выяснено, что эти геосферы дополнительно расслоены (по плотности и другим физическим свойствам) еще на ряд оболочек. Современное развитие сейсмической картины геосфер связано с детализацией и уточнением этих открытий отчасти путем увязки сейсмических данных с термическими, электромагнитными, гравитационными.

В последние годы получены новые результаты глубинного строения Земли сейсмическими и другими геофизическими методами. Причем упор будет сделан на земную кору и верхнюю мантию. Мантия вызывает жгучий интерес геологов, потому что в ней сосредоточено основное вещество Земли (две трети массы планеты). Главное, что в ней – корни, истоки многих процессов, которые неумолимо вторгаются в жизнь человека: дрейф континентов и сопутствующих ему землетрясений, вертикальных движений отдельных участков земной коры и связанных с ними грозных стихийных явлений.

Интересно отметить, что, используя данные о характере и особенностях землетрясений, а также о размерах горных сооружений, первый русский академик М. В. Ломоносов вычислил толщину земной коры – от 30

до 70 км [М. Ломоносов. О слоях земных. СПб., 1757]. Полученные им цифры близки к общепризнанным в наше время, хотя в своих расчетах он исходил из неверных положений, сравнивая земную кору с архитектурным сооружением.

Еще в начале нашего века сейсмологи обратили внимание на то, что упругие волны, родившиеся в очаге землетрясения, несут информацию о строении среды распространения. Выдающийся русский физик академик Б. Б. Голицын, заложивший научные основы сейсмологии, писал тогда: «...можно уподобить всякое землетрясение фонарю, который зажигается на короткое время и освещает нам внутренность Земли, позволяя тем самым рассмотреть то, что там происходит. Свет от этого фонаря пока еще очень тусклый, но не подлежит сомнению, что со временем он станет гораздо ярче и позволит нам разобраться в этих сложных явлениях природы» [Лекции по сейсмометрии. СПб., 1912., 654 с. (211 с.)].

В настоящее время еще нет единой теории Земли, нет (и, может быть, не будет) универсальной геологической теории, хотя в теоретической геологии идет быстрое формирование важнейших геодинамических концепций. При таком положении необходимо вновь и вновь возвращаться к исходным фундаментальным постулатам в наших представлениях о Земле, проверяя, насколько они соответствуют возросшему уровню знаний.

На помощь геологу в познании глубинного строения Земли приходит геофизик. Физика Земли, геофизика – комплекс наук о Земле, ее внутреннем строении, физических свойствах и физических процессах в ее «твердых оболочках», а также в атмосфере и гидросфере. Выделяются солнечно-земная физика, физика атмосферы, физика гидросферы, физика твердой Земли. Объект исследования планетарной геофизики неделим, изучаемые ею явления – ураганы и землетрясения, полярные сияния и морские приливы, оледенение и магнитные бури, океанские течения и движения земной коры – не признают государственных границ.

Естественно, что к развитию современной геофизики привлекаются молодые специалисты по физике Земли и геологи. Для их подготовки и повышения квалификации требуются новые учебники и монографии. Широкой популярностью среди читателей пользуются монографии ведущих геофизиков [Гутенберг, 1963; Магницкий, 1965; Федынский, 1967; Ботт, 1974; Жарков, 1983; Шаров, 1997; Сергеев, Сергеева, 2000].

**Геофизика и твердая Земля.** Антропогенная деятельность и усиливающееся техногенное воздействие на среду ускоряют геодинамические процессы. При этом причиной этого становятся не крупные события – сильные и катастрофические землетрясения, а резкое увеличение числа

событий умеренных, слабых и очень слабых. Таким образом, среда реагирует на искусственное воздействие в направлении развития естественного процесса в виде ускорения разрядки напряжений и сохранности метастабильного состояния. Естественно, что в определенных условиях реакция на искусственное возбуждение связана с негативными последствиями. Примеры тому – сильные землетрясения, связанные с созданием искусственных водохранилищ, разработкой полезных ископаемых и др. Но эти отдельные акты ведут к стабилизации обстановки и в принципе искусственными же приемами могут быть отрегулированы: разделены на несколько более слабых актов, растянуты во времени или инициированы в нужный момент.

Нельзя, по-видимому, считать негативным и воздействие проведенных подземных ядерных испытаний на сейсмический поток. Напротив, они должны как бы «смягчить» сейсмичность – резко увеличивать активность слабых землетрясений и тем самым «умерять» землетрясения наиболее сильные, катастрофические.

Таким образом, в целом постоянно усиливающаяся техногенная нагрузка на среду не «перегреет» ее, число наиболее разрушительных землетрясений не возрастет, а, наоборот, вероятно, даже уменьшится. Среди всех возможных сценариев развития сейсмического процесса под действием искусственных влияний большая часть должна сводиться к уменьшению сейсмической опасности и риска. Это относится в первую очередь к областям высокой тектонической и сейсмической активности. В районах малоактивных, платформенных техногенное воздействие приводит к некоторой сейсмической активизации. Будучи относительно слабо выраженными, эти явления могут, однако, причинить ущерб благодаря своей непредвиденности.

Широко распространено и культивируется мнение, что воздействие человека на природу имеет негативный характер практически в любом случае. На примере наведенной сейсмичности можно сказать, что это не всегда так. Действительно, в худшем случае могут возникнуть разрушительные землетрясения там, где их не ждали и, казалось бы, не должно было быть. Но этот эффект может быть предсказан, а его масштаб может быть уменьшен изменением режима воздействия.

Рассмотрим *соотношения биосферы с твердой Землей*. Эти отношения определяются, во-первых, геофизическими полями, во-вторых, непосредственными контактами и воздействиями живого вещества биосферы с «костным» веществом Земли. Так, *гравитационное поле* является основной предпосылкой возможности существования поверхностных геосфер и важнейшим регулятором их развития. При отсутствии гравитационного поля продукты разрушения горных пород не образовали бы стратисферы,

укладываясь на поверхности Земли горизонтальными слоями, а расплылись бы в космическом пространстве. Физически невозможным было бы существование водоемов, являющихся, по распространенному мнению, первичной средой формирования жизни. Само существование биосферы обязано гравитационному полю, обеспечивающему ее пространство и форму. В качестве регулятора гравитационное поле влияет на рост растений и животных, обеспечивая оптимальные соотношения между их размерами, весом, формой и, в частности, системой опор. Рост деревьев обычно связан не только со «стремлением к солнцу», но с необходимостью расположения центра тяжести дерева над поверхностью его опоры с учетом прочности ствола изогнутых деревьев в местностях, доступных для сильных ветров. С гравитационным полем связана возможность существования организмов, в частности рыб, в водной среде. А если гравитационное поле определяет существование и регулирует развитие биосферы, то и его аномалии обязательно на нее влияют. Надо найти возможности определять влияние гравитационных максимумов, минимумов и градиентных зон на процессы в биосфере.

Очень существенно влияние *геомагнитного поля* на биосферу. Оно во многом определяет ориентацию организмов при дальних миграциях (рыб и перелетных птиц). Магнитное поле также влияет на биологические процессы в зависимости от того, как они ориентированы по отношению к силовым линиям. Колебания магнитного поля Земли и магнитные бури, вызываемые изменением солнечной активности, оказывают существенное воздействие на живое вещество биосферы. Далеко еще не восстановлена целостная картина такого воздействия, но с колебаниями магнитного поля некоторые ученые уже связывают урожайность зерновых, размножение и миграцию животных, эпидемии, рост обострений сердечно-сосудистых, нервных и психических заболеваний.

*Тепловое поле* Земли влияет на биосферу и организмы в смысле сохранения коренных систем и существования животных, использующих глубокие норы, хотя связанный с Землей в целом ее суммарный поток в четыре тысячи раз меньше количества тепла, поступающего на Землю от Солнца, и поэтому практически не сказывается на климате.

Мы привели в самом общем виде соображения о тех или иных влияниях геофизических полей Земли на биосферу и непосредственно на человека. Однако между твердой Землей и организмами биосферы существуют взаимоотношения, природа которых далеко не достаточно ясна.

В последнее время внимание геофизиков все больше привлекают явления космического и земного происхождения, в той или иной степени влияющих на среду обитания и условия жизнедеятельности человека. Развивается новая, экологическая отрасль геофизики, расширившая тра-

диционный круг за счет включения в него вопросов, связанных с изучением загрязнения природной среды, и получившая название «экологическая геофизика».

*Экологическая геофизика* представляет собой область прикладной геофизики, в которой геофизические методы используются при изучении опасных с экологической точки зрения геологических процессов и явлений, а также разного рода загрязнения среды обитания. Экологическая геофизика охватывает проблемы влияния физических полей естественного (космического и земного) и искусственного происхождения на экосистемы и человека. Она изучает взаимоотношения природно-технических систем и человеческого общества в сфере энергообмена, а также управления геоэнергетикой.

В заключение отметим, что на геофизическую среду влияют эндогенные (тектонические) и экзогенные силы (перепады атмосферного давления и температуры воздуха, космическое влияние, связанное с гравитационным и электромагнитным воздействием). Прямо или опосредованно влияет на литосферу и человек. Заполнение водохранилищ, забор воды из рек и скважин на орошение и хозяйственные нужды, ядерные взрывы, запуск тяжелых ракет и многое-многое другое сказывается на процессах, происходящих в земной коре. При этом следует учитывать, что геофизические поля сложным образом взаимодействуют между собой.

Выскажем еще одно соображение. А. Л. Чижевский (1922 г.) в своих работах показал связь процессов, происходящих в социальной, политической, экономической, медико-биологической сферах, с космическими процессами. Процессы, происходящие в недрах Земли и в космосе, одновременно влияют на литосферу, на людей и на технические объекты (Чернобыль, истощение озонового слоя, глобальная разрушительность военной геофизики и др.). Именно этим можно объяснить одновременное или почти одновременное происхождение землетрясений, национальных конфликтов, природно-техногенных катастроф в некоторых регионах.

### Литература

- Ботт М.* Внутреннее строение Земли. М.: Мир, 1974. 373 с.  
*Гутенберг Б.* Физика земных недр. М.: ИЛ, 1963. 263 с.  
*Жарков В. Н.* Внутреннее строение Земли и планет. М.: Наука, 1983. 416 с.  
*Магницкий В. А.* Внутреннее строение и физика Земли. М.: Недра, 1965. 378 с.  
*Сергеев М. Б., Сергеева Т. В.* Планета Земля. М.: Недра, 2000. 150 с.  
*Федынский В. В.* Разведочная геофизика. М.: Недра, 1967. 672 с.  
*Шаров Н. В.* Физика Земли: Учебное пособие. Апатиты: КНЦ РАН, 1997. 71 с.

## GEOPHYSICS AND ENVIRONMENT

N. V. Sharov

*Institute of Geology, KarRC RAS; Petrozavodsk State University*

The Earth is complex, constantly changing under the influence of continuous energy feeding both from its interior and from outer space. The development of the Earth is a process of cooperative understanding between various natural phenomena, which is the essence of geological self-organization. In many cases, all these heterogeneous phenomena are characterized by the fact that they do not allow a sufficiently reliable and accurate prediction of their flow for any more or less substantial period, no matter how accurately and in detail we have tried to measure them at the present time. One can say that the lithosphere is always in a state of dynamic equilibrium with the outside world, responding nimbly to any changes of not only natural but also anthropogenic origin.

### ГЕОГРАФИЧЕСКОЕ ОБРАЗОВАНИЕ В ПРОГРАММЕ «УРАГАН» С УЧАСТИЕМ КОСМОНАВТОВ МКС

Л. В. Десинов<sup>1</sup>, С. Л. Десинов<sup>1</sup>, О. А. Юрина<sup>1</sup>, М. И. Козлова<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*Институт географии РАН, Москва*

<sup>2</sup>*ВИНИТИ РАН*

В настоящее время в школьном географическом образовании на уроках отсутствуют космические фотоснимки земной поверхности. Рассматривается новый образовательный проект «Уроки географии с орбитальной высоты», создаваемый на основе изображений, полученных в рамках программы «Ураган», которая реализуется с 2001 г. на Международной космической станции.

В линейке учебников географии, используемых в школах России, практически отсутствуют космические снимки. Учащиеся получают информацию о земной поверхности, экологии, природных и техногенных катастрофах в виде текстового материала, карт, схем, графиков. «Живые образы» географической оболочки Земли остаются вне поля учебного процесса.

Всего в России около 47 тыс. школьных образовательных учреждений, из которых более 60 % – сельские школы.

Существует огромная диспропорция между возможностями повышения уровня географического образования в школах, лицеях, гимназиях, частных школах Москвы, Санкт-Петербурга, нескольких крупных городов и всех иных городов и сельских поселений, где в географических кабинетах, а зачастую в обычных классных комнатах имеется в наличии только компьютер. В первом случае школы имеют принципиальную воз-

возможность оснащения дополнительным оборудованием, оргтехникой, включая лазерные экраны. Для этих школьных классов в последние годы разработаны и внедрены специальные программно-технические комплексы инновационных средств обучения, которые используются на уроках географии, информатики, физики, истории, а также в элективном процессе и в краеведении.

Все предназначенные для уроков географии школьные электронные образовательные продукты нового поколения и представляемые на выставках, конференциях, мастер-классах разработки рассчитаны на соответствующее аппаратное оснащение школ. В перспективе эти продукты найдут широкое применение в школах и потому должны служить образцами использования космических снимков для целей географического образования. Вместе с тем в большинстве школ страны один учитель географии ведет уроки во всех классах от пятого до одиннадцатого, т. е. обучает несколько сотен школьников. В небольших городах и в сельских населенных пунктах зачастую один учитель преподает не только географию, но и физику или биологию, или историю, или ОБЖ.

Соблюдая весь спектр требований по методике преподавания в рамках федерального государственного образовательного стандарта (ФГОС), дополнительно организуя работу по краеведению, учитель ограничен в демонстрации на уроке космических снимков земной поверхности.

Одним из способов демонстрации географической информации, особенно актуальных данных по экологическим происшествиям и стихийным природным явлениям могут служить космические фотоснимки. Однако в настоящее время в школьных учебниках и пособиях они представлены в очень ограниченном количестве. В связи с этим назрела настоятельная необходимость создания такого образовательного произведения на базе космической фотосъемки земной поверхности, которое станет универсальным для применения на уроках географии от пятого до одиннадцатого класса и окажется востребованным и для широкого круга людей, заинтересованных в повышении своих знаний о географии России и мира. Очевидно, что в дальнейшем потребуется его периодическое обновление, особенно в части экологии и катастроф с учетом актуальности событий.

Важно, что Федеральный государственный стандарт основного общего образования предусматривает внедрение в школах «современных технологий деятельностного типа и их использование для поиска, интерпретации и демонстрации разных географических данных».

Целью нового образовательного проекта является повышение эффективности географического образования в школе с демонстрацией

основных природных процессов, причин и особенностей возникновения негативных экологических ситуаций и катастроф. Его основная задача – создание универсального географического образовательного продукта для средней школы, а также для использования во внеурочной деятельности на дополнительных занятиях. Должна быть обеспечена наглядная демонстрация состояния земной поверхности и динамики отдельных природных объектов и пространственно-временных связей между природными явлениями и хозяйственной деятельностью.

Дополнительно реализовывалась бы возможность использования создаваемого продукта для повышения не только географических знаний, но и знаний в области биологии, физики, картографии, истории, метеорологии. Представленная информация может побудить широкие слои населения к самостоятельному повышению знаний о природе Земли.

При необходимости продукт может быть реализован как универсальный для университетского и школьного образования. Однако для поддержания эффективности и актуальности этого образовательного продукта потребуются его периодическое обновление, особенно в части экологии и картографирования с учетом актуальности событий.

Проект «Уроки географии с орбитальной высоты» является продолжением учебного продукта «Уроки из космоса», который был задуман и реализован в ограниченном объеме в конце прошлого века под руководством космонавта Александра Александровича Сереброва. В те годы удалось внедрить в школы нашей страны около 1 тыс. экземпляров двух тем уроков космической географии. Автор этих уроков – Л. В. Десинов.

Самым лучшим видом орбитальной съемки земной поверхности, используемой в учебных целях, являются пейзажи, сделанные с МКС по разделу «Географическое образование» программы «Ураган». Космонавты целенаправленно выбирают объекты и ракурсы их съемки для демонстрации особенностей ландшафта Земли и объектов инфраструктуры, экологических бедствий и катастроф. Применяется принцип «от общего к частному», когда вначале дается образ целого региона, затем отдельных районов и типичных ландшафтов и объектов инфраструктуры площадью 12 x 8 км с разрешением на местности около 2 м.

Демонстрируется то новое, что дает космическая фотосъемка земной поверхности по отношению к картам, чтобы создать наглядный образ всех ландшафтов планеты. Авторский текст, наземные фотографии, тематические карты, схемы и другая необходимая информация раскрывают содержание проекта.

Этот образовательный продукт состоит из следующих разделов:

Географический мониторинг с МКС, Воздушная оболочка Земли, Мировой океан, Рельеф,

Горы, Вулканы, Реки, Озера, Снежный покров и ледники, Растительные покровы, Пустыни и полупустыни, Глобальное потепление климата, Сельское хозяйство, Промышленность, Транспорт, Добыча полезных ископаемых, Расселение, Рекреация и туризм, Экология и охрана природы, Природные и техногенные катастрофы.

При реализации проекта будут достигнуты следующие результаты:

– будет создано важное подспорье учителю географии в демонстрации учащимся широкого перечня объектов земной поверхности в виде космических фотоснимков в дополнение к тексту учебников и к картам;

– наглядное интерактивное пособие для уроков географии в школе, разработанное на основе использования фрагментов земной поверхности, полученных целенаправленно российскими космонавтами с МКС, найдет широкое применение в школах России и иных образовательных учреждениях, в университетах, в методических центрах для демонстрации географической оболочки планеты и ее инфраструктуры;

– будут созданы предпосылки для повышения эффективности школьного урока географии и для того, чтобы урок географии даже в самой отдаленной школе России мог стать эмоциональным и незабываемым;

– возрастет географическая компетенция школьников в повседневной жизни, повысится популяризация географии;

– созданный в рамках проекта продукт будет способствовать повышению квалификации учителей и методистов школьного (и не только школьного) географического образования, восприятию основ геоинформационных систем и технологий.

«Уроки географии с орбитальной высоты» не заменяют собой учебник географии, карты, рабочие тетради и все прочие традиционные формы обучения. Они дополняют их и служат ярким наглядным источником информации. Продукт не привязан к тем или иным учебным пособиям, к методикам преподавания. Он свободен от любых субъективных воззрений на тактику и способы донесения географических знаний до школьника или студента. В «Уроках...» природная среда планеты, техносфера и расселение показаны объективно на разные даты съемки. «Уроки...» разделены на тематические блоки, исходя из логики демонстрации этих составных частей физической и экономической географии на космических фотоизображениях, но не схем педагогического процесса.

Создание «Уроков...», их обсуждение в профессиональной среде, в СМИ пройдут «под флагами» и с активным участием ученых ракетно-космической корпорации «Энергия» Роскосмоса, Института географии РАН и организаций, участвующих в финансировании проекта.

Каждый раздел «Уроков...» после создания пройдет обсуждение в десятках школ, детских лагерей, в университетах и пединститутах и будет доработан с учетом значимых замечаний. Его вторая итерация выйдет в свет как завершенное произведение.

«Уроки географии с орбитальной высоты» будут бесплатно доступны через Интернет.

## **GEOGRAPHICAL EDUCATION WITHIN THE URAGAN PROGRAM WITH PARTICIPATION OF ISS COSMONAUTS**

**L. V. Desinov<sup>1</sup>, S. L. Desinov<sup>1</sup>, O. A. Yurina<sup>1</sup>, M. I. Kozlova<sup>2</sup>**

*<sup>1</sup>Institute of Geography RAS, Moscow*

*<sup>2</sup>VINITI RAS*

Contemporary high school geographical education makes no use of space images of the Earth surface at the lessons. A new educational project "Geography lessons from the orbital altitude" based on images obtained within the framework of the Uragan program, implemented since 2001 at the International Space Station, is being developed.

# **ГИДРОЛОГИЧЕСКИЕ И ГИДРОФИЗИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В ОЗЕРАХ. ВЛИЯНИЕ РЕГИОНАЛЬНОГО КЛИМАТА**

## **СКРЫТЫЕ ПЕРИОДЫ КОЛЕБАНИЙ И ДОЛГОСРОЧНОЕ ПРОГНОЗИРОВАНИЕ УРОВНЯ ВОДЫ ОЗЕРА МАРКАКОЛЬ**

**А. В. Бабкин<sup>1</sup>, А. С. Мадибеков<sup>2</sup>, А. Мусакулкызы<sup>2</sup>,  
А. В. Чередниченко<sup>3</sup>**

*<sup>1</sup>Российский государственный гидрометеорологический университет*

*<sup>2</sup>ТОО «Институт географии», Казахстан*

*<sup>3</sup>«Жасыл даму», Казахстан*

Анализ временного ряда уровня воды оз. Маркаколь «методом периодичностей» указывает на присутствие в его колебаниях гармоник с периодами, соответственно, 12 и 14 лет. Проведены расчеты поверочных прогнозов уровня озера с заблаговременностью 5 и 10 лет по тенденции линейного тренда и по ее комбинации с этими синусоидами. Оценка их результатов на новом независимом материале показала, что прогнозы по комбинации синусоид и тенденции тренда оказались лучше, чем по тенденции тренда, и не хуже, чем по среднему значению.

Озеро Маркаколь расположено в Казахстане в одноименной котловине, которая окаймлена горными хребтами Курчум и Азутау. На северо-востоке она сочленяется с Бобровской впадиной, а на юго-западе по реке Калжыр имеет выход в Зайсанскую долину. Озеро расположено на высоте 1419,3 м над уровнем моря, простирается с северо-востока на юго-запад [Филонцев, Омаров, 1974].

Временной ряд уровня озера проанализирован «методом периодичностей» [Бабкин, 2005; Бабкин, Семейкин, 2014]. Этот метод основан на аппроксимации временного ряда гидрометеорологической характеристики синусоидальными функциями последовательно с пошаговым изменением периода. Для каждого периода методом наименьших квадратов [Линник, 1962; Аполлов и др., 1974] рассчитываются амплитуда и фаза наилучшей

аппроксимирующей синусоиды, а также дополнительное слагаемое, около которого она колеблется, и сумма ее квадратических разностей со значениями ряда.

При анализе зависимости суммы квадратических разностей аппроксимирующей синусоиды от периода аппроксимации у отдельных периодов должны отмечаться локальные минимумы этой суммы. Такой минимум суммы квадратических разностей аппроксимирующей синусоиды и значений ряда может быть признаком наличия здесь периодичности.

При сложении либо объединении выявленных синусоид корреляция их суммы с временным рядом должна последовательно возрастать, отражая особенности его колебаний. Комбинация синусоид, которая также может учитывать и линейную тенденцию ряда, по существу, является его моделью, которая может быть использована как прогностическое выражение для расчетов будущих значений уровня озера.

Результаты аппроксимации временного ряда уровня озера представлены в табл. 1. В первом столбце этой таблицы указываются периоды аппроксимации  $T$ , во втором – постоянное значение, около которого колеблется наилучшая аппроксимирующая синусоида этого периода  $H_0$ , в третьем и четвертом столбцах – ее амплитуда  $\delta H/2$  и фаза  $\varphi_H$ , соответственно. В пятом столбце рассчитана ее сумма квадратических разностей с временным рядом уровня озера  $S_H$ .

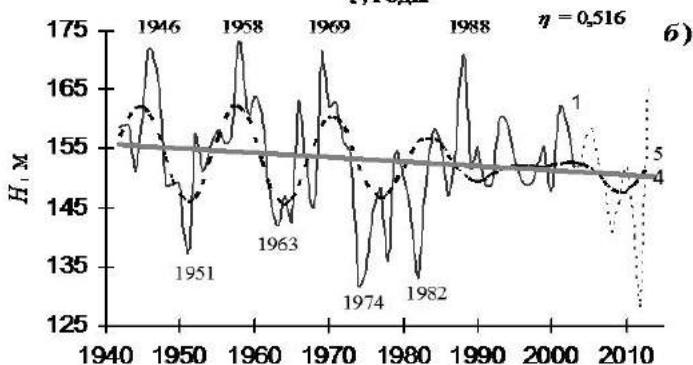
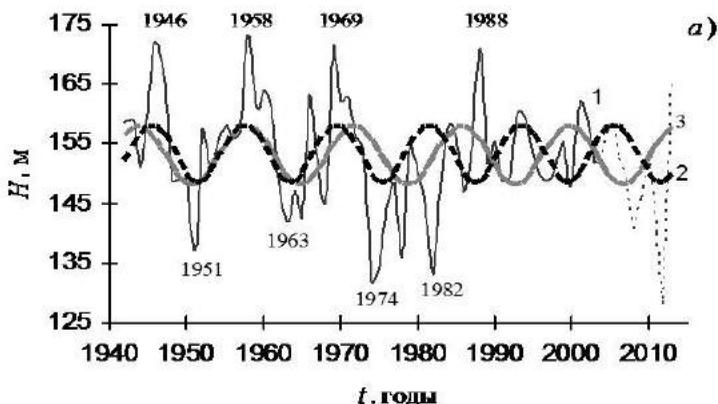
У определенных периодов отмечаются минимумы сумм квадратических разностей аппроксимирующих синусоид и значений ряда. Характеристики синусоид с минимумами сумм квадратических разностей со значениями ряда выделены курсивом. Минимумы этих сумм отмечаются у периодов длиной, соответственно, 3, 6, 8, 12, 14 и 25 лет. В нижних строках (табл. 1) выявленные периоды в колебаниях уровня озера представлены в порядке убывания корреляции  $\eta$  их синусоид с временным рядом. Самая высокая корреляция с рядом уровня отмечается у периодов длиной 14 и 12 лет. Она составила 0,390 и 0,365, соответственно. Эти две синусоиды с наибольшей корреляцией с временным рядом, превышающей 0,35, будем использовать для расчетов поверочного прогноза.

На рис. представлены колебания уровня воды оз. Маркаколь [Мусакулкызы, Мадибеков, 2016], выявленные синусоиды с периодами 12 и 14 лет, тенденция тренда и комбинация этих синусоид и тенденции тренда. У последовательностей повышенных значений уровня озера с максимумами временного ряда 1946, 1958 и 1969 гг. и его пониженных значений с минимумами 1951 и 1963 гг. экстремумы синусоид с

периодами 12 и 14 лет близки друг другу по времени. Экстремум синусоиды с периодом 14 лет несколько опережает соответствующий экстремум 12-летней синусоиды у максимума уровня озера 1946 г. и его минимума 1951 г., у максимума уровня озера 1958 г. эти экстремумы отмечаются практически одновременно.

**Таблица 1. Аппроксимация синусоидальными функциями временного ряда уровня воды оз. Маркаколь (1942–2003 гг.)**

$T$ , годы	$H_0$ , м	$\delta H/2$ , м	$\varphi_H$ , радиан	$S_H$ , м <sup>2</sup>
3,0	153,2775	2,2854	4,1756	4890,386
4,0	153,3246	1,1432	-,1532	5010,476
5,0	153,3127	,1485	1,1332	5050,287
6,0	153,3028	3,1911	4,6408	4740,345
7,0	153,2792	2,0819	2,4486	4917,954
8,0	153,2682	3,3387	,0314	4700,315
9,0	153,3240	1,4267	2,7949	4987,716
10,0	153,3714	2,4240	2,5629	4867,161
11,0	153,1765	4,4659	1,7497	4428,943
12,0	153,3080	4,7237	,7937	4378,584
13,0	153,1685	4,5847	4,0762	4399,329
14,0	152,9807	4,9656	2,6031	4284,018
15,0	153,1674	4,5188	-1,4637	4400,974
16,0	153,4240	3,6297	-,1930	4655,557
17,0	153,4840	2,2330	1,4720	4903,723
18,0	153,3913	1,1720	-1,3958	5008,690
19,0	153,3115	1,4674	4,2768	4987,528
20,0	153,2946	2,1111	-,5672	4916,667
21,0	153,3206	2,5358	3,8733	4848,937
22,0	153,3576	2,7782	-,7113	4801,404
23,0	153,3822	2,9314	-1,3789	4771,890
24,0	153,3883	3,0499	2,1825	4754,858
25,0	153,3830	3,1417	3,9539	4747,649
26,0	153,3749	3,1844	4,1530	4750,168
27,0	153,3676	3,1554	2,9593	4762,074
28,0	153,3605	3,0549	,5248	4780,852
29,0	153,3508	2,9093	3,2639	4802,134
30,0	153,3349	2,7582	-1,2763	4821,370
31,0	153,3092	2,6382	-,4325	4835,208
32,0	153,2713	2,5742	-,4075	4841,865
	<b>T, годы</b>			<b><math>\eta</math></b>
	14,0			0,3897
	12,0			0,3649
	8,0			0,2635
	6,0			0,2480
	25,0			0,2451
	3,0			0,1783



$$H = -0,0756t + 302,42 \quad t, \text{годы}$$

#### Колебания уровня воды оз. Маркоколь – с. Урунхай:

1 – данные наблюдений (пунктиром указан интервал поверочного прогноза 2004–2013 гг.); 2 – аппроксимирующая синусоида с периодом 12 лет; 3 – аппроксимирующая синусоида с периодом 14 лет; 4 – тенденция линейного тренда (его уравнение представлено в левом нижнем углу графика (б)); 5 – комбинация синусоид с периодами 12 и 14 лет и тенденции тренда;  $\eta$  – ее корреляция с временным рядом

У группы пониженных значений с минимумом уровня озера 1963 г. и повышенных значений с максимумом 1969 г. соответствующие экстремумы синусоиды с периодом 14 лет запаздывают к экстремумам гармоника с 12-летним периодом. Разность времени экстремумов синусоид с периодами 14 и 12 лет становится больше в области пониженных значений уровня с минимумами его значений 1974 и 1982 гг., и в дальнейшем эти синусоиды колеблются практически в своих противоположных фазах.

В первой половине анализируемого интервала, на котором соответствующие экстремумы синусоид с периодами 12 и 14 лет близки по времени, их комбинация с тенденцией тренда хорошо описывает группы лет повышенных значений уровня озера с максимумами 1946, 1958 и 1969 гг. и его пониженных значений с минимумами 1951 и 1963 гг. Интервал времени пониженных значений уровня с минимальными значениями 1974 и 1982 гг. описывается меньшей по амплитуде впадиной этой комбинации, поскольку время экстремумов синусоид с периодами 12 и 14 лет значительно расходится на нем.

Сравнительно небольшие по амплитуде колебания уровня озера после 1989 г. отражаются гладкой линией, сформированной комбинацией синусоид с периодами 12 и 14 лет, колеблющихся в разных фазах, и тенденцией тренда. Составленное прогностическое выражение не описывает пик уровня озера 1988 г. Его корреляция с временным рядом равна 0,516.

По прогностическому выражению – комбинации синусоид с периодами 12 и 14 лет и тенденции тренда – проведены расчеты поверочных прогнозов уровня озера с заблаговременностью, соответственно, 5 и 10 лет. Результаты прогнозирования и их оценка представлены в табл. 2.

**Таблица 2. Результаты поверочных прогнозов уровня оз. Маркаколь на 2004–2013 гг.**

$t$ , годы	$H_{ф_5}$ , м	$H_{ср} - H_{ф_5}$ , м	$H_{пр_5}$ , м	$H_{пр} - H_{ф_5}$ , м	$H_{комб_5}$ , м	$H_{комб} - H_{ф_5}$ , м
2004	151,9	1,41	150,92	-0,98	152,46	0,56
2005	158,4	-5,09	150,84	-7,56	151,74	-6,66
2006	152,8	0,51	150,77	-2,03	150,64	-2,16
2007	149,2	4,11	150,69	1,49	149,36	0,16
2008	140,8	12,51	150,62	9,82	148,22	7,42
2009	146,0	7,31	150,54	4,54	147,55	1,55
2010	152,0	1,31	150,46	-1,54	147,63	-4,37
2011	140,0	13,31	150,39	10,39	148,54	8,54
2012	129,0	24,31	150,31	21,31	150,17	21,17
2013	166,0	-12,69	150,24	-15,76	152,19	-13,81
$N_5$		4		3		3
$\delta r/\Delta_5$		0,703		0,628		0,506
$N_{10}$		5		5		5
$\delta r/\Delta_{10}$		1,206		1,105		1,014

В первом столбце этой таблицы указаны годы, на которые проведены расчеты поверочных прогнозов, во втором столбце – фактические значения уровня озера, в третьем – разность среднего за анализируемый интервал (1942–2003 гг.) и фактического значений уровня озера. В четвертом и шестом столбцах представлены результаты расчетов уровня

озера, соответственно, по тенденции тренда и по ее комбинации с синусоидами с периодами 12 и 14 лет, в пятом и седьмом столбцах – их разности с фактическим значением уровня.

Среднее значение временного ряда уровня воды озера за 1942–2003 гг. составило 153,31 м, его среднее квадратическое отклонение – 9,03 м. Допустимая ошибка прогноза оказалась равной 6,08 м. Прогноз на год, таким образом, является оправдавшимся, если разность в столбцах, соответственно, в 3, 5 и 7 меньше этой величины. Прогноз по среднему значению не оправдался в 2008–2009 и 2011–2013 гг. и оказался верным во все остальные годы. Таким образом, прогноз по среднему значению за первые пять лет оправдался 4 раза, а на всем поверочном интервале – 5 раз. Относительная ошибка прогнозов по среднему значению, рассчитанная с учетом разностей, представленных в столбце 3, за первые пять лет составила 0,703, а за весь десятилетний поверочный интервал – 1,206.

Прогнозы по тенденции тренда и по ее комбинации с синусоидами с периодами 12 и 14 лет не оправдались в 2005, 2008, 2011, 2012 и 2013 гг. На интервале 2004–2008 гг. по этим схемам оправдалось по три прогноза, а на всем интервале поверочного прогноза 2004–2013 гг. оказались верными по пять прогнозов. Относительная ошибка прогнозирования по тенденции тренда и по ее комбинации с синусоидами с периодами 12 и 14 лет с заблаговременностью пять лет составила 0,628 и 0,506, соответственно, а с заблаговременностью 10 лет – 1,105 и 1,014.

При прогнозировании с заблаговременностью пять лет по среднему значению прогнозов оправдалось больше, но и относительная ошибка прогнозирования также оказалась выше, чем по тенденции тренда и ее комбинации с синусоидами с периодами 12 и 14 лет. Поскольку по одному критерию оценки результатов прогнозы лучше по среднему значению, а по другому – по тенденции тренда и по ее комбинации с выявленными синусоидами, можно заключить, что результаты прогнозов по среднему значению, по тенденции тренда и по ее комбинации с синусоидами примерно одного качества.

## Литература

*Аполлов Б. А., Калинин Г. П., Комаров В. Д.* Курс гидрологических прогнозов. Л.: Гидрометеоздат, 1974. 419 с.

*Бабкин А. В.* Усовершенствованная модель оценки периодичности изменений уровня и элементов водного баланса Каспийского моря // Метеорология и гидрология. 2005. № 11. С. 63–73.

*Бабкин А. В., Семейкин Н. И.* Многолетние колебания и долгосрочное прогнозирование годового стока р. Нева // Изв. Русского географического общества. 2014. № 1. С. 43–48.

*Линник Ю. В.* Метод наименьших квадратов. М.: Наука, 1962. 350 с.

Мусакулкызы А., Мадибеков А. С. Современный уровенный режим озера Маркаколь // Междунар. науч.-практ. конф. «Водные ресурсы Центральной Азии и их использование», посвящ. подведению итогов объявленного ООН десятилетия «Вода для жизни» (Алматы, 22–24 сент. 2016 г.). Алматы, 2016. С. 360–365.

Филонец П. П., Омаров Т. Р. Озера Северного, Западного и Восточного Казахстана (справочник). Л.: Гидрометеиздат, 1974. 138 с.

## LATENT PERIODS OF FLUCTUATION AND LONG-RANGE FORECASTING OF THE WATER LEVEL OF LAKE MARKAKOL

A. V. Babkin<sup>1</sup>, A. S. Madibekov<sup>2</sup>, A. Mussakulkyzy<sup>2</sup>, A. V. Cherednichenko<sup>3</sup>

<sup>1</sup>*Russian State Hydrometeorological University*

<sup>2</sup>*The Institute of Geography in Kazakhstan*

<sup>3</sup>*«Жасыл даму», Kazakhstan*

The analysis of the time series of Lake Markakol water level by the method of periodicities revealed its oscillations to contain sinusoids with periods of 12 and 14 years. The training forecasts of lake level by the trend tendency and by its combination with these sinusoids were computed with the lead time of 5 and 10 years. The evaluation of the forecast results against new independent data permitted to conclude that forecasts based on the combination of sinusoids and trend tendency are better than those based on trend tendency alone, and no worse than prediction based on mean value.

## ИССЛЕДОВАНИЕ МНОГОЛЕТНЕГО ЛЕДОВОГО РЕЖИМА ОНЕЖСКОГО ОЗЕРА

**В. Н. Баклагин**

*Институт водных проблем Севера КарНЦ РАН*

В работе представлены результаты статистического анализа данных о ледовом покрове Онежского озера за период 1956–2016 гг., полученных в результате авиационных и спутниковых съемок. Рассчитаны среднестатистические сроки и длительности фаз ледового режима Онежского озера. Выявлены тенденции многолетней изменчивости ледового режима Онежского озера за последние 60 лет.

### Введение

Ледовый покров является неотъемлемой частью термического ежегодного цикла Онежского озера и влияет на обменные процессы между водой и атмосферой в зимний период [Kondratyev, Filatov, 1999]. Установление льда на озере в зимний период сокращает поступление солнечного света, необходимого для фотосинтеза, задерживает

поступление кислорода, влияет на формирование климата, поэтому оказывает непосредственное влияние на водную экосистему озера [Karetnikov, Naumenko, 2008; Меншуткин, Филатов, 2016].

С. А. Каретниковым и М. А. Науменко были проведены исследования статистических характеристик ледового покрова Ладожского озера [Karetnikov, Naumenko, 2008, 2011]. Авторами собраны данные о состоянии ледового покрова Ладожского озера с 1943 г. и выявлены основные закономерности, а также тенденции в отношении многолетнего изменения протекания ледового режима Ладожского озера за последние 65 лет. Аналогичные исследования были ранее проведены для Великих Американских озер [Assel et al., 2003].

Целью данного исследования является расчет основных статистических характеристик ледового режима Онежского озера, которые включают длительности и сроки фаз ледового режима, а также выявление глобальных многолетних трендов изменения протекания ледового режима озера.

### **Материалы и методы**

Онежское озеро является одним из крупнейших озер Европы с общей площадью акватории 9700 км<sup>2</sup> и объемом 285 000 м<sup>3</sup>.

Наблюдения за пространственным распределением льда на Онежском озере велись с 1955 г. Гидрометеорологической службой с помощью авиаразведок [Усачев и др., 1985]. Ежегодно в зимний период выполнялось от 10 до 20 вылетов.

С 1978 г. Северо-западным управлением государственного комитета СССР по гидрометеорологии и контролю природной среды получены картосхемы распределения льда и температуры поверхности воды Онежского озера, выполненные в результате регистрации электромагнитных волн в инфракрасном диапазоне с самолета (рис. 1).

С 1972 г. Национальным центром США ведутся наблюдения за концентрацией арктического льда (платформы спутников: AIRCRAFT, DMSP, MODELS, NIMBUS-7, NOAA POES, SATELLITES, SHIPS). Пространственное разрешение полученных данных составляет 25×25 км, временной шаг наблюдений – 7 дней. Ряды пространственных данных об арктическом льде представлены в бинарных файлах (<ftp://sidads.colorado.edu/pub/DATASETS/NOAA/G02172/weekly/>). Несмотря на низкое пространственное разрешение представленных данных, можно выполнить расчет ледовитости Онежского озера, а также рассчитать сроки фаз ледового режима.

С 1997 г. Интерактивной многосенсорной системой снежного и ледового картирования Национального ледового центра США

представлены данные о ледовом покрове Северного полушария планеты, выполненные в трех пространственных разрешениях: 1 км, 4 км (доступны с 2004 г.) и 24 км с временным шагом 1 день (платформы спутников: AQUA, DMSP, DMSP 5D-3/F17, GMS, GMS-5, GOES-9, 10, 11, 13, METEOSAT, MSG, MTSAT-1R, 2, NOAA-14, 15, 16, 17, 18, N, RADARSAT-2, SUOMI-NPP, TERRA). Ряды пространственных данных о ледовом покрове Северного полушария планеты доступны в бинарных файлах (<ftp://sidads.colorado.edu/pub/DATASETS/NOAA/G02156/>).

а)



б)

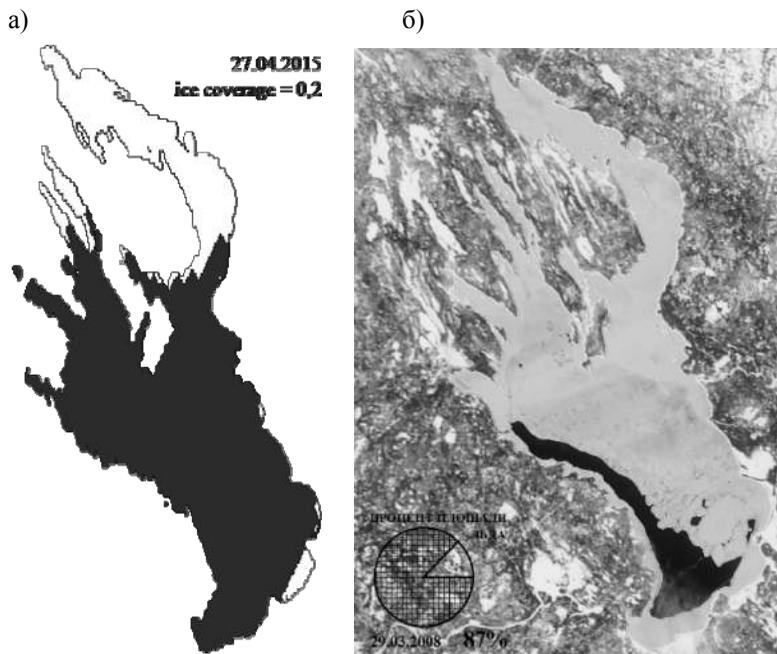


**Рис. 1. Картохема авиасъемки распределения льдов и температуры воды Онежского озера 18 декабря 1980 г.:**

а – отсканированное изображение авиасъемки; б – оцифрованное векторное изображение с расчетом площадных характеристик льдов

С 2006 г. спутниками AQUA и TERRA ведется съемка местности в видимом диапазоне, в том числе территории Республики Карелия, где расположены Онежское и Ладожское озера (<https://lance3.modaps.eosdis.nasa.gov/imagery/subsets/?subset=Karelia>).

С помощью программ анализа спутниковой информации [Баклагин, 2015] выполнена идентификация данных о ледовом покрове Онежском озере по географическим координатам и проведены необходимые расчеты значений ледовитости озера (рис. 2).



**Рис. 2. Расчет ледовитости с помощью программы анализа спутниковой информации [Баклагин, 2015]:**

а – визуализированные данные Национального ледового центра США о ледовом покрове Онежского озера 27.04.2015; б – снимок Онежского озера сенсора MODIS (платформа спутника TERRA) 29.03.2008

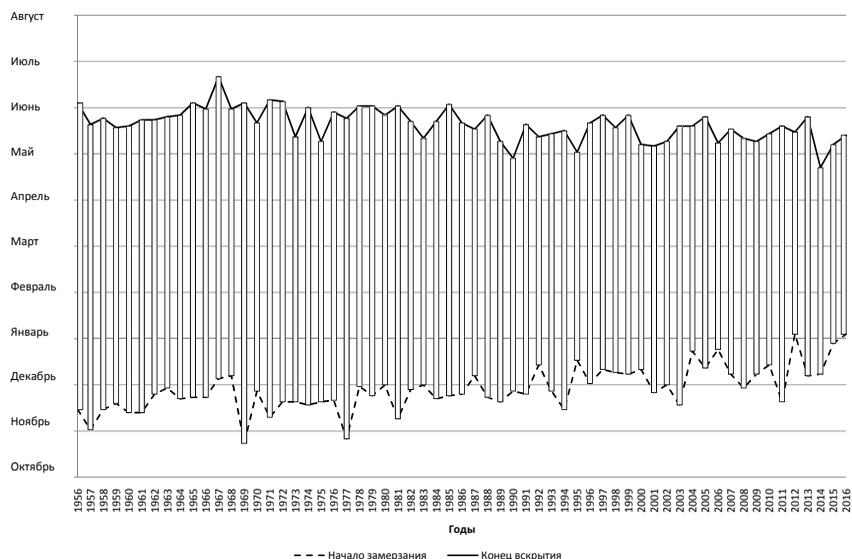
В результате сбора информации о распределении льдов Онежского озера с 1956 г. получен временной ряд значений ледовитости Онежского озера за последние 60 лет, который насчитывает 2733 значения.

### Результаты и обсуждение

Статистический анализ полученного временного ряда показал, что в среднем ледовый режим на Онежском озере длится 172 дня (среднее квадратичное отклонение  $\delta = 21$  день, коэффициент вариации ряда  $v = 0,12$ ). Среднестатистические сроки начала замерзания и конца вскрытия соответствуют датам 29 ноября ( $\delta = 15$  дней) и 19 мая ( $\delta = 9$  дней). Ежегодно Онежское озеро полностью покрывается льдом (наступает полный ледостав) на период, который в среднем длится 104 дня ( $\delta = 24$  дня,  $v = 0,23$ ). Среднестатистические сроки начала и конца ледостава соответствуют датам 12 января ( $\delta = 16$  дней) и 25 апреля ( $\delta = 15$  дней).

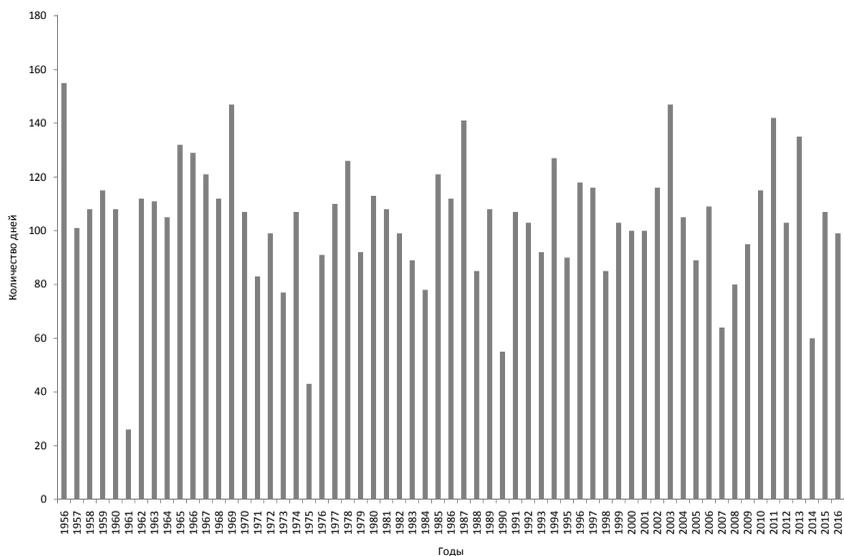
При этом среднестатистические продолжительности фаз замерзания и вскрытия соответствуют значениям 44 дня ( $\delta = 20$  дней,  $\nu = 0,45$ ) и 24 ( $\delta = 13$  дней,  $\nu = 0,57$ ) дня.

На рис. 3 приведены даты начала и окончания ледового режима Онежского озера за период 1956–2016 гг.



**Рис. 3. Даты начала и конца ледового режима Онежского озера за период 1956–2016 гг.**

Линейный регрессионный анализ показал, что присутствует устойчивый многолетний восходящий тренд в отношении сдвига начала ледового режима Онежского озера, составляющий 0,55 дня/год (коэффициент детерминации линейной регрессии  $R^2 = 0,44$ ). Также выявлен устойчивый многолетний нисходящий тренд в отношении сдвига конца ледового режима Онежского озера, он составляет  $-0,29$  дня/год ( $R^2 = 0,29$ ). В целом продолжительность ледового режима Онежского озера имеет стабильные тенденции на снижение:  $-0,84$  дня/год ( $R^2 = 0,53$ ). Это свидетельствует о многолетних изменениях климатических условий, которые способствуют сокращению длительности ледового режима Онежского озера. При этом продолжительность ежегодного ледостава Онежского озера (рис. 4) не имеет значимых тенденций к изменению:  $-0,09$  дня/год ( $R^2 = 0,00$ ).



**Рис. 4.** Длительности ледостава Онежского озера за период 1956–2016 гг.

### Выводы

Статистический анализ многолетних данных о ледовом покрове Онежского озера за период 1956–2016 гг. показал, что в среднем фаза замерзания Онежского озера длится в 1,8 раза дольше, чем фаза вскрытия. Средние скорости изменения ледовитости в фазы замерзания и вскрытия соответствуют значениями 0,023/день и 0,042/день.

В целом за период 1956–2016 гг. на Онежском озере имеется тенденция к сокращению длительности ледового режима:  $-0,84$  дня/год ( $R^2 = 0,53$ ). При этом сокращение происходит за счет сокращения длительности фаз замерзания и вскрытия, в то время как длительность ледостава с течением лет остается без значимых изменений:  $-0,09$  дня/год ( $R^2 = 0,00$ ).

Работа выполнена по гранту РФФИ № 14-17-00740-П и гранту фонда «ELEMО» (Швейцария), в рамках которого получены данные.

### Литература

*Баклагин В. Н.* Программа для классификации водных объектов на RGB-синтезированном изображении многозональной спутниковой съемки: свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2015663046 от 09.12.2015.

*Баклагин В. Н.* Совершенствование метода дешифрирования космических снимков больших озер на классы «вода»-«лед» // *Современные проблемы науки и образования*, 2015 (2), url: <http://www.science-education.ru/131-23900>.

*Менишуткин В. В., Филатов Н. Н.* Модель подледной экологической системы крупного озера, основанная на применении клеточных автоматов // Тр. КарНЦ РАН, сер. Лимнология. 2016. № 5. С. 76–87.

*Усачев В. Ф., Прокачева В. Г., Бородулин В. В.* Оценка динамики озерных льдов, снежного покрова и речных заливов дистанционными средствами. Л.: Гидрометеоздат, 1985. 103 с.

*Assel R., Cronk K., Norton D.* Recent trends in Laurentian Great Lakes ice cover // *Climatic Change*. 2003. N 57. P. 185–204.

*Karetnikov S. G., Naumenko A. M.* Recent trends in Lake Ladoga ice cover // *Hydrobiologia*. 2008. N 599. P. 41–48.

*Karetnikov S. G., Naumenko A. M.* Lake Ladoga ice phenology: Mean condition and extremes during the last 65 years // *Hydrological processes*. 2011. N 25. P. 2859–2867.

*Kondratyev K. Y., Filatov N. N.* Limnology and Remote Sensing: A Contemporary Approach. Springer-Praxis Series in Remote Sensing. 1999. Vol. 1. 406 p.

## **STUDY OF THE LONG-TERM ICE REGIME OF LAKE ONEGO**

**V. N. Baklagin**

*Northern Water Problems Institute, KarRC RAS*

The paper presents the results of a statistical analysis of data on the ice cover of Lake Onego for the period 1956–2016, obtained as a result of aerial and satellite surveys. The average time and duration of ice regime phases in Lake Onego are calculated. The tendencies of the long-term variability of the ice regime of Lake Onego during the last 60 years are revealed.

## **ВОЛНОВАЯ АКТИВНОСТЬ В МЕЛКОВОДНОМ ОЗЕРЕ ПОДО ЛЬДОМ**

**С. Р. Богданов, С. Ю. Волков, Г. Э. Здоровеннова, Р. Э. Здоровеннов,  
Н. И. Пальшин, А. Ю. Тержевик**

*Институт водных проблем Севера КарНЦ РАН*

Многолетние экспериментальные исследования мелководного озера Вендюрское свидетельствуют о присутствии разнообразных гидродинамических процессов в водной толще подо льдом. Особый интерес представляет волновая активность и, в частности, взаимодействие баротропных сейш и внутренних волн, обуславливающее достаточно сложную пространственную структуру температурного поля и предположительно играющее значительную роль в интенсификации процессов теплообмена. Для изучения этой структуры были проведены направленные эксперименты с использованием трех горизонтально разнесенных термоксов с дискретностью датчиков по вертикали 0,5 м. Анализ данных не только подтвердил существование многомодовой вертикальной структуры, но и позволил обнару-

жить ее периодичность по горизонтали. Количественные оценки размеров колебательных ячеек и групповой скорости внутренних волн согласуются с соответствующими теоретическими значениями.

## Введение

В последние годы значительно возрос интерес к зимней лимнологии [Kirillin et al., 2012]. Было установлено, что в водной толще подо льдом присутствуют различные типы движений, характеризующиеся широким спектром пространственных и временных масштабов – от общеозерной циркуляции и циклонических структур [Malm et al., 1998; Kirillin et al., 2015] до придонных сдвиговых течений и мелкомасштабной турбулентности [Wüest, Lorke, 2003]. Несмотря на относительно слабую энергетику, механизмы указанных процессов достаточно сложны, взаимосвязаны и взаимообусловлены, их изучение связано с решением ряда фундаментальных проблем, известных также в океанологии и метеорологии. В качестве примера можно привести проблемы конверсии приливов [Garrett, Kunze, 2007], устойчивости стратифицированных сдвиговых течений [Lott et al., 1992], взаимодействия баротропных колебаний с крупномасштабными движениями [Lelong, Kunze, 2013]. Важно отметить, что в ряде случаев лимнологический вариант проблем оказывается в некотором смысле эталонным: задачи естественным образом рафинируются за счет, например, исключения прямого влияния ветровой нагрузки и упрощения граничных условий. При этом интерес представляют даже результаты, полученные при изучении малых озер. В данной работе представлены некоторые результаты исследований динамики полей температуры в небольшом озере Вендюрском (юг Карелии) в период ледостава, представляющие интерес, прежде всего, в связи с проблемами возникновения и взаимодействия баротропных и бароклинных сейшевых колебаний и внутренних волн.

## Постановка проблемы

Уже в первые сезоны систематических наблюдений на оз. Вендюрском было обнаружено присутствие колебаний физических полей с периодами, близкими к 7 и 27 минутам [Malm et al., 1998]. Эти значения весьма близки к периодам первых мод поперечной и продольной баротропных сейш озера, если для их оценки использовать формулу Мериана  $T = 2\sqrt{L^2 / gH}$  с характерными значениями 7 км, 1,5 км, 5,3 м для продольных и поперечных размеров озера, а также его средней глубины. В последующем были также обнаружены устойчивые колебания температуры с периодами 10 и 17 минут, которые сопоставимы с периодами высших гармоник продольной и поперечной сейш. Оценки периодов указывают на

присутствие баротропных сейш, однако амплитудные характеристики наблюдаемых колебаний не согласуются с такой непосредственной их интерпретацией. Так, в частности, характерным значениям  $0,01\text{ }^{\circ}\text{C}$  и  $0,3\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{м}$  амплитуды пульсаций температуры и ее среднего градиента соответствует амплитуда колебаний глубины залегания изотерм порядка нескольких сантиметров, а в отдельных случаях –  $15\text{--}20\text{ см}$ . Такие значения как минимум на порядок превышают оценки, соответствующие баротропному сценарию, а также непосредственным измерениям [Malm et al., 1998] амплитуды колебаний ледяного покрова ( $\sim 2\text{--}3\text{ мм}$ ) и горизонтальной скорости ( $\sim 1\text{ мм}/\text{с}$ , что соответствует горизонтальным смещениям  $\sim 1\text{ м}$ ). Также было обнаружено, что колебания температуры имеют и ряд других особенностей. В частности, амплитуды пульсаций существенно неоднородны по вертикали, при этом между колебаниями на некоторых горизонтах часто наблюдается устойчивый сдвиг фаз [Palshin et al., 2017]. Эти особенности могут свидетельствовать о бароклинной природе колебаний, точнее, сосуществовании баротропной сейши с внутренними волнами (ВВ) той же частоты.

Подобная ситуация, как уже отмечалось, типична и для океанов, где наряду с обычными приливами существуют и порождаемые ими внутренние приливы. В настоящее время наиболее общепринятая версия этого механизма – резонансное возбуждение внутренних волн за счет взаимодействия приливов с неоднородностями дна [Garrett, Kunze, 2007].

В рамках резонансного механизма порождения ВВ особого внимания заслуживают результаты, относящиеся к оценкам фазовой и групповой скорости и сопоставлению «модовой» и «лучевой» трактовок волн. Дисперсионное соотношение, определяющее фазовую скорость, в данном случае можно представить в виде:

$$\frac{\omega}{N} = \frac{k}{\sqrt{k^2 + m^2}} \quad (1)$$

Здесь  $k$  и  $m$  – горизонтальная и вертикальная компоненты волнового вектора,  $\omega$  – частота прилива,  $N$  – частота Брента-Вяйсяля. В «лимнологическом» варианте вертикальное волновое число определяется глубиной  $H$ :  $m = \pi n / H$ . При этом скорости частиц (в случае, когда величина  $N$  не изменяется с глубиной) направлены по прямым, перпендикулярным волновому вектору  $k$ . Эти же прямые задают направление групповой скорости и «лучей», вдоль которых происходит перенос энергии [Тернер, 1977]. Угол  $\alpha$  наклона «лучей» в соответствии с (1) однозначно определяется лишь базовыми частотами:

$$\text{tg } \alpha = \omega / \sqrt{N^2 - \omega^2} \quad (2)$$

и не зависит от номеров мод. Последнее обстоятельство приводит к тому, что при некоторых условиях (например, при топографическом варианте возбуждения, – в случае больших наклонов дна) происходит концентрация энергетических потоков в узких полосах, примыкающих к «лучам» [Balmforth et al., 2002]. При этом вся толща воды разбивается на ячейки, внутри которых происходит сейшеобразное движение. В зонах, прилегающих к лучам, существует достаточно большой сдвиг скорости. Соответственно, при достижении порогового значения параметра Ричардсона  $Ri$  может возникнуть неустойчивость и интенсификация локального перемешивания. Отмеченные особенности внутренних приливов обуславливают их значимость при решении целого ряда океанологических проблем, таких, например, как перемешивание глубинных слоев и формирование крупномасштабных течений (в том числе – за счет взаимодействия и разрушения ВВ, параметрического резонанса с инерционными волнами) [Gayen, Sarkar, 2013] и т. д.). Особую роль ВВ играют и в лимнологическом варианте отмеченных проблем, что обуславливает интерес к их изучению. Физическое отличие заключается лишь в том, что роль приливов играют баротропные сейши.

В этой связи в рамках изучения зимнего термического режима Вендюрского озера в феврале 2014 и 2016 гг. были проведены специальные эксперименты (Э1 и Э2, соответственно), нацеленные на обнаружение внутренних волн и определение их параметров.

### Описание эксперимента

Одна из главных задач экспериментов заключалась в выявлении вертикальной и горизонтальной структуры поля температуры и оценке соответствующих геометрических параметров, характеризующих предположительно ячейковую структуру. С этой целью использовались 3 и 4 температурных косы с дискретностью датчиков по вертикали – 0,5 м при общем количестве датчиков 13–15 и 12–14 на каждой косе в Э1 и Э2, соответственно.

При планировании горизонтальной разнесенности кос за основу было принято вытекающее из (1) соотношение  $k = \frac{\pi n}{H} \sqrt{\omega^2 / (N^2 - \omega^2)}$  для горизонтального волнового числа  $k$ ;  $n$  – номер вертикальной моды. Согласно этому соотношению с учетом отношения частот  $N/\omega \approx 1/3$  для горизонтальной длины волны  $\lambda$  получаем оценку  $\lambda \sim 6H/n$ . Данные, полученные в предшествующих опытах, достаточно фрагментарны, однако определенно указывают на возможность реализации в течение длительных промежутков времени не только основной вертикальной моды, но и многомодовых структур, соответствующих значениям  $n = 2, 3$  и более.

В этом случае при характерной глубине  $H \sim 6$  м характерный горизонтальный размер  $\lambda$  ячейки может составлять 12, 24 и 36 м. В связи с этими оценками температурные косы в Э1 были установлены вдоль основной оси озера на расстоянии 50 м друг от друга (глубины от 7 до 8 м) и аналогично – в Э2, но на расстоянии 4 м (глубины от 6 до 7 м).

### Анализ результатов и обсуждение

Температурное поле в обоих опытах оказалось достаточно сложным и изменчивым, что свидетельствует о присутствии достаточно активных волновых процессов. При этом пространственная и временная сложность структуры – достаточно ожидаемая: в водной толще присутствуют продольные и поперечные баротропные сейши и их высшие гармоники; интенсивность этих «источниковых» движений достаточно переменчива, определяется, в частности, метеорологическими факторами. Не исключена также множественность механизмов конверсии: помимо топографии дна определенную роль может играть взаимодействие баротропных колебаний с крупномасштабными течениями, придонными сдвиговыми слоями. Определенную роль, возможно, играет и отражение волн от внутренней поверхности льда.

Бароклинная компонента температурного поля, как уже отмечалось, представляет особый интерес, так как интенсификация теплообмена во многом определяется именно взаимодействием и разрушением ВВ. Присутствие этой компоненты, причем в качестве доминирующей, обнаруживается практически во всех достаточно крупных временных выборках. Свойства температурного поля, указывающие на такое присутствие, можно разделить на три группы.

*Неоднородность температурного поля по глубине. Вертикальные моды.* Показания датчиков на каждой температурной косе свидетельствуют о сложной вертикальной структуре поля. В частности, амплитуда колебаний температуры весьма неоднородна по глубине: в водной толще чередуются слои с интенсивными и относительно слабыми колебаниями. При этом часто наблюдается многомодовая вертикальная структура, с двумя и более максимумами. Кроме того, в отличие от баротропных сейш, существенно зависят от глубины не только амплитуды, но и фазы колебаний. Более того, значение характерного сдвига фаз, как правило, близко к  $\pi$ , что может свидетельствовать о присутствии стоячих ВВ, возникающих при отражении от границы вода – лед.

*Горизонтальная неоднородность температуры. Волновые ячейки.* Результаты, представленные в предыдущем подразделе, лишь подтвердили выводы, полученные ранее при анализе данных температурных кос в предшествующие годы, когда разрешение по вертикали было значительно меньшим [Palshin et al., 2017].

Использование нескольких горизонтально разнесенных кос в экспериментах Э1 и Э2 позволило существенно расширить круг задач, в частности, при заданной глубине изучить корреляцию колебаний на разных косах. При этом, по существу, задача заключалась в обнаружении характерной ячеистой структуры, формирующейся в жидкости в присутствии ВВ. Амплитуда колебаний в таких ячейках максимальна на границах, внутри же каждой из них происходят сейшеподобные колебания [Balmforth et al., 2002].

Результаты обоих экспериментов свидетельствуют в пользу существования такой структуры. А именно, было установлено, что в течение значительных (несколько часов) промежутков времени пульсации температуры на одинаковых горизонтах всех кос были когерентны, но существенно сдвинуты по фазе. При этом для трех кос, расположенных вдоль основной оси озера, типичной оказывалась ситуация, когда колебания температуры на одном горизонте на двух датчиках происходили синхронно, а на третьем – с фазовым сдвигом, близким к  $\pi$ . Пульсации вычислялись по отклонению от 27-минутного скользящего среднего с последующим исключением высокочастотного сигнала путем 8-минутного сглаживания. Значение периода сглаживания было выбрано с целью исключения пульсаций, связанных с поперечной ( $\sim 7$  минут) сейшей. Коэффициенты корреляций  $R^2$  при этом достигали значений 0,76.

Подобная динамика пульсаций температуры на одинаковых горизонтах разных кос может возникать в случаях, когда два датчика расположены внутри одной ячейки, а третий – в соседней. Такая ситуация возможна в случаях, когда расстояния между датчиками сопоставимы с размерами / ячеек.

*«Всплески» и скачки. Оценки групповой и фазовой скоростей.* За время проведения обоих экспериментов было выявлено несколько событий, заключавшихся в резком увеличении амплитуды пульсаций. Примечательно при этом, что подобные скачки температуры распространялись в горизонтальном и вертикальном направлении с некоторым запаздыванием по времени.

Подобные возмущения должны распространяться с групповой скоростью в направлении волновых лучей, которое задается формулой (2). Эту скорость и направление можно оценить по времени задержек сигнала. При этом для горизонтальной и вертикальной компоненты групповой скорости были получены приблизительные значения 1 мм/с и 5 мм/с. Величина модуля групповой скорости оказалась весьма близкой к теоретическому значению  $\frac{N}{m} (1 - \frac{\omega^2}{N^2})$  для первой вертикальной моды, но наклон

лучей – несколько заниженным по сравнению с оценкой (2). Последнее, однако, может быть связано с искривлением лучей за счет неоднородности вертикального профиля частоты Брента-Вяйсяля.

Анализ результатов экспериментов достаточно убедительно свидетельствует о постоянном присутствии коротких внутренних волн в мелководном озере в зимний период и их существенном влиянии на термический режим.

Исследование выполнено при финансовой поддержке гранта РФФИ № 16-05-00436\_a.

### Литература

- Тернер Дж.* Эффекты плавучести в жидкостях. М.: Мир, 1977. 430 с.
- Balmforth N. J., Ierley G. R., Young W. R.* Tidal conversion by subcritical topography // *J. Phys. Oceanogr.* 2002. N 32. P. 2900–2914.
- Garrett C., Kunze E.* Internal Tide Generation in the Deep Ocean // *Annu. Rev. Fluid Mech.* 2007. N 39. P. 57–87.
- Gaven B., Sarkar S.* Degradation of an internal wave beam by parametric subharmonic instability in an upper ocean pycnocline // *J. Geophys. Res.: Oceans.* 2013. T. 118, N 9. P. 4689–4698.
- Kirillin G., Leppäranta M., Terzhevik A. et al.* Physics of seasonally ice-covered lakes: a review // *Aquatic Sciences.* 2012. T. 74, N 4. P. 659–682.
- Kirillin G. B., Forrest A. L., Graves K. E. et al.* Axisymmetric circulation driven by marginal heating in ice-covered lakes // *Geophys. Res. Lett.* 2015. N 42. P. 2893–2900.
- Lelong M., Kunze E.* Can barotropic tide–eddy interactions excite internal waves? // *Journal of Fluid Mechanics.* 2013. N 721. P. 1–27.
- Lott F., Kelder H., Teitelbaum H.* A transition from Kelvin-Helmholtz instabilities to propagating wave Instabilities // *Phys. Fluids A.* 1992. T. 4, N 9. P. 1990–1997.
- Malm J., Bengtsson L., Terzhevik A. et al.* Field study on currents in a shallow, ice-covered lake // *Limnol. Oceanogr.* 1998. T. 43, N 7. P. 1669–1679.
- Palshin N. I., Bogdanov S. R., Zdorovenнова G. E. et al.* Short internal waves in a small ice-covered lake // *Water Resources.* 2017 (In press).
- Wüest A., Lorke A.* Small-scale hydrodynamics in lakes // *Annu. Rev. Fluid Mech.* 2003. N 35. P. 373–412.

### WAVE ACTIVITY IN AN ICE-COVERED SHALLOW LAKE

**S. R. Bogdanov, S. Yu. Volkov, G. E. Zdorovenнова, R. E. Zdorovenнов,  
N. I. Palshin, A. Yu. Terzhevik**

*Northern Water Problems Institute, KarRC RAS*

Thorough long-term studies of a shallow lake Vendyurskoe revealed a variety of hydrodynamical processes in the water column under ice. Of primary interest amongst them is the wave activity and especially barotropic seiches – internal waves interaction,

which is presumably the main factor governing the complicated vertical structure of temperatures. Besides, it is widely believed that this interaction contributes to heat and mass transfer. To shed light on the details of the of water temperature spatial structure some experiments were specially designed and carried out by exploring three horizontally separated thermistor chains with 0.5 m vertical discreteness of sensors. The obtained data confirmed the multimode character of the vertical structure. At the same time, its horizontal periodicity was detected. Based on these findings, internal waves length scales and group velocity were estimated, clearly demonstrating a good agreement with theoretical predictions.

## **ЗИМНЯЯ ТЕРМОДИНАМИКА ВОДОЕМА НА ПРИМЕРЕ СЕВЕРО-ВОСТОЧНОЙ ЧАСТИ АЗОВСКОГО МОРЯ**

**А. Е. Букатов<sup>1</sup>, Д. Д. Завьялов<sup>1</sup>, О. С. Завьялова<sup>2</sup>**

*<sup>1</sup>Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь*

*<sup>2</sup>Севастопольский государственный университет*

На основе одномерной термодинамической модели, адаптированной к физико-географическим условиям восточной части Таганрогского залива, исследована сезонная эволюция толщины образующегося морского льда зимой 2007–2008 гг. Выполнен анализ зависимости региональной изменчивости толщины льда от метеорологических и гидрологических условий. Проведено сопоставление результатов моделирования с натурными данными, полученными на береговой научно-экспедиционной базе ЮНЦ РАН в Кагальнике.

Таганрогский залив является крупнейшим и наиболее изолированным заливом Азовского моря. Высокую временную и пространственную изменчивость гидродинамического и термодинамического режимов Таганрогского залива определяют его географическое положение и мелководность. Важным элементом в формировании гидрологического режима акватории и состояния его поверхности является ледяной покров. Раньше всего ледообразование начинается в восточной части Таганрогского залива. Ледовитость в заливе увеличивается в направлении с юго-запада на северо-восток. Сплошной неподвижный ледяной покров неоднократно взламывается в течение зимнего сезона. Наиболее устойчив он в устье Дона и в крайней восточной части залива.

Термическая эволюция снежно-ледяного покрова описывается локально-одномерной термодинамической моделью. Неподвижный морской лед (припай) представляется однородной пластиной, на верхней границе которой накапливается или тает снег. Основными уравнениями модели являются [Иванов, Макштас, 1990; Cheng et al., 2013; Клячкин и др., 2015]:

$$(\rho c)_{i,s} \frac{\partial T_{i,s}(z,t)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left( k_{i,s} \frac{\partial T_{i,s}(z,t)}{\partial z} \right) - \frac{\partial I_{i,s}(z,t)}{\partial z}, z \in [0, h_i(t)] \quad (1)$$

$$-k_{i,s} \frac{\partial T_{i,s}}{\partial z} = F_t(T_{sfc}), z=0 \quad (2)$$

$$k_s \frac{\partial T_s}{\partial z} = k_i \frac{\partial T_i}{\partial z}, T_s = T_i, z = h_s(t) \quad (3)$$

$$-k_i \frac{\partial T_i}{\partial z} = F_b(T_f, T_w), T_i = T_f, z = h_i(t) \quad (4)$$

$$-\rho_{i,s}(L_f)_{i,s} \frac{\partial h_{i,s}}{\partial t} = F_t(T_{mi,s}) + k_{i,s} \frac{\partial T_{i,s}}{\partial z}, z=0 \quad (5)$$

$$-\rho_i(L_f)_i \frac{\partial h_i}{\partial t} = F_b(T_f, T_w) - k_i \frac{\partial T_i}{\partial z}, z = h_i(t) \quad (6)$$

$$\frac{\partial T_w}{\partial t} \rho_w c_w h_w = F_b - F_t - v \rho_s (L_f)_s, \quad z \in [0, h_w] \quad (7)$$

Здесь  $t$  – время;  $z$  – вертикальная координата, ось  $z$  направлена вниз от верхней поверхности снежно-ледяного покрова ( $z = 0$ );  $\rho$ ,  $h$ ,  $T$ ,  $c$ ,  $k$ ,  $L_f$  – плотность, толщина, теплоемкость, теплопроводность, теплота плавления, соответственно;  $I$  – проникающая в поверхностный слой солнечная радиация;  $T_{sfc}$ ,  $T_{mi,s}$ ,  $T_f$  – температура на верхней поверхности снежно-ледяного покрова, температура плавления льда/снега, температура замерзания воды;  $v$  – скорость выпадения твердых осадков. Индексы  $i$ ,  $s$ ,  $w$ ,  $a$  относятся к параметрам льда, снега, воды и атмосферы, соответственно. Скорость термической эволюции снежно-ледяного зависит от разности между потоком тепла из атмосферы через верхнюю границу льда  $F_t$  и потоком тепла от воды к нижней границе  $F_b$ . Уравнения теплопроводности для случая горизонтально-однородного снежно-ледяного покрова представляют (1), с граничными условиями на верхней поверхности (2), на поверхности раздела снег – лед (3), на нижней поверхности ледяного покрова (4). На движущихся границах раздела различных фаз вещества выполняется закон сохранения энергии при фазовых переходах (5), (6). Если снежно-ледяной покров отсутствует, то происходит прогрев или охлаждение перемешанного квазиоднородного слоя воды  $h_w$  (7). Начальные температура и соленость воды  $S_w$  (‰) считаются заданными. Термодинамическая модель учитывает изменения солености воды, возникающие в процессе фазовых превращений на нижней поверхности ледяного покрова и солености морского льда  $S_i$ . Численная реализация термодинамической модели проводилась при значениях параметров, приведенных в табл.

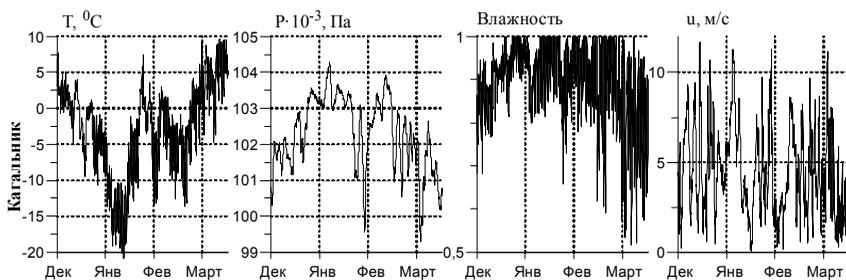
### Параметры термодинамической модели

Плотность воздуха ( $\rho_a$ , кг/м <sup>3</sup> )	$\rho_a = 1,3 \text{ кг/м}^3$
Плотность воды ( $\rho_w$ , кг/м <sup>3</sup> )	$\rho_w = 1 + 0.001(0.82S_w + 0.0689T_w - 0.0039S_w T_w - 0.00918T_w^2)$
Плотность льда ( $\rho_i$ , кг/м <sup>3</sup> )	$\rho_i(T_i) = 917 \cdot (1 - 1.58 \cdot 10^{-4} T_i)(1 - n)$ , $n = 5.25 \cdot 10^{-4} T_a - 2.35 \cdot 10^{-2}$ , $T_i = 0,5(T_{stc} + T_f)$
Плотность снега ( $\rho_s$ , кг/м <sup>3</sup> )	$\rho_s = \min(\rho_{s \max}, \rho_{s \min}/(1 - hsc/\rho_w), \rho_{s \max} = 400 \text{ кг/м}^3$ , $\rho_{s \min} = 100 \text{ кг/м}^3$ , $c = 200 \text{ кг/м}^4$
Соленость воды ( $S_w$ , ‰)	$S_w = 2 \text{ ‰}$
Изменение солености воды ( $\Delta S_w$ , ‰)	$\Delta S_w = S_i \Delta h_i / (h_w + \Delta h_i)$ , $\Delta h_i$ – изменение толщины льда за промежуток времени, равный шагу модели
Соленость льда ( $S_i$ , ‰)	$S_i = S_w (0.87e^{-5\sqrt{h_i}} + 0.13)$
Температура замерзания воды ( $T_f$ )	$T_f = -(3 \cdot 10^{-3} + 5.27 \cdot 10^{-2} S_w + 4 \cdot 10^{-5} S_w^2 + 4 \cdot 10^{-7} S_w^3)$
Температура плавления снега ( $T_{ms}$ )	$T_{ms} = 273,15 \text{ К}$
Температура плавления льда ( $T_{mi}$ )	$T_{mi} = -0.054 S_i$
Теплопроводность льда ( $k_i$ , Вт/(м·К))	$k_i = k_{i0} + \frac{\beta S_i}{T_i - 273,15}$ , $k_{i0} = 2,3 \text{ Вт/(м·К)}$ , $\beta = 0,1172 \text{ Вт/(м·‰)}$
Теплопроводность снега ( $k_s$ , Вт/(м·К))	$k_s = 10^{(0.002650 \rho_s - 1.652)}$ , $\rho_s \leq 600 \text{ кг/м}^3$
Теплота плавления снега ( $(L\rho)_s$ , кДж/кг)	$(L\rho)_s = 334 \text{ кДж/кг}$
Теплота плавления льда ( $(L\rho)_i$ , кДж/кг)	$(L\rho)_i \approx 0,9(L\rho)_s$

На верхней границе ледовой пластины поток тепла  $F_t$  состоит из турбулентного потока явного и скрытого тепла, которые определяются по интегральным аэродинамическим формулам, длинноволнового и коротковолнового радиационного баланса поверхности. Предполагается, что вся энергия, поступающая на верхнюю поверхность из атмосферы, за вычетом отраженной и поглощенной коротковолновой радиации идет на изменение температуры поверхности и массы ледового покрова. Расчет приходящей коротковолновой радиации производится по формуле Зиллмана [Zillman, 1972] с параметризацией влияния облачности по Маршуновой. Коротковолновая солнечная радиация перераспределяется в толще льда в соответствии с величинами альбедо и коэффициентов пропускания и ослабления. Длинноволновый радиационный баланс поверхности определяется по формуле, предложенной Кенигом-Лангло [Konig-Langlo, Augstien, 1994], с учетом балла общей облачности. Параметризация альбедо

взята из блока морского льда CCSM2 климатической модели Национального центра исследований, Боулдер, Колорадо, США [Briegleb et al., 2002].

На основе построенной термодинамической модели проведены численные эксперименты с целью воспроизведения эволюции толщины ледяного покрова в Кагальнике зимой 2007–2008 гг. Особенность данного сезона заключается в том, что по принятому в океанографии тепловым атмосферным критериям и критериям ледового режима он относится к различному типу зим. Относительно тепловых показателей (сумма градусов дней мороза и др.) зима 2007–2008 гг. относится к типу умеренных зим. По критериям ледового режима (сплоченность ледяных полей, толщина, формы льда, торосистость) данный зимний сезон имеет явные признаки, типичные для зим сурового типа. Одна из причин, объясняющих данное явление, – это преобладание меридиональных форм циркуляции на европейской части России, характеризующейся очень контрастными погодными и ледовыми условиями. Временной шаг расчетов составлял 2 часа. В качестве внешнего форсинга использовались данные прогностической модели SKIRON [Kallos et al., 1997]. Метеорологические параметры измерялись, в частности, над северо-восточной частью Таганрогского залива ( $47^{\circ}4' \text{ с. ш.}, 39^{\circ}18' \text{ в. д.}$ ) (рис. 1).

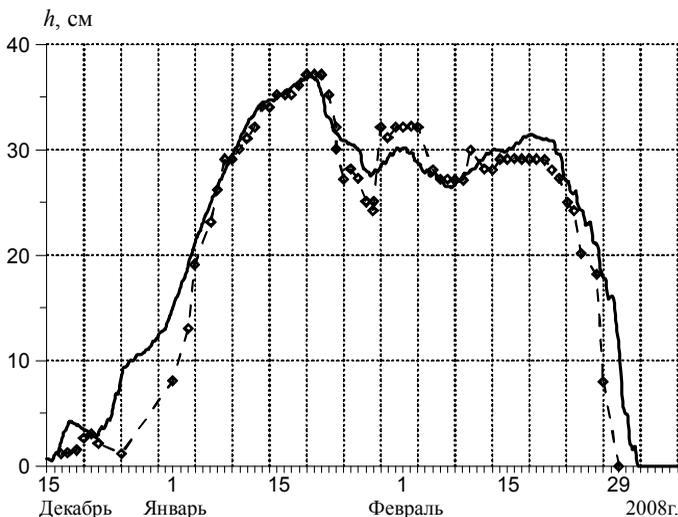


**Рис. 1.** Распределение температуры, атмосферного давления, влажности и скорости ветра над северо-восточной частью Таганрогского залива в период с 1 декабря 2007 г. по 31 марта 2008 г.

В качестве начальных условий в используемой модели задавались среднемесячные климатические температура и соленость воды. Температура охлаждаемой поверхности (вода, снег/лед), а также температура подледной морской воды впоследствии рассчитывались из уравнений теплового баланса.

Модельные расчеты показали, что предложенная термодинамическая модель вполне адекватно воспроизвела изменения толщины льда на всех временных этапах, на которые можно условно разделить ледовый сезон

2007–2008 гг., а именно: интенсивный рост льда (первая декада января – вторая декада января), кратковременное потепление (третья декада января – первая декада февраля), повторное льдообразование (первая декада февраля – вторая декада февраля) и активное разрушение ледового покрова (вторая декада февраля – первая декада марта) (рис. 2).



**Рис. 2.** Результаты моделирования термодинамической эволюции толщины льда в Кагальнике (сплошная кривая) и соответствующие рассматриваемому периоду данные натуральных наблюдений (штриховая кривая с центральными символами) [Матишов и др., 2010]

Работа выполнена в рамках государственного задания по теме № 0827-2015-0001.

### Литература

*Иванов Б. В., Макитас А. П.* Квазистационарная нульмерная модель морского льда // Тр. ААНИИ. 1990. Т. 420. С. 18–31.

*Клячкин С. В., Гузенко Р. Б., Май Р. И.* Численная модель эволюции покрова арктических морей для оперативного прогнозирования // Лед и снег. 2015. Т. 55, № 3. С. 83–96.

*Матишов Г. Г., Матишов Д. Г., Гаргона Ю. М., Дашкевич Л. В.* Замерзание Азовского моря и климат в начале XXI века // Вестник ЮНЦ РАН. 2010. Т. 6, № 1. С. 33–41.

*Briegleb B. P., Bitz C. M., Hunke T. C. et al.* Description of the Community Climate system model version 2: Sea ice model // National Center for Atmospheric Research. 2002. Доступно по адресу <<http://www.cesm.ucar.edu/models/ice-csim4>>.

Cheng B., Mäkyinen M., Similä M. et al. Modelling snow and ice thickness in the coastal Kara Sea, Russian Arctic // *Annals of Glaciology*. 2013. Т. 54, N 62. P. 105–113.

Kallos G., Nickovic S., Papadopoulos A. et al. The regional weather forecasting system skiron: an overview // Intern. Symp. on Regional Weather Prediction on Parallel Computer Environments (University of Greece, October 15–17, Athens). 1997.

Konig-Langlo G., Augstien E. Parameterization of the downward long-wave radiation at the Earth's surface in polar regions // *Meteorologische Zeitschrift*. 1994. N 3. P. 343–347.

Zillman J. W. A study of some aspects of the radiation and heat budgets of the southern hemisphere ocean // *Meteorol. Stud. Rep.* 26. 1972. Bur. of Meteorol., Dep. of the Inter., Canberra, A.C.T.

## **WINTERTIME THERMODYNAMICS OF A WATER BODY, EXAMPLE OF THE NORTH-EASTERN PART OF THE SEA OF AZOV**

**A. E. Bukatov<sup>1</sup>, D. D. Zav'yalov<sup>1</sup>, O. S. Zav'yalova<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>*Marine Hydrophysical Institute of the Russian Academy of Sciences, Sevastopol*  
<sup>2</sup>*Sevastopol State University*

The one-dimensional thermodynamic sea ice model, adapted to the physiographic conditions of the eastern part of Taganrog Bay, was applied to study the thermodynamic processes in seasonal ice cover in the winter of 2007–2008. The influence of hydrometeorological factors on the regional variability of ice thickness was estimated. The modeled ice thickness was compared with measurements at the coastal scientific expeditionary base of the Southern Scientific Center of the Russian Academy of Sciences in Kagalnik.

## **ОСОБЕННОСТИ ВЕСЕННЕГО ПЕРЕМЕШИВАНИЯ В БОРЕАЛЬНОМ ОЗЕРЕ ПОД ВЛИЯНИЕМ РАЗЛИЧНЫХ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ**

**Г. Г. Гавриленко, Г. Э. Здоровеннова, Р. Э. Здоровеннов,  
Н. И. Пальшин, А. Ю. Тержевик**

*Институт водных проблем Севера КарНЦ РАН*

Рассмотрены особенности динамики температуры небольшого бореального озера в период развития весенней подледной конвекции и после взлома льда. Показано, что в зависимости от погодных условий конца зимы и весны даты начала, интенсивность и продолжительность весенней подледной конвекции существенно меняются. На фоне аномально теплой весны продолжительность конвекции превышает месяц, озеро выходит из-под льда устойчиво стратифицированным и может терять период весенней гомотермии. Близкие к климатической норме погодные условия весны способствуют непродолжительной конвекции и длительному нахождению озера в состоянии гомотермии после взлома льда.

Весеннее подледное конвективное перемешивание на водоемах суши, развивающееся вследствие радиационного прогрева, играет важнейшую роль в функционировании их экосистем в конце периода ледостава и на этапе раннего лета. Конвекция определяет развитие планктонного сообщества, в частности, диатомовых, перераспределяя клетки водорослей по водному столбу, а также стимулируя приток биогенов из глубинных слоев. По мере заглубления конвекции происходит выравнивание концентраций растворенных и взвешенных веществ, как по вертикали, так и по горизонтали, а на этапе весенней гомотермии после взлома льда происходит разрушение придонных анаэробных зон и выброс накопившихся в них за зиму парниковых газов [López Bellido et al., 2009]. При достижении конвекцией дна формируется теплосток, направленный из воды в дно, происходит повышение температуры верхнего слоя донных отложений [Гавриленко и др., 2015], что особенно важно для димиктических озер, донные отложения которых могут накапливать тепло лишь на коротком этапе весенней гомотермии.

Период весеннего нагревания на мелководных озерах начинается с установлением положительного теплового потока на границе вода – лед. Если зимний вертикальный профиль температуры характеризуется непрерывным возрастанием значений от близких к нулю вблизи границы лед – вода до +4...+5 °С в придонных слоях, то по мере развития конвективного перемешивания на профиле начинает отчетливо выделяться трехслойная структура, включающая подледный слой с выраженным температурным градиентом, конвективно-перемешанный слой (КПС), толщина и температура которого постепенно возрастают, и нижележащий, не затронутый перемешиванием слой, сохраняющий обратную термическую стратификацию.

Особенности периода весеннего перемешивания были рассмотрены на примере мелководного озера Вендюрского, расположенного в южной части Карелии (62°10'–62°20' N, 33°10'–33°20' E). Озеро относится к мезотрофным водоемам. Размеры озера Вендюрского невелики: площадь зеркала составляет 10,4 км<sup>2</sup>, средняя и максимальная глубины – 5,3 и 13,4 м, соответственно; длина котловины – около 7 км, средняя ширина – 1,5–2 км. Прозрачность воды по диску Секки составляет 3–4 м. Для района исследований характерна заметная межгодовая изменчивость погодных условий, что определяет различия в термической структуре водоема в разные годы. Метеорологические данные использовались по ближайшей метеорологической станции «Петрозаводск», расположенной на расстоянии 70 км от района измерений (<http://gp5.ru>). Среднемесячные климатические значения приземной температуры воздуха за базовый период 1961–1990 гг. были получены для станции

«Петрозаводск» на сайте Северо-Евразийского климатического центра (<http://seakc.meteoinfo.ru/actuals>).

Силами сотрудников лаборатории гидрофизики ИВПС КарНЦ РАН на оз. Вендюрском уже в течение 10 лет проводятся круглогодичные измерения температуры водной толщи. Натурные измерения осуществляются на автономных буйковых станциях – косах с использованием высокоточного оборудования производства канадской компании RBR Ltd. Такая организация измерений позволяет получить высокочастотные данные по температуре водной толщи практически за весь год, за исключением нескольких дней весной и осенью, когда косы изымаются для снятия данных, калибровки датчиков и замены батарей. Кроме того, проводятся измерения температуры водной толщи в режиме вертикального зондирования с помощью зонда CTD-90M производства компании «Sea&SunTechnology», Германия. Накопленный массив высокоточных данных позволил детально исследовать период весеннего нагревания озера.

В результате анализа полученных данных установлено, что типичные сроки начала подледной конвекции на оз. Вендюрском – конец марта – начало апреля, продолжительность весеннего перемешивания составляет около месяца. Согласно оценкам, скорость заглубления конвективно-перемешанного слоя и возрастание температуры в нем на этапе развитой конвекции достигают 0,1–0,8 м и 0,1–0,25 °С в сутки, соответственно.

В рамках данной работы рассмотрено развитие подледной конвекции весной 2012 и 2016 гг. на фоне существенно отличающихся погодных условий.

*Весна 2012 г.* Февраль 2012 г. был холоднее климатической нормы на 3,2 °С, а март и апрель – незначительно теплее (на 0,1 и 0,2 °С, соответственно). Среднесуточные температуры приземного слоя воздуха первой декады апреля были отрицательными и изменялись от –8,8 до –0,8 °С, минимальное измеренное значение температуры воздуха составляло –15,8 °С, максимальное +5,7 °С. Среднесуточные значения температур воздуха во вторую декаду апреля изменялись от –2,4 до +8,1 °С. После 10 апреля начался прогрев приземного слоя воздуха, и 20 апреля среднесуточное значение его температуры превышало +4 °С. Третья декада апреля была теплой, характеризовалась среднесуточными температурами воздуха, изменяющимися от +4 до +10 °С, при минимальном измеренном значении +0,8 °С и максимальном +13,3 °С. Общая мощность снежно-ледяного покрова 20 апреля составляла 55 см, вплоть до этой даты на льду сохранялся слой снега, что и определило сравнительно позднее начало конвекции.

В апреле 2012 г. вертикальные зондирования начались до начала конвекции, что позволило проследить ранние стадии ее развития. Отчетливо выраженный перемешанный слой сформировался лишь к 22 апреля, когда его толщина составляла 0,3 м, нижняя граница располагалась на глубине 1,6 м, температура воды повысилась до 0,84 °С. Уже к 24 апреля нижняя граница КПС располагалась на глубине 2,3 м, общая мощность составляла 1,3 м, температура воды повысилась до 1 °С. Взлом снежно-ледяного покрова в 2012 г. произошел 5 мая, таким образом, продолжительность подледной конвекции составила всего 13 суток, что заметно меньше, чем в другие годы исследований [Zdorovenov et al., 2013]. К моменту взлома льда глубина нижней границы КПС достигла 6,3 м, температура в нем повысилась до 2,6 °С, что заметно ниже типичных значений (3,2–4,4 °С), измеренных в другие годы исследований [Zdorovenov et al., 2013]. Май 2012 г. был теплее климатической нормы на 1,6 °С, однако на фоне неустойчивой ветреной погоды водная масса озера находилась в состоянии гомотермии на протяжении двух недель после взлома льда.

*Весна 2016 г.* Конец зимы и весна 2016 г. было аномально теплыми: среднемесячные температуры февраля, марта, апреля и мая превышали норму на 7,5, 3,2, 2,0 и 4,3 °С, соответственно. Анализ метеорологических данных за март-апрель 2016 г. показал, что уже начиная с 25 марта до конца месяца среднесуточные значения температуры воздуха были положительными (минимальное измеренное значение в последнюю декаду марта составляло –14,2 °С, максимальное +10,9 °С). В апреле погода была неустойчивой, наблюдались ночные понижения температуры воздуха до –3...–4 °С, дневные максимумы достигали +10 °С, при среднесуточных значениях от –1 до +3 °С. Непосредственно перед вскрытием озера, которое произошло 4 мая, наблюдалось резкое потепление: среднесуточное значение температуры воздуха 26 апреля составляло +10,3 °С, что превышало показатель предыдущих суток на 8,7 °С. Толщина ледяного покрова в середине апреля 2016 г. составляла 49 см, из которых около 45 см приходилось на кристаллический лед. Слой снега на льду отсутствовал.

На фоне описанных метеорологических условий в 2016 г. подледная конвекция началась нетипично рано. По данным термоксы установлено, что уже в последних числах марта перемешивание достигало глубины 3 м, а температура КПС повысилась до 1,3 °С. К 29 апреля нижняя граница КПС опустилась до глубины 8 м, температура воды в нем достигла температуры максимальной плотности. Дальнейшее заглубливание нижней границы КПС приостановилось, однако его температура продолжала повышаться, и в дневные часы 2–3 мая на верхних горизонтах термоксы

были зафиксированы значения +6 °С. Таким образом, к моменту взлома льда, который произошел 4 мая, конвекция продолжалась более 35 суток. Озеро вышло из-под льда уже устойчиво стратифицированным, и на фоне теплой маловетреной погоды это состояние сохранялось на протяжении месяца.

Как показывают измерения, небольшие лесные озера и ламбы зачастую выходят из-под льда уже устойчиво стратифицированными [Arvola et al., 2010]. Исчезновение периода гомотермии после выхода водоемов из-под льда может иметь серьезные экологические следствия, в частности, может отрицательно влиять на развитие планктонного сообщества, ограничивая приток биогенов из глубинных слоев. Также при отсутствии полного перемешивания водной толщи после схода льда придонные анаэробные зоны, сформированные в период ледостава, не разрушаются, что может вызывать дальнейшее накопление в них парниковых газов [López Bellido et al., 2009] и отрицательно влиять на бентосное сообщество.

Таким образом, если озеро выходит из-под льда устойчиво стратифицированным, оно лишается важнейшего этапа весенней гомотермии, и существенные изменения могут произойти в его термическом и газовом режимах, а также в функционировании его экосистемы в целом на последующих этапах периода открытой воды. Полученные нами результаты показывают, что при определенных погодных условиях конца зимы и весны полимиктическое озеро Вендюрское может терять важнейший этап весенней гомотермии.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ (16-05-00436\_a).

### Литература

Гавриленко Г. Г., Здорovenнова Г. Э., Здорovenнов Р. Э. и др. Теплопоток на границе вода – донные отложения в небольшом озере // Тр. КарНЦ РАН, сер. Лимнология. 2015. № 9. С. 3–9. doi: 10.17076/lim72.

Arvola L., George G., Livingstone D. M. et al. The impact of the changing climate on the thermal characteristics of lakes, in *The Impact of Climate Change on European Lakes* // Aquatic Ecology, Series 4 / Ed. by D. G. George. Springer Verlag, 2010. P. 85–101. doi: 10.1007/978-90-481-2945-4\_6.

López Bellido J., Tulonen T., Kankaala P., Ojala A. CO<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub> fluxes during spring and autumn mixing periods in a boreal lake (Pääjärvi, southern Finland) // J. Geophys. Res. Biogeosci. 2009. 114. G04007. doi: 10.1029/2009JG000923.

Zdorovennov R., Palshin N., Zdorovennova G. et al. Interannual variability of ice and snow cover of a small shallow lake // Estonian Journal of Earth Sciences. 2013. Vol. 61, N 1. P. 26–32.

## THE FEATURES OF SPRING MIXING IN A BOREAL LAKE UNDER A VARIETY OF WEATHER CONDITIONS

G. G. Gavrilenko, G. E. Zdorovenova, R. E. Zdorovenov, N. I. Palshin,  
A. Yu. Terzhevik

*Northern Water Problems Institute, KarRC RAS*

The temperature dynamics of a small boreal lake during convection under ice and after ice breakup are considered. The dates, intensity and duration of spring under-ice convection vary considerably, depending on the weather at the end of winter and spring. Where spring is abnormally warm, the duration of convection exceeds a month; the lake after ice-off remains steadily stratified and can lose the period of spring homothermy. In the situation close to the climatic norm, the weather conditions of the spring contribute to a short convection and a prolonged homothermy after ice breakup.

## ЛЕДОВАЯ ФЕНОЛОГИЯ И ТЕРМИЧЕСКАЯ СТРУКТУРА ОЗЕР СЕВЕРО-ЗАПАДА РОССИИ В ПЕРИОД ЛЕДОСТАВА (ПО ДАННЫМ МНОГОЛЕТНИХ НАБЛЮДЕНИЙ)

Т. В. Ефремова, Н. И. Пальшин

*Институт водных проблем Севера КарНЦ РАН*

В результате детального анализа многолетних данных исследована зонально-азональная зависимость ледовой фенологии и вертикальной термической структуры озер Северо-Запада России от различных географических факторов и чувствительность ледового сезона к изменениям локального климата. Оценены линейные тренды (1950–2016 гг.) дат замерзания и очищения озер ото льда для девяти озер Карелии.

В последнее время интерес к ледовой фенологии (даты начала и окончания ледостава) неуклонно растет в связи с растущим интересом к глобальному потеплению климата. Для характеристики ледовой фенологии озер Северо-Запада России на первом этапе исследований были обобщены и проанализированы опубликованные данные инструментальных наблюдений на сети станций и постов Северо-Западного управления по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды Росгидромета. Датой начала ледостава считается первый день, когда озеро в поле зрения наблюдательного пункта покрыто устойчивым неподвижным льдом (продолжительностью не менее 20 суток). Окончанию ледостава соответствует дата, предшествующая первой дате появления полей чистой воды. За дату очищения ото льда принимается первый день, начиная с которого ледовые явления в данном сезоне более не наблюдались. По ледовым явлениям обобщены данные 62 гидрологических постов, собранные на 55 водоемах за период с 1950 по 1989 г., из них 38 озер находятся на тер-

ритории Карелии [Материалы..., 1956–1989]. В анализе использовались также опубликованные усредненные данные по 35 озерам (42 поста) за различные многолетние периоды с 1881 по 1953 г. [Пиотрович, 1958].

В результате были получены регрессионные уравнения, описывающие средние многолетние даты ледовой фенологии:

$$\overline{D_{i,f}} = 450 + 28.6 \lg \overline{H} - 2.27 \varphi - 0.091 Z, \quad (\pm 3.7; R = 0.95) \quad (1)$$

$$\overline{D_{i,b}} = -90.9 + 3.42 \varphi + 0.048 Z + 2.09 \lg S + 0.26 \overline{H}, \quad (\pm 2.4; R = 0.98) \quad (2)$$

где  $\overline{D_{i,f}}$  и  $\overline{D_{i,b}}$  – даты начала ледостава и очищения озер в сутках от 1 января;  $\overline{H}$  – средняя глубина озера, м;  $S$  – его площадь, км<sup>2</sup>;  $\varphi$  – географическая широта, град.;  $Z$  – высота над уровнем моря, м. В скобках даны среднеквадратические отклонения и коэффициенты множественной корреляции. Последовательность предикторов в уравнениях приведена по мере убывания их значимости, в соответствии с объясненной долей дисперсии в выборке озер [Ефремова, Пальшин, 2011].

Наибольшее влияние на даты начала ледостава в озерах оказывает их средняя глубина, в меньшей степени – географическая широта и высота над уровнем моря. В [Lerraganta, 2009] отмечается, что зависимость сроков начала ледостава от глубины водоема почти линейная, каждый дополнительный метр глубины водоема соответствует дополнительному дню задержки замерзания. По нашим данным зависимость замерзания озер близка к линейной для озер со средними глубинами от 5 до 20 м, в более мелких и глубоких озерах эта зависимость нелинейная.

Сроки очищения озер ото льда в основном связаны с зональными факторами, на таяние снежно-ледового покрова основное влияние оказывает солнечная радиация, зависящая от географической широты. Объясненная доля дисперсии только в результате парной корреляции сроков очищения озер ото льда с географической широтой составляет  $r^2 > 0,9$ , а стандартная ошибка  $\pm 3,4$  суток.

На следующем этапе исследований ледовой фенологии в Карельском республиканском центре по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды были приобретены данные о сроках ледовых событий с 1990 для озер Водлозеро, Выгозеро, Ругозеро, Топозеро, Тулмозеро – по 2009 г., для озер Сегозеро, Сямозеро – по 2011 г., для Ладожского и Онежского озер – по 2016 г. включительно. Следует отметить, что в Ладожском озере гидрологический пост находится в северной глубоководной части на острове Валаам и наблюдения на нем репрезентативны для открытой части озера. Пост наблюдений в Онежском озере находится в закрытой Петрозаводской губе, ледовые условия которой отличаются от открытой части озера, но в целом сохраняют основные тенденции изменений ледового режима в озере.

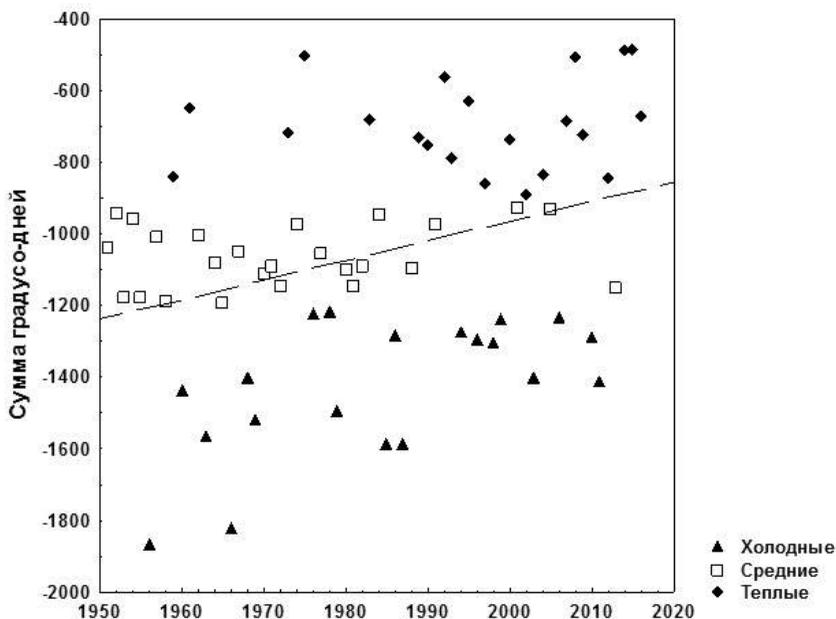
Даты окончания ледостава в озерах Карелии коррелируют со средними значениями индексов Северо-Атлантического колебания (NAO) за январь-февраль, причем лучше всего эта связь проявляется для крупных озер Онежского, Сегозеро, Топозеро и Выгозеро. Даты начала ледостава связаны со средними значениями индексов NAO за октябрь-ноябрь. Значимое соотношение между сезонными зимними индексами NAO и периодами продолжительности ледостава наблюдалось только для крупных глубоководных озер (Онежское, Сегозеро) [Efremova et al., 2013].

Для оценки влияния температуры воздуха на ледовую фенологию к каждому озеру подбиралась ближайшая репрезентативная метеостанция на удалении не более 70 км. Анализ временных рядов приземной температуры воздуха показал, что по данным наблюдений всех выбранных метеостанций за исследуемый период (1950–2016 гг.) отмечено повышение среднегодовой температуры на 0,2–0,3 °C/10 лет. Во внутригодовом ходе изменение средних месячных значений температуры воздуха происходило неравномерно, наиболее интенсивное потепление наблюдалось в марте-мае (0,3–0,5 °C/10 лет), в июле и в сентябре (0,2–0,4 °C/10 лет). Тренды значимы ( $p < 0,01$ ).

В результате проведенного анализа установлено, что климатические условия за два месяца с октября по ноябрь наилучшим образом отражают даты замерзания для озер данного региона, а очищения озер – с апреля по май. Продолжительность ледостава лучше всего коррелирует с отрицательной суммой градусо-дней в зимний период. На рис. приведен пример для МС Петрозаводск межгодового изменения суммы зимних среднесуточных температур (градусо-дни). Годовая сумма зимних температур воздуха рассчитана начиная со дня устойчивого перехода приземной температуры воздуха через ноль градусов осенью предыдущего года до дня, когда в следующем году сумма среднесуточных отрицательных температур воздуха достигнет максимума. Сумма зимних температур характеризует суровость зим, по суровости они были разделены на три типа: холодные, средние и теплые [Каретников и др., 2016]. Средними считались зимы, отстоящие от среднего значения не более чем на  $\pm$  половину стандартного отклонения. Для данной метеостанции эта величина составляла от –894,3 до –1213,7. Зимы с меньшей или большей отрицательной суммой относились к теплым и холодным. На рис. видно, что с конца 80-х гг. резко уменьшилось количество средних зим, возросло количество теплых, исчезли суровые холодные зимы с большой суммой отрицательных температур. Холодные зимы по температуре воздуха стали ближе к средним зимам.

За период (1950–2009 гг.) в исследуемых озерах наблюдались тенденции к более поздним датам ледостава, к более ранним датам окончания ледостава и очищения озер ото льда, но тренды статистически незначимы

( $p < 0,05$ ). Для обработки временных рядов ледовой фенологии использовались методы регрессионного и спектрального анализа. Уровень статистической значимости трендов оценивали на основе  $t$ -статистики Стьюдента и непараметрического теста Манна–Кендалла.



**Распределение зим по типам суровости в зависимости от суммы градусо-дней для МС Петрозаводск (прерывистая линия – линия тренда)**

Поскольку для европейской территории России выделен период ускоренного роста температуры приземного воздуха с 1976 г. [Груза, Ранькова, 2012], был выполнен анализ трендов временных рядов и за этот период. Для дат начала ледостава значимые тренды наблюдались только на крупных глубоководных озерах Онежское и Сегозеро ( $p < 0,05$ ) со скоростями 4,8 и 5,5 сут/10 лет. Анализ временных рядов дат очищения озер ото льда показал, что наблюдается более раннее окончание ледостава на всех озерах, но значимые тренды характерны для крупных озер Онежского и Сегозера и мелководных озер Водлозеро, Ругозеро и Тулмозеро со скоростью 2,5–3,3 сут/10 лет. Для средних озер Топозеро, Выгозеро и Сямозеро тренды оказались незначимы. Продолжительность ледостава в эти годы в среднем на озерах сократилась на 11–16 суток, а на самых крупных и глубоких озерах Онежское и Сегозеро – на 20–30 суток.

Следует отметить, что данные ледовых наблюдений в Ладожском озере на острове Валаам кардинально отличаются от данных по другим озерам. В отличие от береговых станций, расположенных в более мелководных районах, где ледовый покров наблюдается ежегодно, Валаамский архипелаг находится в северной, самой глубоководной части озера, замерзающей значительно позже или не покрывающейся ледовым покровом на протяжении всей зимы. До конца 80-х гг. отсутствие ледостава в Ладожском озере у о. Валаам наблюдалось в среднем один раз в 10 лет, а с 90-х гг. по 2016 г. устойчивый ледовый покров зарегистрирован ~50 % зим. Причем в годы с ледовым покровом сроки установления ледостава сместились к более поздним, а сроки окончания – к более ранним датам.

Для характеристики вертикальной термической структуры в озерах Северо-Запада России в период ледостава использованы регулярные наблюдения на рейдовых вертикалях на сети гидрологических станций на 48 озерах [Материалы..., 1956–1989] и данные экспедиционных исследований ИВПС КарНЦ РАН на 18 озерах Карелии. Для моделирования зимней вертикальной термической структуры водоемов был выбран период – первая половина марта (до начала развития весенней подледной конвекции). Вертикальная термическая структура озер оценивалась на основании измерения температуры воды на горизонтах через 2 м до глубины 20 м и ниже через 5 м до глубины 40 м. Для статистической обработки данных применены методы множественного регрессионного анализа и нелинейного оценивания. Для стохастической модели измеренные значения температуры воды в озерах предварительно усреднялись отдельно по каждому горизонту за все годы наблюдений.

Для описания типичных температур воды в озерах в первой половине марта получено единое уравнение для всех стандартных горизонтов

$$T(z) = a_{0,z} + \frac{a_{1,z}}{H} - a_{2,z} \lg(1 + K_w) - a_{3,z} \lg S + a_{4,z} (\varphi - 62,7), \quad (3)$$

где  $\overline{H}$  – средняя глубина (м);  $K_w$  – характерная проточность для расчетного периода (отношение объема притока с ноября по март к объему озера);  $S$  – площадь озера (км<sup>2</sup>);  $\varphi$  – географическая широта (град.),  $a_{0,z} - a_{4,z}$  – эмпирические параметры модели. Предложенная регрессионная модель позволяет оценивать типичную температуру воды на стандартных горизонтах в конце зимнего сезона для любого водоема в исследуемом регионе по доступной географической информации.

Зимняя вертикальная термическая структура крупных глубоководных озер существенно отличается от малых мелководных водоемов. Поскольку температура воды на стандартных горизонтах в первую очередь

обратно пропорционально зависит от средней глубины водоемов, то по глубине были выделены три группы озер: очень мелкие ( $\bar{H} \leq 5$  м,  $H_{\text{макс.}} \leq 15$  м), средние ( $5 < \bar{H} \leq 10$  м,  $H_{\text{макс.}} \leq 30$  м) и глубокие ( $\bar{H} > 10$  м,  $H_{\text{макс.}} > 30$  м). В глубоких озерах, в которых значительные площади дна ( $>50\%$ ) расположены ниже летнего сезонного термоклина, температура воды на стандартных горизонтах мало изменяется на протяжении всей зимы, при этом большое значение имеет тепло, сохранившееся в водной толще перед установлением ледового покрова. В мелких озерах тепло, накопленное за летне-осенний период в донных отложениях, зимой передается в водную толщу, особенно активно в первый месяц ледостава, приводя к изменениям термической структуры. В придонных слоях мелких слабопроточных озер (при максимальных глубинах до 15 м) температура воды превышает температуру максимальной плотности, а гравитационная устойчивость вод определяется увеличением минерализации с глубиной.

Чем больше площадь озер и длина разгона ветра, тем сильнее в осенний период выхолаживаются их водные массы и донные отложения. В результате этого в марте температура воды на стандартных горизонтах крупных озер на 2–3 °С меньше, чем в малых. В стохастической модели это описывается логарифмической зависимостью температуры воды от площади озер, которые по их размерам можно разделить на три группы: малые ( $S < 25$  км<sup>2</sup>), средние и большие ( $S > 500$  км<sup>2</sup>).

Для территории Северо-Запада России характерны озерно-речные системы, поэтому для данного региона большое значение имеет проточность озер. Глубина распространения речных вод зависит от термической стратификации в озерах, а также различий в температуре и минерализации речных и озерных вод. Для рассматриваемой выборки проточность влияла на температуру воды в верхнем слое озер до глубин 10–15 м. По оценке влияния водообмена на зимний термический режим озер выделено три группы водоемов: слабопроточные –  $K_w < 0,5$  (влияние проточности на температуру воды незначительное  $< 0,4$  °С), проточные –  $0,5 \leq K_w \leq 20$  и сильно проточные –  $K_w > 20$ , в которых почти все тепло, поступающее из донных отложений, выносятся с речным стоком.

Работа выполнена при финансовой поддержке фонда «ELEMО» (Швейцария).

### Литература

- Груза Г. В., Ранькова Э. Я. Наблюдаемые и ожидаемые изменения климата России: температура воздуха. Обнинск: ВНИИГМИ-МЦД, 2012. 194 с.
- Ефремова Т. В. Пальшин Н. И. Сроки ледовых явлений на водоемах Северо-Запада России // Метеорология и гидрология. 2011. № 8. С. 89–98.

*Материалы* наблюдений на озерах и водохранилищах (Дополнение к гидрологическим ежегодникам). Т. 0-1, вып. 0-3. Л.: Гидрометеоздат, 1956–1989.

*Пиотрович В. В.* Образование и стаивание льда на озерах-водохранилищах и расчет сроков ледостава и очищения. М.: Гидрометеоздат, 1958. 192 с.

*Каретников С. Г., Науменко М. А., Гузиватый В. В. и др.* Согласованность межгодовой изменчивости ледового режима Байкала и Ладожского озера // География и природные ресурсы. 2016. № 2. С. 69–77.

*Efremova T., Palshin N., Zdorovenov R.* Long-term characteristics of ice phenology in Karelian lakes // Estonian Journal of Earth Sciences. 2013. Vol. 62, N 1. P. 33–41.

*Lepparanta M.* Modelling of formation and decay of lake ice // Climate change impact on European lakes. Springer, Netherlands, 2009. P. 63–83.

## **ICE PHENOLOGY AND THERMAL STRUCTURE LAKES OF NORTHWESTERN RUSSIA DURING THE ICE COVER PERIOD (LONG-TERM OBSERVATIONAL DATA)**

**T. V. Efremova, N. I. Palshin**

*Northern Water Problems Institute, KarRC RAS*

Based on the detail analysis of long-term data we investigated zonal-azonal dependence of the ice phenology and vertical thermal structure of Northwestern Russia's lakes on various geographic factors, and the sensitivity of the ice season to changes in local climate. Linear trends (1950–2016) in freeze-up and break-up dates of nine Karelian lakes were estimated.

## **ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ОСНОВНЫХ ПРИТОКОВ ЛАДОЖСКОГО ОЗЕРА НА ФОРМИРОВАНИЕ ВОДНОЙ МАССЫ БУХТЫ ПЕТРОКРЕПОСТЬ (ИСТОК р. НЕВЫ) ПО РЕЗУЛЬТАТАМ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ**

**И. С. Зверев<sup>1</sup>, К. В. Ушаков<sup>2</sup>, Е. А. Шипунова<sup>1</sup>, С. Д. Голосов<sup>1</sup>,  
Р. А. Ибраев<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>*Институт озероведения РАН*

<sup>2</sup>*Институт вычислительной математики РАН*

По результатам математического моделирования выполнена оценка вклада основных притоков Ладожского озера – рек Волхова, Свири и Бурной – в формирование водной массы истока реки Невы. Показано, что в зависимости от времени года и типа циркуляции в озере водная масса бухты Петрокрепость поочередно формируется под воздействием стока рек Волхова и Бурной. Результаты расчетов подтверждаются данными многолетних натуральных наблюдений.

**Введение.** Ладожское озеро – крупнейшее в Европе – представляет собой не только уникальный природный объект, но также является безальтернативным источником водоснабжения для Санкт-Петербурга, многих городов Ленинградской области и Республики Карелия. Река Нева – единственный естественный водоток, вытекающий из озера и доставляющий ладожскую воду в мегаполис. Для питьевого и технического водоснабжения из р. Невы забирается более 96 % воды, необходимой городу. Первичная озерная водная масса, поступающая в р. Неву, формируется в бухте Петрокрепость под влиянием основных притоков и сезонных особенностей циркуляции вод Ладожского озера. Таким образом, качество воды, забираемой из р. Невы, в значительной степени определяется химическим составом и степенью загрязнения воды в Петрокрепости.

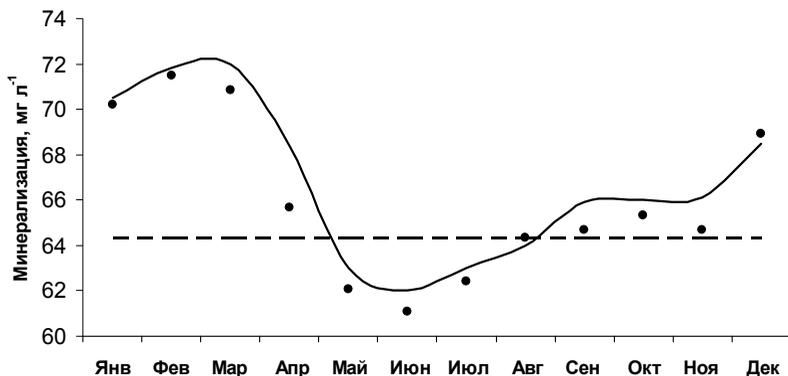
По данным многолетних натуральных наблюдений за сезонной динамикой электропроводности и минерализации воды [Крючков, 2013; Сусарева, 2013] были выявлены основные особенности формирования водной массы в бухте Петрокрепость. Так, в частности, было установлено, что в период с декабря по апрель водная масса бухты образуется за счет поступления вод рек Волхова и Бурной, с конца апреля по конец августа преобладают воды реки Бурной, а с ноября по декабрь преобладают волховские водные массы.

В настоящей работе предпринята попытка оценить распространение в акватории Ладожского озера вод основных притоков – рек Бурной, Волхова и Свири – методами математического моделирования с использованием трехмерной математической модели гидротермодинамики внутреннего моря (ГВМ), разработанной в Институте вычислительной математики РАН [Ибраев, 2008].

**Материалы и методы.** Для выполнения расчетов по оценке распространения вод основных притоков в акватории озера модель ГВМ была адаптирована для использования ее в озерных условиях. Так, в частности, с учетом того, что минерализация воды в Ладожском озере и его притоках различается и ее значения много меньше морской солености, уравнение состояния морской воды было заменено на уравнение состояния слабоминерализованной воды [Chen, Millero, 1986]. Были выполнены соответствующие работы по построению расчетной сетки для Ладожского озера. В качестве исходной метеорологической информации использовались данные реанализа NCEP/NCAR (совместный проект Национальных Центров Предсказания окружающей среды (NCEP) и Атмосферных Исследований (NCAR), США; [www.cdc.noaa.gov/cdc/data.ncep.reanalysis.html](http://www.cdc.noaa.gov/cdc/data.ncep.reanalysis.html)). Для верификации модели использовались «климатические» (осредненные за вторую половину XX века) данные наблюдений за электропроводностью воды в озере [Крючков, 2013]. Расчеты производились на

сетке с пространственным разрешением  $600 \times 600$  м по горизонтали и 30 горизонтов по вертикали. Шаг по времени составлял 6 минут. Ниже представлены результаты расчетов и их обсуждение.

**Результаты расчетов.** На рис. 1 представлены результаты расчетов среднемноголетней сезонной динамики минерализации воды в бухте Петрокрепость. Там же помещены среднемноголетние оценки, выполненные по данным многолетних натуральных наблюдений.

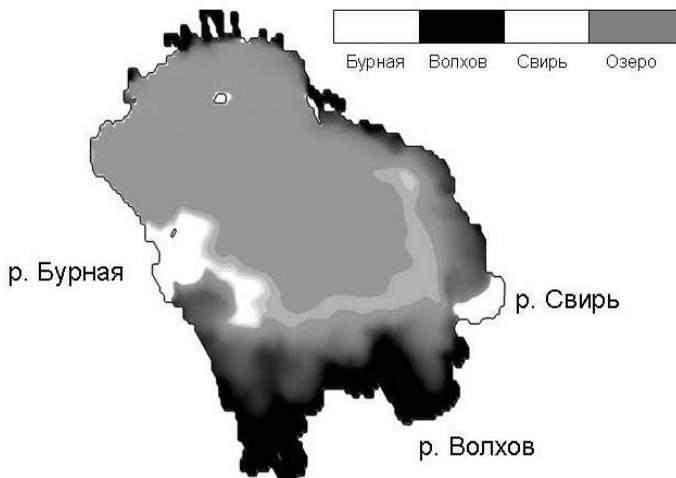


**Рис. 1. Среднемноголетняя сезонная изменчивость минерализации воды в бухте Петрокрепость.** Сплошная и прерывистая линии – результаты расчетов и минерализация основной водной массы озера, точки – данные наблюдений [Крючков, 2013]

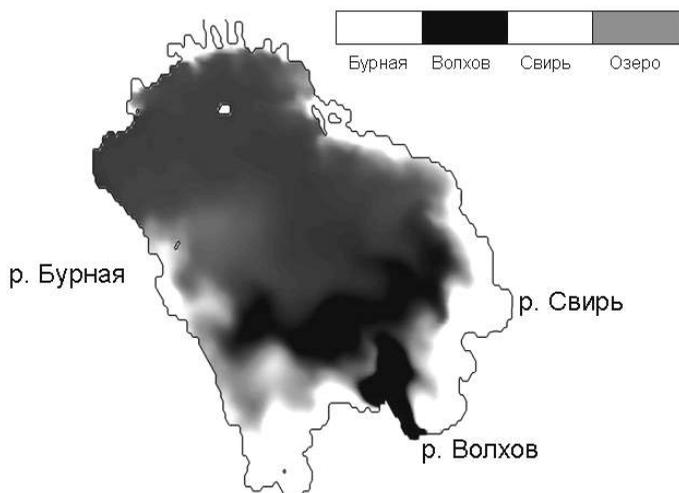
Как следует из данных, представленных на рис. 1, результаты моделирования практически совпадают с данными натурных наблюдений, как по абсолютным значениям минерализации воды, так и по динамике ее сезонной изменчивости.

Результаты моделирования позволяют определить, воды каких именно притоков формируют водную массу в бухте Петрокрепость в различные сезоны. Так, на рис. 2 представлены результаты моделирования распространения вод основных притоков озера в зимний период.

Из рис. 2 следует, что в зимний период водная масса бухты Петрокрепость практически полностью формируется за счет воды из р. Волхов, которая имеет большую плотность вследствие высокой минерализации и практически блокирует поступление в бухту водных масс от других притоков. Этому также способствует антициклонический тип циркуляции в озере, преобладающий в период ледостава. Подобная картина сохраняется до конца ледостава, когда после разрушения ледового покрова в конце апреля циркуляция в озере меняется на циклоническую, и в бухту Петрокрепость начинают поступать водные массы из р. Бурной (рис. 3).



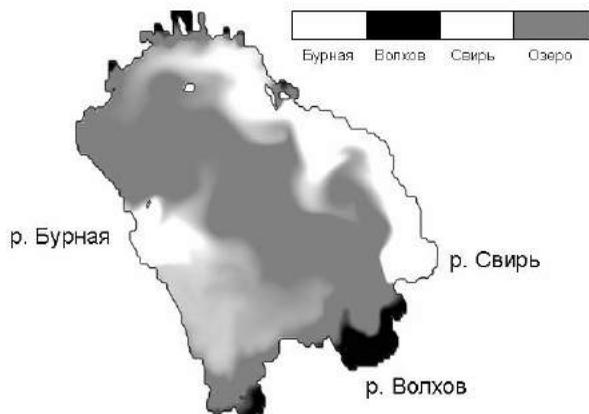
**Рис. 2. Распределение вод основных притоков по акватории Ладожского озера, характерное для зимнего периода**



**Рис. 3. Распределение вод основных притоков по акватории Ладожского озера, характерное для окончания периода ледостава**

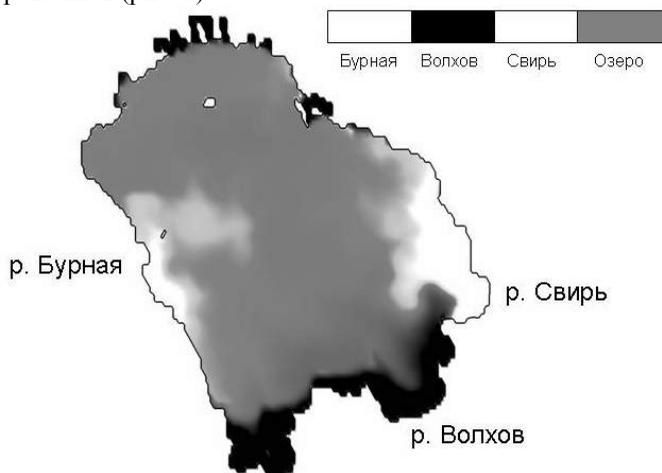
Волховские воды в это время начинают распространяться через центральную часть озера в северо-восточном и северном направлениях. С наступлением летнего периода, когда распространение вод притоков

в большой степени подвержено ветровому воздействию, водная масса бухты Петрокрепость формируется в равной степени водами рек Бурная и Волхов (рис. 4).



**Рис. 4.** Распределение вод основных притоков по акватории Ладожского озера, характерное для летнего периода

И наконец, с наступлением осени тип циркуляции снова меняется на антициклонический, и бухта Петрокрепость снова начинает заполняться стоком р. Волхов (рис. 5).



**Рис. 5.** Распределение вод основных притоков по акватории Ладожского озера, характерное для осенне-зимнего периода

Необходимо отметить, что в течение всего года воды р. Свири либо локализируются в месте впадения в озеро (рис. 2, 5), либо распространяются в направлении Волховской губы и вдоль восточного и северо-восточного берегов озера (рис. 3, 4). При этом непосредственного влияния на формирование водной массы бухты Петрокрепость они не оказывают.

**Заключение.** По результатам математического моделирования выполнена оценка вклада основных притоков Ладожского озера – рек Волхова, Свири и Бурной – в формирование водной массы истока р. Невы. Показано, что в зависимости от времени года и типа циркуляции в озере водная масса бухты Петрокрепость поочередно формируется под воздействием стока рек Волхова и Бурной. При этом установлено, что воды р. Свири, также относящейся к основным притокам озера, напрямую в бухту Петрокрепость не попадают. Результаты расчетов подтверждаются данными многолетних натурных наблюдений.

Работа выполнена при поддержке гранта Российского научного фонда № 14-17-00740-П «Озера России – диагноз и прогноз состояния экосистем при климатических и антропогенных воздействиях».

#### Литература

- Ибраев Р. А.* Математическое моделирование термогидродинамических процессов в Каспийском море. М.: ГЕОС, 2008. 127 с.
- Крючков А. М.* Распространение вод притоков на акватории озера // Ладога. СПб.: Нестор-История, 2013. С. 168–175.
- Сусарева О. М.* Распространение вод притоков на акватории озера // Там же. С. 176–182.
- Chen C. T., Millero F. J.* Precise thermodynamic properties for natural waters covering only limnological range // *Limnol. Oceanogr.* 1986. Т. 31, N 3. P. 657–662.

#### EFFECT OF THE MAIN CONFLUENTS OF LAKE LADOGA ON THE FORMATION OF WATER MASS OF THE PETROKREPOST' BAY – THE EFFLUENT OF THE NEVA RIVER (UPON THE RESULTS OF MATHEMATICAL MODELING)

I. S. Zverev<sup>1</sup>, K. V. Ushakov<sup>2</sup>, E. A. Shipunova, S. D. Golosov<sup>1</sup>, R. A. Ibrayev<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*Institute of Limnology RAS*

<sup>2</sup>*Institute of Numerical Mathematics RAS*

3D mathematical model was applied to evaluate the contribution of the main confluent of Lake Ladoga in formation of water mass of the Petrokrepost' bay – the effluent of the Neva River. It was shown that in dependence on the season and the type of lake's circulation the main contribution to the formation of the water mass of the bay make rivers Volkhov and Burnaya in turn. Results of modeling are confirmed by the data of long-term observations.

## ОСОБЕННОСТИ ДИНАМИКИ ТЕМПЕРАТУРЫ МАЛОГО ОЗЕРА В НАЧАЛЬНЫЙ ПЕРИОД ЛЕДОСТАВА

Г. Э. Здоровеннова, Р. Э. Здоровеннов, Г. Г. Гавриленко

*Институт водных проблем Севера КарНЦ РАН*

Рассмотрены особенности динамики температуры малого озера Вендюрского в начальный период ледостава по данным многолетних измерений. Показано, что даты ледостава существенно меняются от года к году в зависимости от метеорологических условий осени. Прерывание начавшегося ледостава возможно на фоне продолжительного периода теплой ветреной погоды. В первые дни после замерзания озера наблюдаются резкие скачки температуры в придонных слоях центральной глубоководной котловины, обусловленные, предположительно, остаточной циркуляцией, существующей в озере с предледоставного периода.

Данные последних лет наблюдений показывают, что на фоне изменения климата отмечается уменьшение продолжительности ледостава, причем зачастую за счет более позднего замерзания [IPCC, 2013]. Результаты расчетов на гидродинамических моделях демонстрируют, что при сохранении скорости повышения температуры воздуха к концу столетия период ледостава на озерах умеренной зоны может резко сократиться (вплоть до полного исчезновения) [Kirillin, 2010]. Увеличение продолжительности предледоставного периода может приводить к заметному истощению запасов тепла в донных отложениях озер и уменьшать, таким образом, величину теплопотока на границе вода – дно в течение зимы. Температура донных отложений определяет активность бактериального сообщества, что сказывается на скорости поглощения кислорода [Goloso et al., 2007]. Понижение придонной температуры и сокращение продолжительности ледостава оказывают положительное влияние на «зимний» газовый режим озер, уменьшая риск возникновения придонной аноксии и накопления «парниковых» газов [Goloso et al., 2012].

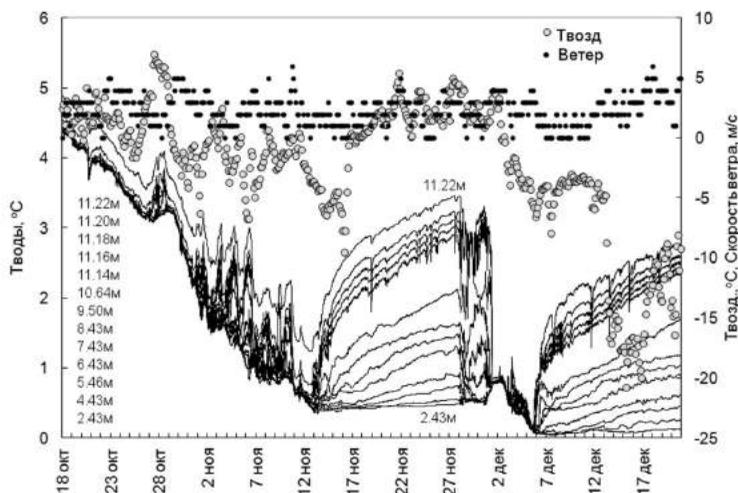
Наше исследование было сфокусировано на начальном периоде ледостава, когда в течение нескольких недель происходит существенная перестройка вертикальной термической структуры водоема [Петров и др., 2006], резко изменяется теплопоток на границе с донными отложениями [Здоровеннова и др., 2016; Пальшин и др., 2016].

Мы использовали данные измерений на небольшом мезотрофом озере Вендюрском (62°10'–62°20' с. ш., 33°10'–33°20' в. д.). Длина озера 7 км, средняя ширина 1,5 км, площадь поверхности 10,4 км<sup>2</sup>, средняя глубина 5,3 м, максимальная – 13,4 м. Водоем водно-ледникового происхождения. Донные отложения илестые в глубоководных районах и песчаные на

мелководьях. Глубина диска Секки составляет  $3 \pm 0,5$  м [Озера Карелии, 2013]. В связи с особенностями строения котловины, а также высокой прозрачностью воды озеро Вендюрское полимиктическое. На этапе открытой воды его водная масса неоднократно перемешивается [Ефремова и др., 2015], и тепло активно аккумулируется верхним слоем донных отложений [Гавриленко и др., 2015].

Измерения температуры воды проводились в центральной глубоководной части оз. Вендюрского в 2007–2016 гг. с использованием косы, оснащенной температурными датчиками TR-1060 RBR Ltd. (диапазон  $-5 \dots +35$  °С, точность  $\pm 0,002$  °С, разрешение  $< 0,00005$  °С), размещенными через 0,5–1,0 м в водной толще и 0,02–0,1 м в придонном слое. Измерения проводились круглогодично с минутным интервалом, за исключением 3–5 дней весной и осенью, когда коса извлекалась для снятия данных и перезарядки батарей датчиков. В целях настоящего исследования мы использовали ежегодные данные за период с 1 октября по 31 декабря. Также мы использовали данные измерений течений в двухметровом придонном слое на оз. Вендюрском 20–22 октября 2016 г. Использовался прибор Aquadopp PH-Profiler (Nortec, точность 1 % от измеренного значения  $\pm 0,05$  м/с для скорости и  $2^\circ$  для направления, частота измерений 4 Гц, период осреднения одна минута). Прибор был закреплен на тросе, натянутом между тремя разнесенными на расстояние около 1,5 м грузами и плавающим в 2,5 м от поверхности озера бум. Глубина в районе измерений скорости составляла около 7 м. В период с 17 по 23 октября 2016 г. на северном берегу озера была установлена метеостанция DAVIS (USA), фиксирующая температуру воздуха, скорость и направление ветра с 5-минутной дискретностью. Метеорологические данные за 2007–2016 гг. (скорость и направление ветра и температура воздуха) были получены по ближайшей метеорологической станции «Петрозаводск», расположенной на расстоянии 70 км от района измерений (<http://rp5.ru>).

Анализ данных термокосы показал, что в предледоставный период и первые недели ледостава динамика температуры водной толщи озера формируется под влиянием текущих погодных условий. По мере понижения температуры воздуха понижается и температура водной толщи озера. Начало ледовых явлений отмечается при отрицательных температурах воздуха и небольших скоростях ветра с конца октября, а постоянный ледовый покров образуется в период с середины ноября до середины декабря. Обычно установившийся лед не взламывается, однако, как показали наблюдения, на фоне теплой ветреной погоды возможно прерывание начавшегося ледостава. Такое явление наблюдалось осенью 2009 г. (рис. 1).



**Рис. 1.** Температура водной толщи в центральной части оз. Вендорского (черные сплошные линии), температура воздуха и скорость ветра на ГМС «Петрозаводск» в период с 18 октября по 20 декабря 2009 г. В левой части рисунка приведены глубины горизонтов наблюдений на термокосте

На фоне отрицательных температур воздуха первый непрочный лед образовывался на озере 26 октября 2009 г., а также в период с 31 октября по 10 ноября, при этом начинался резкий рост температуры в придонных слоях. При усилениях ветра лед взламывался, водная толща перемешивалась, температура по вертикали выравнивалась, и озеро продолжало охлаждаться в состоянии гомотермии. На фоне морозной безветренной погоды 12 ноября образовался сплошной лед, при этом средняя по столбу температура водной толщи в центральной части озера составляла около 0,4 °С, на границе с донными отложениями – около 1,24 °С. После установления сплошного льда началось резкое повышение температуры воды в придонных слоях. Однако 16 ноября погода резко изменилась – температура воздуха выросла от –9 °С в 6 ч утра до +0,2 °С в 6 ч вечера. Затем в период до 2 декабря стояла теплая ветреная погода, когда температура воздуха изменялась в пределах от –0,4 до +5,4 °С, скорость ветра составляла 2–3 м/с с усилениями до 5 м/с. На фоне описанных погодных условий 28 ноября произошел взлом льда, к этому моменту вследствие активного теплообмена с донными отложениями температура воды придонных слоев уже повысилась до 3,44 °С, а средняя по столбу температура воды достигла 1,5 °С. После взлома льда в течение трех суток происходило перемешивание водной толщи озера и ее дальнейшее охлаждение, завершившиеся полным выравниванием

температур по водному столбу ко 2 декабря, когда температура водной толщи опустилась до  $+0,7^{\circ}\text{C}$ . Затем на фоне резкого понижения температуры воздуха усилились потери тепла в атмосферу водной толщей озера, и 5 декабря при ослаблении ветровой активности образовался сплошной лед при температуре водного столба около  $0,1^{\circ}\text{C}$ .

Взлом установившегося льда наблюдался также осенью 2015 г.: лед установился 16 ноября при средней температуре по водному столбу около  $1,7^{\circ}\text{C}$ , на границе с донными отложениями  $2,7^{\circ}\text{C}$ . Лед был взломан через 11 суток 27 ноября; в период до 11 декабря водная толща озера перемешивалась и охлаждалась, и вновь озеро замерзло 12 декабря при температуре водного столба около  $0,4^{\circ}\text{C}$ , на границе с донными отложениями  $0,9^{\circ}\text{C}$ . В другие годы исследований в предледоставный период в зависимости от погодных условий могло происходить до 3–5 кратковременных (длительностью около суток) установлений сплошного льда с последующим его взломом.

После установления сплошного льда начинается повышение температуры воды придонных слоев, при этом температура в поверхностных слоях водной толщи меняется слабо. Во все годы измерений в первые дни ледостава были зафиксированы резкие скачки температуры, достигающие в придонных слоях озера  $0,1\text{--}0,5^{\circ}\text{C}$  (рис. 2) и продолжающиеся от нескольких минут до нескольких часов. Постепенно амплитуда таких колебаний уменьшается, и изменение температуры становится более плавным. Возможно, такая выраженная динамика температуры в первые дни ледостава является проявлением остаточной циркуляции, существующей в озере с предледоставного периода.

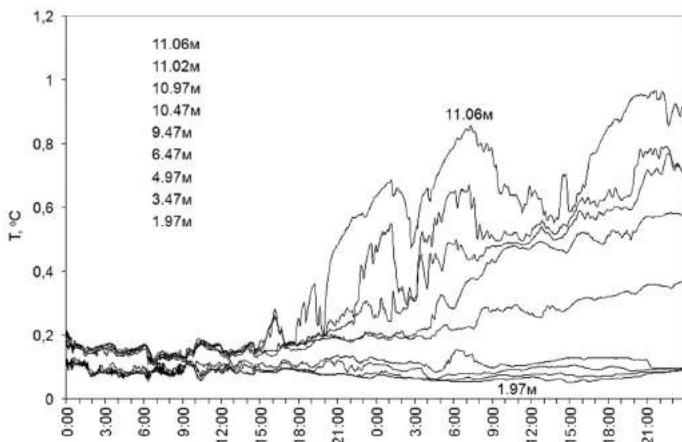


Рис. 2. Эволюция температуры воды в глубоководной части оз. Вендюрского 1–2 декабря 2012 г.

Судить об интенсивности динамических процессов в озере в предледоставный период мы можем, опираясь на измерения течений в октябре 2016 г., которые показали, что в течение двух суток в придонном двухметровом слое на северном склоне озера в районе глубин 7,0–7,5 м скорости течений достигали 2–3 см/с с выбросами до 4–5 см/с. Направление течений было довольно устойчивым, поэтому рассчитанный нами по горизонтальным компонентам теоретически возможный перенос составил около 1800 м за двое суток. В двухметровом придонном слое распределение горизонтальных компонент скоростей было достаточно однородным по вертикали, лишь в тонком 10–20-см придонном слое наблюдалось снижение значений скоростей. Устойчивые течения в придонном слое над склоном озера со скоростями в несколько см/с дают основание предполагать наличие течений с большими скоростями в поверхностных слоях. Скорость юго-западного ветра в период 17–20 октября не превышала 1 м/с, в период измерений течений (20–22 октября) южный ветер усилился до 2,0–2,5 м/с. По данным ГМС «Петрозаводск» первая декада октября 2016 г. характеризовалась довольно сильным северо-восточным ветром до 6–7 м/с, во второй декаде скорости северо-западного, северо-восточного ветра уменьшились до 2–5 м/с. На протяжении первой декады ноября 2016 г. преобладали восточные и северные ветры со скоростями до 7–8 м/с, на протяжении второй декады – южные, юго-западные ветры со скоростями до 5–7 м/с. Описанная ветровая обстановка могла способствовать, наряду с активным охлаждением поверхностных слоев озера, развитию в водоеме устойчивой циркуляции в предледоставный период. В другие годы исследований предледоставный период также зачастую характеризовался повышенной ветровой активностью, которая могла провоцировать развитие в озере устойчивой циркуляции, проявления которой, предположительно, мы и наблюдаем в данных температурных датчиков термокос в первые дни и недели ледостава.

Резкие скачки температуры и содержания растворенного кислорода отмечаются в придонных слоях озера в течение большей части зимы [Здоровеннов и др., 2011]. По всей видимости, зимой гидродинамика придонного слоя озера усиливается на фоне атмосферного воздействия на лед (перепады давления, усиления ветра). В частности, было показано, что при усилении ветра увеличиваются скорости течений в покрытом льдом озере [Петров и др., 2007].

Таким образом, выполненное исследование показало, что в последние годы на фоне меняющегося климата происходят прерывания начавшегося ледостава, что приводит к большему выхолаживанию водной толщи и верхнего слоя донных отложений озера. Под действием ветрового воз-

действия в предледоставный период в озере может формироваться устойчивая циркуляция, сохраняющаяся некоторое время после начала ледостава и усиливающая динамику озера, покрытого льдом.

Исследование выполнено при финансовой поддержке гранта РФФИ № 16-05-00436\_a.

## Литература

*Гавриленко Г. Г., Здоровеннова Г. Э., Здоровеннов Р. Э. и др.* Теплопоток на границе вода – донные отложения в небольшом озере // Тр. КарНЦ РАН, сер. Лимнология. 2015. № 9. С. 3–9.

*Ефремова Т. В., Пальшин Н. И., Здоровеннова Г. Э., Терзевик А. Ю.* Влияние экстремально жаркого лета 2010 г. на температуру воды и распределение кислорода в озерах Карелии // Метеорология и гидрология. 2015. № 9. С. 67–76.

*Здоровеннов Р. Э., Здоровеннова Г. Э., Пальшин Н. И., Терзевик А. Ю.* Изменчивость термического и кислородного режимов мелководного озера зимой // Тр. КарНЦ РАН. 2011. № 4. С. 57–63.

*Здоровеннова Г. Э., Здоровеннов Р. Э., Пальшин Н. И. и др.* Тепловой режим мелководного озера зимой // Тр. КарНЦ РАН, сер. Лимнология. 2016. № 5. С. 3–12.

*Озера Карелии: Справочник / Под ред. Н. Н. Филатова, В. И. Кухарева.* Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2013. 464 с.

*Пальшин Н. И., Ефремова Т. В., Здоровеннов Р. Э., Здоровеннова Г. Э.* Перенос тепла в малом озере в период ледостава // Тр. КарНЦ РАН, сер. Лимнология. 2016. № 9. С. 17–26.

*Петров М. П., Терзевик А. Ю., Здоровеннов Р. Э., Здоровеннова Г. Э.* Особенности термической структуры мелководного озера в начале зимы // Водные ресурсы. 2006. Т. 33, № 2. С. 154–162.

*Петров М. П., Терзевик А. Ю., Здоровеннов Р. Э., Здоровеннова Г. Э.* Движения воды в мелководном озере, покрытом льдом // Водные ресурсы. 2007. Т. 34, № 2. С. 131–140.

*Golosov S., Maher O. A., Schipunova E. et al.* Physical background of the development of oxygen depletion in ice-covered lakes // *Oecologia*. 2007. 151(2). P. 331–340.

*Golosov S., Terzhevik A., Zverev I. et al.* Climate change impact on thermal and oxygen regime of shallow lakes // *Tellus A*. 2012. 64. 17264.

*IPCC: Annex I: Atlas of Global and Regional Climate Projections / G. J. van Oldenborgh et al. (eds.) // Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, 2013.*

*Kirillin G.* Modelling the impact of global warming on water temperature and seasonal mixing regimes in small temperate lakes // *Boreal Environmental Research*. 2010. N 15. P. 279–293.

## FEATURES OF TEMPERATURE DYNAMICS OF A SMALL LAKE IN THE INITIAL ICE PERIOD

G. E. Zdorovenнова, R. E. Zdorovenнов, G. G. Gavrilenko

*Northern Water Problems Institute, KarRC RAS*

The features of the temperature dynamics of the small lake Vendyurskoe in the initial ice period are considered using long-term measured data. It is shown that the dates of ice formation vary significantly from year to year, depending on the meteorological conditions in the autumn. The ice period can be interrupted by a long period of warm, windy weather. In the first days of the ice period, sharp temperature jumps occur in the near-bottom layers of the central deep basin. Presumably, these jumps are caused by residual autumn circulation.

## ЦИРКУЛЯЦИИ И СТРАТИФИЦИРОВАННЫЕ ПОТОКИ В ЗАЛИВАХ

И. Н. Иванова, Б. И. Самолюбов

*Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова*

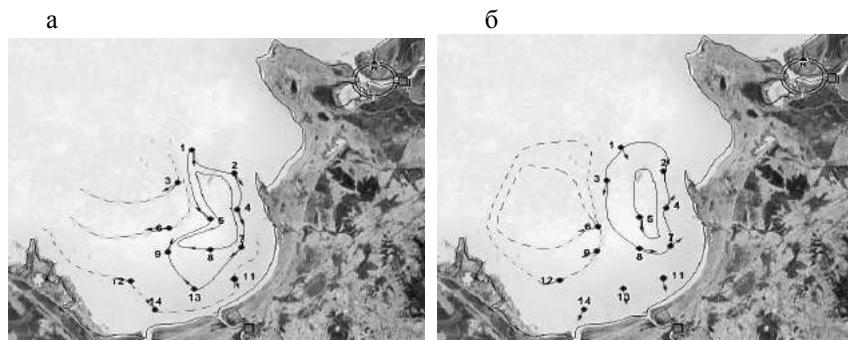
В работе представлены результаты комплексных измерений в Волховском, Петрозаводском заливах и Плещеевом озере. Показаны структуры систем стратифицированных течений с циркуляциями, струями и придонными потоками при различных устойчивостях плотностной стратификации. Получены данные о влиянии таких систем течений на перенос взвешенных частиц и, следовательно, степень загрязнения за счет стоков рек.

Динамика вод озер и заливов в значительной мере определяется воздействием ветра, влиянием топографии бассейна, плотностной стратификации, волновых процессов и впадающих рек на структуру течений. Изучение трансграничных озерно-речных систем особенно важно для анализа воздействия этих эффектов на процессы перемешивания и методы прогноза энерго- и массообмена в озерах и заливах [Peeters et al., 2007; Показеев и др., 2012; Vidal et al., 2013]. Остаются неясными многие вопросы о механизме влияния циркуляций и стратифицированных потоков на динамику окружающих вод. Целью данной работы является определение структур течений с циркуляцией и их влияние на процессы распространения примесей в заливах.

В работе представлены результаты комплексных измерений в Волховской губе Ладожского озера (август 2009 г., август 2011 г.), Петрозаводской губе Онежского озера (сентябрь 2007 г, август 2008 г, август 2015 г.), Плещеевом озере (август 2014 г.). Выполнялись исследования структур

полей скорости течения, температуры воды, концентраций взвеси, хлорофилла *a* и растворенных солей на разрезах и срочных станциях. Измерения велись с борта НИС «Эколог» ИВПС КарНЦ РАН. Комплекс аппаратуры включал мультипараметрический зонд RCM 9 LW (Aanderaa), зонд CTD90M (Sea-Sun) и зонд YSI 600OMS (YSI Incorporated).

**Волховский залив – река Волхов.** Система стратифицированных течений включала струю вод р. Волхов, плотностной поток из открытого озера, течения, вызванные внутренними сейшми. Подобные сгонно-нагонные процессы, нередко имеющие сезонный характер и сопровождающиеся затоплением берегов, типичны для Ладожского озера в данный период (середина августа 2009 г.). Этот макромасштабный (порядка масштабов бассейна) колебательный процесс приводит к образованию динамического барьера, блокирующего продвижение струи волховских вод в открытое озеро. Тем не менее струя не затухает, а участвует в циркуляционном движении, охватывающем юго-восточную часть залива. Были выявлены противоположные направленные ячейки циркуляции на промежуточных глубинах и у дна в юго-восточной части залива. Циркуляция препятствует выходу струи речных вод в открытое озеро, что приводит к сохранению примесей, поступающих из реки Волхов, в губу. В итоге имеет место эвтрофирование с интенсивным цветением вод. На рис. 1 линиями проведены соответствующие контурам циркуляции, выделенные на акватории залива, а стрелками – соответствующие векторы скорости.

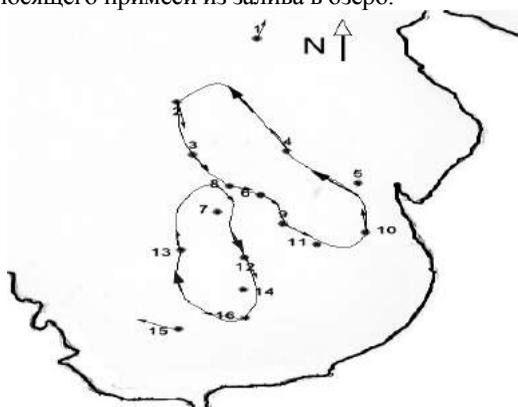


**Рис. 1. Ячейки циркуляции на акватории залива:**

а – в зоне действия струи; б – в придонном слое. Номера соответствуют вертикалям зондирования плановой съемки, стрелки – векторам скорости течения

Вторая плановая съемка на акватории Волховской губы была выполнена 12.08.2011 г. по 16 вертикалям, расположение которых показано на рис. 2. В период исследований преобладал западный ветер со средней скоростью

5 м/с. Было установлено, что на всех вертикалях четко воспроизводилась промежуточная струя, менявшая направление. По осредненным по толщине струи значениям направления течения были выделены ориентации вектора скорости струи в различных точках на акватории залива. Полученные таким способом векторы скорости струи и объединяющие их контуры циркуляций приведены на рис. 2. В отличие от результатов 2009 г., в период выполнения которых преобладал восточный ветер, обнаруженная циркуляция имеет циклонический характер. Это подтверждает гипотезу о ветровом механизме формирования данной структуры течений. Смещенная на юго-запад циркуляция меньшего горизонтального масштаба, вероятно, представляет собой вихрь, сопутствующий основному. Струя в точке 1 движется в открытое озеро, что может быть связано с формированием ответвления от основной циркуляции, переносящего примеси из залива в озеро.



**Рис. 2. Ячейки циркуляции на акватории залива в зонах действия промежуточных струй**

Номера соответствуют вертикалям зондирования плановой съемки, стрелки – векторам скорости течения

**Петрозаводский залив – Логозеро – река Шуя.** Система течений включала циркуляцию сгонно-нагонного типа с противоположными направлениями дрейфового и придонного течений и речной струей при разной устойчивости стратификации. В результате выполнения комплексных плановых съемок в августе 2008 г. в губе и открытом озере были обнаружены течения, направленные по циркуляционной траектории в заливе с ответвлением вдоль правого по потоку берега в сторону открытого озера. В губе течение обеспечивалось вызванной ветром циркуляцией вод в горизонтальной плоскости. За пределами залива течение попадало в зону действия близкой по направлению крупномасштабной озерной циркуляции.

В условиях слабой плотностной стратификации (средняя по глубине частота Вайсяля-Брента  $N = 2-3 \cdot 10^{-2}$  Гц) измерения выполнялись на суточной станции 17–18.09.2007 г.

Характер течения определялся северо-восточным ветром со скоростью  $U_w = 3-10$  м/с (рис. 3). Были зарегистрированы процессы воздействия внутренних волн на энергопередачу от дрейфового течения в глубинные слои и эффект размыва дна течением. Развивавшаяся циркуляция обеспечивала поступление холодных вод открытого озера в залив.

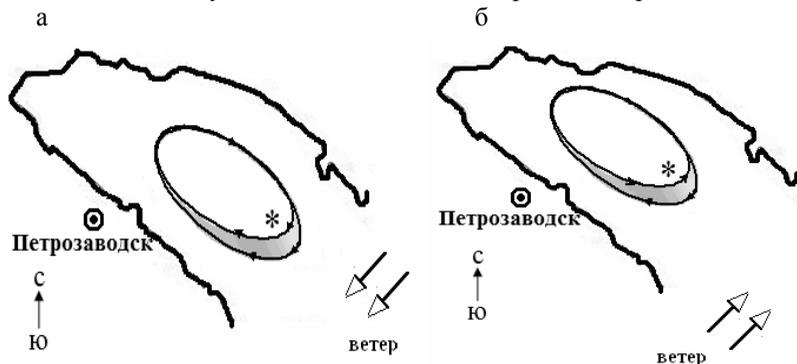


Рис. 3: а – карта-схема Петрозаводской губы и циркуляции в период слабой стратификации 17–18.09.2007 г. Расположение вертикали зондирования показано символом «\*»; б – карта-схема Петрозаводской губы и циркуляционного течения при устойчивой стратификации 13–15.08.2008 г.

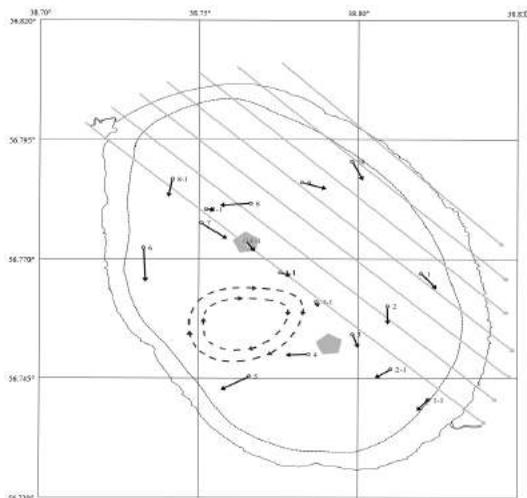
Данные об эволюции структур течений и параметров состава воды при сильной стратификации (средняя по глубине частота Вайсяля-Брента  $N = 6-9 \cdot 10^{-2}$  Гц) и ветре со скоростью  $U_w = 5-12$  м/с были получены в августе 2008 г. В поле скорости течения имела место циркуляция сгонно-нагонного типа с противоположными направлениями дрейфового и придонного течений. Судя по направлению циркуляции, продукты размыва дна под влиянием течения, направленного на вертикали зондирования вверх по губе, не покидали залив, поэтому выявленный эффект приводил к снижению качества воды в Петрозаводской губе за счет эрозии дна. Этот эффект важен для уточнения гидроэкологических прогнозов развития экосистемы в губе и для оценок изменений качества воды, поступающей в систему водообеспечения данного региона и, прежде всего, г. Петрозаводска. При измерениях в августе 2015 г. структура поля скорости на разрезе по линии максимальных глубин залива определялась дрейфовым течением, струей в термоклине, придонным потоком и другими течениями, вызванными внутренними сейшми.

**Плещеево озеро – река Трубейж.** Система течений определялась движениями вод под влиянием внутренней волны сейшевой природы, ветровой циркуляции и затопленной стратифицированной струи вод р. Трубейж, впадающей в озеро в его южной части. Вертикальная структура такой системы течений хорошо отражается композиционным распределением, которое включает три компоненты:

$$U(z) = U_w + U_{jr} + U_c,$$

где  $U_w$  – волновая,  $U_{jr}$  – интрузионная и  $U_c$  – циркуляционная составляющие скорости течения [Самолубов, Иванова, 2014]. Как показано теоретически в работе [Поддубный, Литвинов, 1983], при любом из преобладающих направлений ветра образуются две вихревые зоны циркуляции, расположенные симметрично относительно продольной или поперечной оси озера. Распределение скорости в горизонтальной плоскости на глубине 3 м характеризуется на разрезе течением с севера на юг, что согласуется с результатами расчетов методом полных потоков (рис. 4). В северо-восточной и северо-западной частях озера циркуляционное течение направлено по ветру, как и в [Поддубный, Литвинов, 1983]. В юго-западной части можно предположить существование локальной циркуляции (пунктир и векторы на рисунке). Эта циркуляция не рассчитывалась в [Поддубный, Литвинов, 1983], так как данное направление ветра не относится к типичным.

В серии комплексных зондирований были обнаружены области распространения взвесенесущей струи вод р. Трубейж, истока вод озера в р. Векса, зоны повышенной мутности на склонах в северной и южной частях озера, зоны действия струи и придонных мутьевых потоков под ней.



**Рис. 4. Распределение скорости в горизонтальной плоскости на глубине 3 м на станциях зондирования** (точки с векторами скорости); предполагаемый ход локальной циркуляции (замкнутые пунктирные кривые со стрелками); преобладающее направление ветра (длинные параллельные тонкие стрелки). Шестиугольники – впадины на рельефе дна, цифры у точек – номера вертикалей на разрезе и номер разреза. Одной цифрой пронумерованы вертикали двух поперечных разрезов. Длины векторов скорости масштабированы по ее значениям от 2 до 10 см/с

**Заключение.** Показаны структуры систем стратифицированных течений с циркуляциями, струями и придонными потоками при различных устойчивостях плотностной стратификации.

Получены данные о влиянии таких систем течений на перенос взвешенных частиц и, следовательно, степень загрязнения за счет стоков рек.

### Литература

*Поддубный С. А., Литвинов А. С.* О горизонтальной циркуляции вод в оз. Плещеево. Функционирование озерных экосистем // Труды ИБВВ АН СССР. Вып. 51 (54). Рыбинск, 1983. С. 13–18.

*Показеев К. В., Самолюбов Б. И., Филатов Н. Н.* Плотностной поток и волновые течения в заливе // Метеорология и гидрология. 2012. С. 83–88.

*Самолюбов Б. И., Иванова И. Н.* Эволюция профилей скорости и турбулентной вязкости в системе течений со сгонно-нагонным и плотностным потоками // Вестн. МГУ, сер. 3 Физ. Астрон. 2014. № 5. С. 60–66.

*Peeters F., Straile D., Lorke A., Ollinger D.* Turbulent mixing and phytoplankton spring bloom development in a deep lake // Limnol. Oceanogr. 2007. Т. 52, N 1. P. 286–298.

*Vidal J., MacIntyre S., McPhee-Shaw E. E. et al.* Temporal and spatial variability of the internal wave field in a lake with complex morphometry // Limnol. Oceanogr. 2013. Т. 58, N 5. P. 1557–1580.

## CIRCULATION AND STRATIFIED FLOWS IN BAYS

**I. N. Ivanova, B. I. Samolyubov**

*Lomonosov Moscow State University*

The paper presents the results of a set of measurements in Volkhov and Petrozavodsk Bays and Lake Pleshcheyevo. The structure of the systems of stratified currents with circulation, jets and near-bottom flow under different stability levels of density stratification is shown. Data were obtained about the impact of such systems on suspended sediment transport and, therefore, the degree of pollution due to river runoff.

## **HYDROPHYSICAL REGIME OF LAKES IN CENTRAL ASIA, TIBET, AND EURASIAN ARCTIC: MAJOR DRIVERS AND CLIMATIC TRENDS**

**G. Kirillin<sup>1</sup>, S. Alymkulov<sup>2</sup>, I. Aslamov<sup>3</sup>, J. Boike<sup>4</sup>, N. Granin<sup>3</sup>,  
A. Izhitskiy<sup>5</sup>, A. Kurbaniyazov<sup>6</sup>, T. Shatwell<sup>1</sup>, L. Wen<sup>7</sup>, P. Zavialov<sup>5</sup>**

<sup>1</sup>*Leibniz-Institute of Freshwater Ecology and Inland Fisheries, Berlin, Germany*

<sup>2</sup>*Institute of Physical and Technical Problems and Materials Science, National  
Academy of Sciences of Kyrgyz Republic, Bishkek, Kyrgyzstan*

<sup>3</sup>*Limnological Institute, Siberian Branch of Russian Academy of Science,  
Irkutsk, Russia*

<sup>4</sup>*Alfred Wegener Institute Helmholtz Center for Polar and Marine Research,  
Potsdam, Germany*

<sup>5</sup>*Shirshov Institute of Oceanology Russian Academy of Science, Moscow,  
Russia*

<sup>6</sup>*Yasavi International Kazakh-Turkish University, Turkestan, Kazakhstan*

<sup>7</sup>*Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy  
of Sciences, Lanzhou, China*

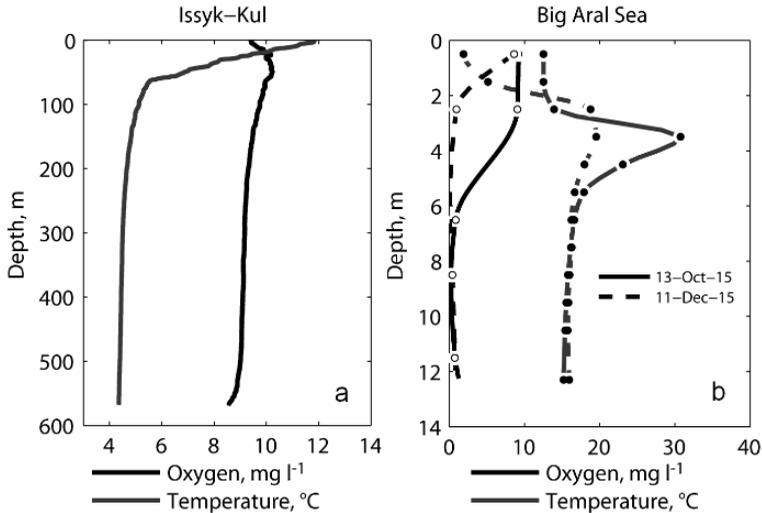
Recent findings from several lake regions of Eurasia are discussed to reveal the typical features of their hydrophysical regime and major threats from the anthropogenic activities and global warming. The continental climate ensures high annual amplitudes in the heat supply; hence the majority of lakes, either in the Arctic or in the Central Asia, tend to dimictic behavior, being well mixed at least twice a year. However, salinization of arid lakes, trend to warmer winters in temperate regions, and deepening of Arctic lakes due to permafrost thaw can produce quick and drastic changes in the lake mixing regimes.

The continent of Eurasia hosts several major lake systems. Their value for the regional and global climate, water resources, and sustainable ecosystem functioning can hardly be overestimated. While some of the lake systems – like the “European Great Lakes” Ladoga and Onega, the post-glacial lakes of Fennoscandia, Lake Baikal – are relatively well investigated, many key lake regions have attracted the attention only recently (e.g. the thermokarst lake landscapes of Siberian tundra), or lack systematic studies almost completely (e.g. the large lakes of arid climatic zone of Central Asia and the lake system of Tibetan Plateau).

Being the largest of the continents, Eurasia is characterized by the continental climate and its subtypes, cold semi-Arid, cold Arid, and sub-Arctic climates. Therefore, the absolute majority of Eurasian lakes undergo strong seasonal variations in the heat exchange with the atmosphere, with typical surface temperatures varying in the range of tens of degrees Celsius

within a year, and crossing the value of the maximum density for freshwater of  $\sim 4$  °C. This fact determines the main feature of their physical regime: stable vertical stratification with respect to temperature during the most part of the year, interrupted by two complete mixing events (overturns) twice a year, when lake temperatures arrive at the maximum density value. Hence, the main distinctive feature of Eurasian lakes is *dimixis* in terms of Hutchinson's classification [Hutchinson, Löffler, 1956; Kirillin, Shatwell, 2016]. Even the thermokarst lakes of sub-Arctic and Arctic tundra gain enough heat in summer to develop stable thermal stratification, so that all lakes with mean depths  $>5$  m are suggested to maintain continuous stratification for the largest part of the summer open water period [Boike et al., 2015]. The lack of the intense exchange of deep lake waters with the atmosphere during several months of stratification determines the biogeochemical processes in the lakes, which may have climatic effects on regional and global scales. Lake sediments are thought to be one of the major sources of methane, having a strong influence on the greenhouse effect [Holgerson, Raymond, 2016; Wik et al., 2016]. As stratification typically prevents oxidation of methane [McGinnis et al., 2015], the increase of lake depth due to thawing permafrost [Langer et al., 2016] may produce strong intensification of methane production and release to the atmosphere from the large areas of Siberian tundra. Thus, the transition of shallow *polymictic* (i.e. regularly mixed and oxidized to the bottom) lakes and ponds may play a significant role in the positive feedback between warming in the Arctic and methane release.

The lakes of the arid and alpine regions of Eurasia, such as Central Asia and Tibet, are especially sensitive to the regional hydrological balance. Due to dry climatic conditions, many of these lakes are endorheic, having no outflows, and are therefore subject to salinization, with dissolved salts affecting the hydrophysical conditions, in particular, vertical mixing. The mixing regime of brackish and saline lakes, especially the deep ones, is often not dimictic but rather *oligomictic*, with deep having retention times of several years or decades, or *meromictic*, with salt stratification preventing the exchange of waters between different layers completely. Some oligomictic lakes reveal complex mechanisms of the deep water renewal, which apparently include horizontal exchange between lakes areas with various mean water depth driven by differential cooling and heating, large-amplitude internal waves and inflows. Hence, the lake waters remain well oxidized down to several hundred or thousand meters (Fig. 1, a). Still, the exact mechanisms of the deep water renewal are not completely understood and require investigation in order to estimate the potential impact of changes in the heat and water budget on the deep lakes.

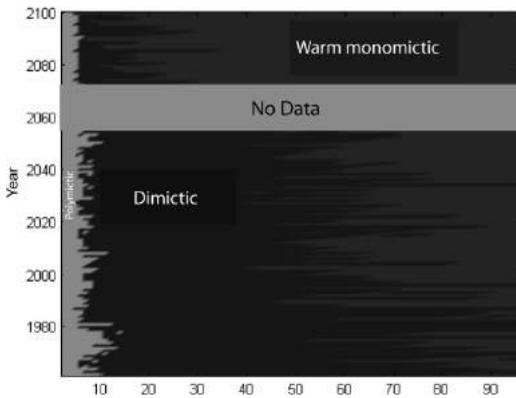


**Fig 1. Vertical distribution of temperature and dissolved oxygen (a) in Issyk-Kul in October 2016 and (b) in the Big Aral Sea in October and December 2015**

The fact that anthropogenic alteration of the regional water budget may change completely the mixing regime of lakes is demonstrated by the notorious example of the Aral Sea. Formerly a brackish dimictic lake, the Aral Sea turned into a number of isolated water bodies with diverging characteristics, after losing about 80 % of its water volume [Izhitskiy et al., 2016]. The second largest remaining basin, the *Small Aral*, is still dimictic, feed by the Syrdarya River and isolated by a man-made dam from the rest of the former water area. Yet, the largest remaining basin, the *Big Aral*, has lost completely the Amudarya inflow and became to a hypersaline meromictic lake revealing extraordinary physical conditions with acute effects on biogeochemical processes. The strong chemocline (halocline) persists in the lake at water depths of about 5 m. The origin of the chemocline is most probably endogenic, resulting from intrusion of water with different salinity from one of neighboring basins. However a biogenic contribution to the density gradient cannot be excluded: The epilimnion waters above the halocline are densely populated by zooplankton typical for hypersaline lakes (*Artemia Salina*), while the dead biological material accumulates in the halocline, with high rates of degradation, characterized by a strong peak of turbidity and drop of the dissolved oxygen content to zero. The high transparency of the upper layer allows effective storage of solar radiation in the upper several meters of the water column, while the strong vertical stability

due to salt gradient prevents upward release of heat. As a result, the Big Aral represents now a “solar trap”, accumulating solar energy with a local temperature maximum forming at the chemocline. In October, at the intense atmospheric cooling, the water temperatures in the chemocline exceeded 30 °C, while surface temperatures were about 10°C, and the daily mean air temperatures were at 0 °C (minimum values around -12 °C). The thermal regime is unique for the Aral Sea; other hypersaline lakes, like the Dead Sea or Lake Urmia, do not undergo such strong seasonal variations in the surface heat fluxes. The newly formed meromictic regime implies consequences at the regional scales, in the biogeochemical regime, as the monimolimnion of the lake accumulates continuously increasing amount of methane during the last years, as well as in the regional climate, as lake represents in winter a warm spot on the surface, slowly releasing the accumulated heat onto the atmosphere.

Changing of the seasonal mixing regime from dimictic to meromictic typically requires an anthropogenic intervention into the water budget, and endangers mostly the lakes of arid climate zone, where the hydrological regime is particularly vulnerable. There is however another potential threat for the lake mixing regimes, determined by the observed positive trend in surface lake temperatures. The latter is considered to be an indicator of global warming and is reported to be especially strong in northern temperate lakes in winter. The existing future climate scenarios predict that, if the warming trend persists for next several decades, dimictic lakes located in regions of Europe with mild temperate climate will never cool below the maximum density temperature, changing thus their mixing regime to *warm monomictic*, without a winter stratification period. The mixing regime transition will take place first in deeper lakes, while the shallower ones will possess the winter stratification for longer, i.e. the capacity to store heat throughout wintertime depends directly on the mean depth (Fig. 2). The consequences of the physical regime change for biogeochemistry of lakes may appear manifold. The absence of winter stratification suggests higher mixing rates and better oxygen supply to the hypolimnion in winter. On the other hand it also implies a stronger supply of nutrients to the epilimnion together with the better light conditions in an ice- and snow free lake, hence favoring phytoplankton development and eutrophication. Other potential negative effects of vanishing winter stratification are higher near-bottom temperatures in summer and a longer summer stratification period [Kirillin, 2010]. Both factors favor bacterial activity in lake sediments, accelerate biodegradation of organic matter and, as a result, increase oxygen consumption and methane production. Deep anoxia in previously well-oxygenated lakes and a stronger contribution of these lakes to methane release may be hypothesized as possible global outcomes.



**Fig. 2 Scenarios of the mixing regime transition in lakes of Western Europe after Kirillin [2010]**

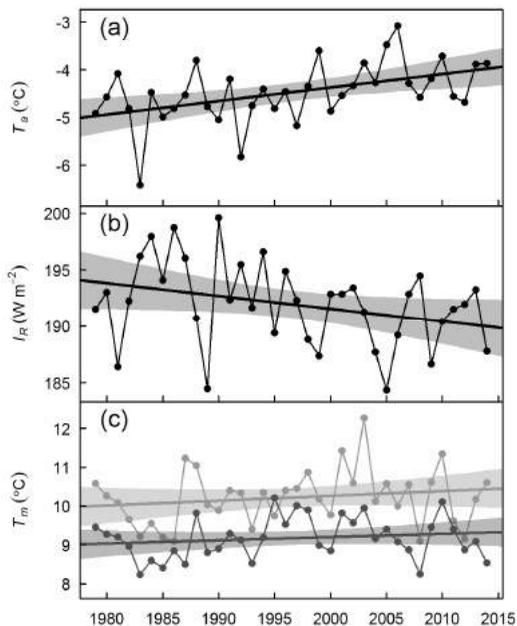
revealed from the analysis of temperature variations in lake temperatures on Tibetan Plateau [Kirillin et al., 2017]. According to 40-year long modeling outcomes, no significant trend in lake temperatures on Tibet was present, also confirmed previously by the shorter dataset of O'Reilly et al. [2015]. Analysis of the modeling results demonstrated that the effect of the increased air temperatures on the lakes was compensated by decrease in the incoming solar radiation (Fig. 2). The radiation decrease can be hypothetically related to the direct effect of anthropogenic aerosols at high altitudes. Another possible reason for the decrease of solar radiation over the Tibetan Plateau might be an increased evaporation and the resulting higher air humidity, which is also supported by positive trends in the humidity and cloud amounts present in the reanalysis data. In particular, Shen et al. [2015] report local cooling over the Tibetan Plateau due to increased evaporation resulting from increased vegetation growth. Still, the exact mechanisms of the decrease in the solar radiation of the Tibetan Plateau require further investigation.

The lake system of Tibet reveals the non-linearity of the lake-atmosphere interaction and demonstrates the decisive role of solar radiation as a major physical driver of lake dynamics. Solar radiation influence on the lake dynamics is especially strong in continental conditions of Eurasia: as shown above, in saline lakes like the Aral Sea the salt gradients increase the storage of the radiative heat; in turn, in alpine regions like Tibet the radiation effect is even stronger due to the high transparency of the atmosphere. The recent data from Lake Ngoring, the largest freshwater lake of Tibetan Plateau demonstrate that solar heating

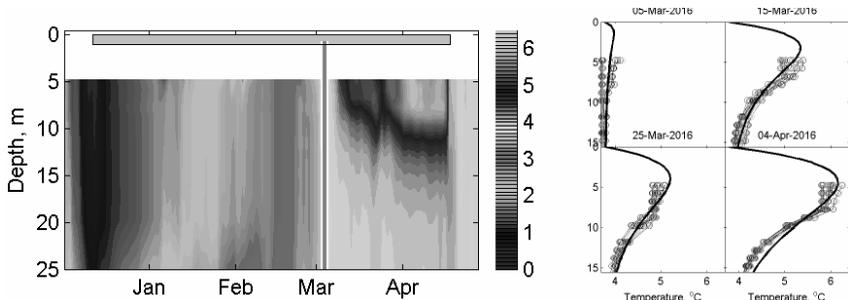
However, neither existing climate scenarios nor the long-term data from lakes worldwide provide a clear quantitative prediction for the dimictic-monomictic transition. Moreover, many lakes do not demonstrate any appreciable warming despite significant positive trends in local air temperatures [O'Reilly et al., 2015]. One reason for decoupled temperature trends in lakes and in the atmosphere was recently

remains to be the main driving force for the lake dynamics also in the ice-covered period: The high amount of solar radiation at the surface and the low snow amount ensure strong radiative heating of the water column under ice immediately after ice cover formation. As a result, the water temperature beneath the ice achieves the maximum density 1.5 months before the ice breakup. As a result, stable vertical stratification of “summer type” develops in the bulk of the water column with temperatures right beneath the ice cover grown up to 6 °C. Hence, the freshwater lakes of Tibet are not dimictic; their mixing regime can be called “*trimictic*”, having an additional overturn event under ice. It should be noted that freshwater lakes comprise only about 10 % of the Tibetan lake system; ~75 % of the lakes have brackish or saline water (the salt content of the rest of the lakes is unknown). Since salinity prevents convective mixing due to heating at temperatures above 4 °C, the water temperatures in winter may exceed significantly the values observed in Lake Ngoring, arriving at ~10 °C under ice.

The above discussed recent findings demonstrate the fragility of the hydrophysical regime of Eurasian lakes. The continental climate ensures high annual amplitudes in the heat supply hence the majority of lakes, either in the Arctic or in the Central Asia, tend to dimictic behavior, being well mixed at least twice a year. Among the major threats to the seemingly stable seasonal mixing patterns of Eurasian lakes are anthropogenic salinization of arid lakes, trend to warmer winters in temperate regions, and deepening of Arctic lakes due to permafrost thaw.



**Fig. 3.** Trends in the air temperature (a), incoming solar radiation (b), and water temperature (c) in two lakes of Tibetan Plateau (after Kirillin et al., 2017)



**Fig. 4. Temperatures under ice in Lake Ngoring, the largest freshwater lake of the Tibetan Plateau. Black solid lines are the estimations made with the model of Kirillin and Terzhevik [2011]**

**Acknowledgements.** This study was supported by the Russian Foundation for Basic Research, project no. 15-55-12378 NNIO\_a, German Research Foundation, project no. KI 853/11-1, and Sino-German Center for Science Support, Project GZ 1259.

### References

- Boike J. et al.* Thermal processes of thermokarst lakes in the continuous permafrost zone of northern Siberia – observations and modeling (Lena River Delta, Siberia) // *Biogeosciences*. 2015. T. 12, N 20. C. 5941–5965.
- Holgerson M. A., Raymond P. A.* Large contribution to inland water CO<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub> emissions from very small ponds // *Nat. Geosci.* 2016. T. 9, N 3. C. 222–U150.
- Hutchinson G. E., Löffler H.* The thermal classification of lakes // *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 1956. T. 42, N 2. C. 84–86.
- Izhitskiy A. S. et al.* Present state of the Aral Sea: diverging physical and biological characteristics of the residual basins // *Sci Rep.* 2016. T. 6. C. 23906.
- Kirillin G.* Modeling the impact of global warming on water temperature and seasonal mixing regimes in small temperate lakes // *Boreal Environ. Res.* 2010. T. 15, N 2. C. 279–293.
- Kirillin G., Terzhevik A.* Thermal instability in freshwater lakes under ice: Effect of salt gradients or solar radiation? // *Cold Regions Science and Technology*. 2011. T. 65, N 2. C. 184–190.
- Kirillin G., Shatwell T.* Generalized scaling of seasonal thermal stratification in lakes // *Earth-Science Reviews*. 2016. T. 161. C. 179–190.
- Kirillin G., Wen L., Shatwell T.* Seasonal thermal regime and climatic trends in lakes of the Tibetan highlands // *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 2017. T. 21, N 4. C. 1895–1909.
- Langer M. et al.* Rapid degradation of permafrost underneath waterbodies in tundra landscapes-Toward a representation of thermokarst in land surface models // *J. Geophys. Res.-Earth Surf.* 2016. T. 121, N 12. C. 2446–2470.

*McGinnis D. F. et al.* Enhancing surface methane fluxes from an oligotrophic lake: exploring the microbubble hypothesis // *Environmental science & technology*. 2015. Т. 49, N 2. С. 873–880.

*O'Reilly C. M. et al.* Rapid and highly variable warming of lake surface waters around the globe // *Geophys. Res. Lett.* 2015. Т. 42, N 24. С. 2015GL066235.

*Shen M. et al.* Evaporative cooling over the Tibetan Plateau induced by vegetation growth // *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 2015. Т. 112, N 30. С. 9299–9304.

*Wik M. et al.* Climate-sensitive northern lakes and ponds are critical components of methane release // *Nat. Geosci.* 2016. Т. 9, N 2. С. 99.

## **ГИДРОЛОГИЧЕСКИЙ РЕЖИМ ОЗЕР ЦЕНТРАЛЬНОЙ АЗИИ, ТИБЕТА И ЕВРАЗИЙСКОЙ АРКТИКИ: ОСНОВНЫЕ ДРАЙВЕРЫ И КЛИМАТИЧЕСКИЕ ТРЕНДЫ**

**Г. Кириллин, С. Алимкулов, И. Аславов, Дж. Бойке, Н. Гранин, А. Ишитский, А. Курбаниязов, Т. Шатвелл, Л. Вен, П. Завьялов**

Обсуждены новые результаты исследований в различных озерных регионах Евразии с целью выявить типичные черты их гидрофизического режима и основные угрозы, связанные с антропогенной активностью и глобальным потеплением. Континентальный климат характеризуется большими сезонными амплитудами потоков тепла, вследствие чего большинство озер от Арктики до Средней Азии имеет димиктический сезонный режим, полностью перемешиваясь, как минимум дважды в год. Однако осолонение аридных озер, тенденция к теплым зимам в умеренных регионах и углубление термокарсовых озер Арктики в результате таяния мерзлоты способны коренным образом и в короткое время изменить их гидрофизический режим.

## **ОТЛИК ГИДРОФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ РАЗЛИЧНЫХ ТИПОВ ОЗЕР ЕВРАЗИИ НА ЭКСТРЕМАЛЬНЫЕ КЛИМАТИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ (ПРОЕКТ ERALECC ПРОГРАММЫ ERA.NET RUS PLUS S&T)**

**А. В. Кураев<sup>1-3</sup>, М. А. Науменко<sup>4</sup>, Н. М. Буднев<sup>5</sup>, М. Н. Шимараев<sup>6</sup>, Е. Троицкая<sup>8</sup>, В. В. Гузиватый<sup>5</sup>, С. Г. Каретников<sup>5</sup>, Е. А. Захарова<sup>1,2</sup>, F. Rémy<sup>1</sup>, С. В. Ловцов<sup>5</sup>, В. Pius<sup>7</sup>, R. Przybylak<sup>7</sup>, W. Marszelewski<sup>7</sup>, А. Я. Сукнёв<sup>8</sup>**

<sup>1</sup>*LEGOS, Universite de Toulouse, CNES, CNRS, IRD, UPS Toulouse, France*

<sup>2</sup>*Государственный Океанографический институт,*

*Санкт-Петербургское отделение*

<sup>3</sup>*Томский государственный университет*

<sup>4</sup>*Институт озероведения РАН, Санкт-Петербург*

<sup>5</sup>*Иркутский государственный университет*

<sup>6</sup>*Лимнологический институт СО РАН, Иркутск*

<sup>7</sup>*Nicolaus Copernicus University, Torun, Poland*

<sup>8</sup>*Большая Байкальская Тропа Бурятия (ББЕ Бурятия), Улан-Удэ*

Программа ERA.Net RUS-Plus (2013–2018) направлена на усиление координации научно-исследовательских программ между государствами-членами ЕС (а также ассоциированными с ЕС странами) и Российской Федерацией. Проект ERALECC изучает, как экстремальные климатические явления влияют на функционирование и окружающую среду озер в России (Байкал и Ладога) и Европе (озера в Польше). Эти озера имеют различную площадь, глубину и объем и расположены в разных климатических зонах. Это делает их хорошими объектами для изучения и оценки их реакции на внешние условия на различных пространственных и временных масштабах.

Ввиду их отклика на региональные и глобальные изменения в климатической системе озера являются не только интегратором климатических процессов, но и хорошим индикатором существующих или потенциальных изменений, особенно тех, которые связаны с экстремальными климатическими условиями. Такие экстремальные явления проявляют себя в различных состояниях окружающей среды со специфическими (необычными или редкими) интенсивностью, частотой и продолжительностью. Среди них можно назвать проливные дожди или обильный снегопад, или же необычно сухие условия, периоды экстремально жаркой или холодной погоды, штормы, экстремальные (высокие или низкие) значения температуры воздуха, испарения, осадков, ледовые условия, речной сток, уровень воды и т. д. Важно понять, как экстремальные климатические или погодные условия влияют на состояние и изменчивость природных условий этих озер (таких как горизонтальная и вертикальная структура воды, поле течений, фронтальные зоны, апвеллинги, круговороты, ледовый и снеговой режим, уровень воды), каковы механизмы дальних и обратных связей, эффекты памяти и механизмы, ответственные за изменения, и каково их воздействие на окружающую среду озер и на деятельность и условия жизни людей.

Общая цель проекта ERALECC заключается в оценке воздействия экстремальных климатических явлений на гидрологические, криосферные и экологические условия озер с помощью междисциплинарного подхода, основанного на натуральных наблюдениях (исторические наблюдения, специальные полевые работы) и данных спутникового дистанционного зондирования. Исследование будет основываться на уже существующих знаниях и понимании природных процессов, но

значительный шаг вперед будет сделан благодаря объединению специализированных полевых наблюдений с современными методами исследования Земли из космоса, находящимися в распоряжении партнеров проекта ERALECC.

Проведен анализ зависимости ледовых условий двух крупнейших озер Азии и Европы – Байкала и Ладоги – от региональных значений арифметической суммы среднесуточных зимних температур воздуха и от глобальных атмосферных процессов, выраженных индексами атмосферной циркуляции. Ранжирование зим по суммам среднесуточных зимних температур воздуха позволило выделить однотипные по суровости зимы для регионов Ладоги и Байкала. Для однотипных зим резко улучшаются корреляционные зависимости ледовых характеристик от сумм зимних температур воздуха и индексов атмосферной циркуляции, а также ледовых характеристик двух озер между собой. Межгодовые изменения характеристик ледового режима Ладоги и Байкала во многом определяются одними и теми же атмосферными процессами.

В докладе будут также представлены результаты исследований ледового и снежного покрова континентальных водных объектов с использованием комбинации более чем 20-летних рядов одновременных спутниковых наблюдений в активном (радарный альтиметр) и пассивном (радиометр) микроволновом спектре с использованием данных альтиметрических спутников (TOPEX/Poseidon, Jason-1, ENVISAT, Geosat Follow-On и SARAL/AltiKa) с привлечением пассивных микроволновых данных датчика SSM/I. В качестве примера рассмотрены Каспийское и Аральское моря, озера Байкал, Ладога и Онега. Представлен метод детекции льда с использованием спутниковых данных, а также его валидация по натурным данным и независимым спутниковым данным в видимом диапазоне спектра. Представлены результаты полевых исследований на озерах Ладога и Байкал.

Исследование поддержано проектами ERA.NET RUS Plus S&T #226 ERALECC, CNES TOSCA Lakece, IDEX Transversalité InHERA, РФФИ 13-05-91051 «Озера Байкал и Ладога – комплексные совместные исследования», РФФИ-РГО 17-05-41043-РГО-а «Особенности водообмена в глубоких озерах на примере озер Иссык-Куль и Байкал».

**THE RESPONSE OF HYDROPHYSICAL PROCESSES OF DIFFERENT  
TYPES OF LAKES IN EURASIA AT THE EXTREME  
CLIMATIC CONDITIONS  
(ERA.NET RUS PLUS S&T PROJECT ERALECC)**

**A. V. Kouraev<sup>1-3</sup>, M. A. Naumenko<sup>4</sup>, N. M. Budnev<sup>5</sup>, M. N. Shimaraev<sup>6</sup>,  
E. Troitskaya<sup>8</sup>, V. V. Guzivatyi<sup>5</sup>, S. G. Karetnikov<sup>5</sup>, E. A. Zakharova<sup>1,2</sup>, F. Rémy<sup>1</sup>,  
S. V. Lovtsov<sup>5</sup>, B. Pius<sup>7</sup>, R. Przybylak<sup>7</sup>, W. Marszelewski<sup>7</sup>, A. Ya. Suknev<sup>8</sup>**

<sup>1</sup>*LEGOS, Université de Toulouse, CNES, CNRS, IRD, UPS Toulouse, France*

<sup>2</sup>*State Oceanography Institute, St. Petersburg Branch*

<sup>3</sup>*Tomsk State University*

<sup>4</sup>*Institute of Limnology RAS*

<sup>5</sup>*Irkutsk State University*

<sup>6</sup>*Institute of Limnology of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences*

<sup>7</sup>*Nicolaus Copernicus University, Torun, Poland*

<sup>8</sup>*Большая Байкальская Тропа Бурятия (ББЕ Бурятия), Улан-Удэ*

The ERA.NET RUS Plus ERALECC project addresses how extreme climate events affect functioning and environment of lakes in Russia (Baikal and Ladoga) and Poland (Charzykowskie, Hańcza, Mikołajskie and Śląskie). These lakes have different surface area, depth and volume and are located in different climatic zones. This makes them good objects for comparative study of their response at different spatial and temporal scales.

The goal of the Project is to assess impact of extreme climate events the lakes hydrological, cryospheric and environmental conditions through a multidisciplinary approach based on in situ (historical observations, dedicated field surveys) and satellite remote sensing data.

We present analysis of ice conditions of lakes Baikal and Ladoga in the context of air temperature variability and global atmospheric processes (indexes of atmospheric circulation). We also present study of ice and snow cover of continental water bodies using combination of active (radar altimetry) and passive (radiometry) microwave satellite data, as well as by field observations.

**АНТРОПОГЕННОЕ ПРЕОБРАЗОВАНИЕ  
ОЗЕРНО-РЕЧНОЙ СИСТЕМЫ  
РЕКИ НИЖНИЙ ВЫГ (РЕСПУБЛИКА КАРЕЛИЯ)**

**А. В. Литвиненко, Н. Н. Филатов, М. С. Богданова, В. А. Карпечко**

*Институт водных проблем Севера КарНЦ РАН*

Показан уникальный процесс антропогенного преобразования одного из самых крупных озер Карелии – Выгозера и водных объектов на его водосборе. Дана характеристика поэтапного изменения и современного состояния морфометрических характеристик и некоторых элементов водного режима.

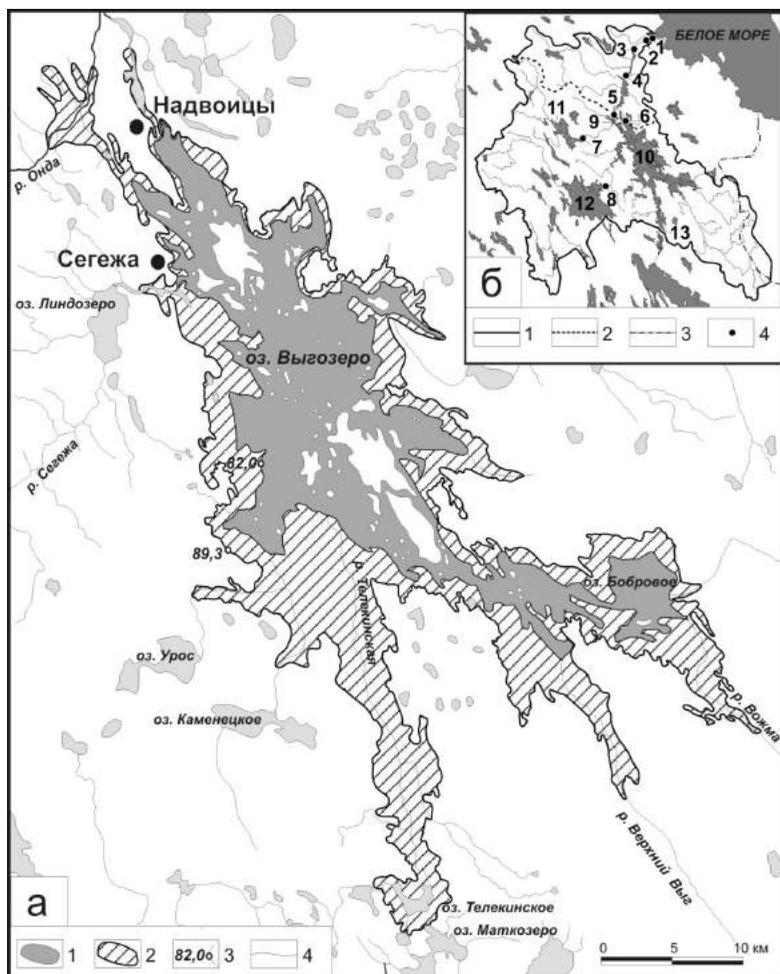
Процесс гидротехнического освоения гидрографической сети, как правило, приводит к существенным преобразованиям водных объектов, сопровождающимся серьезной перестройкой функционирования водных и прибрежных экосистем. Особенно это характерно при использовании водоемов и водотоков для целей гидроэнергетики и водного транспорта. В этом плане очень показателен пример трансформации системы р. Нижний Выг (и, в частности, ее составляющей озера Водлозеро), явившейся основой создания стратегически важной водно-транспортной артерии Беломорско-Балтийского канала и одного из крупных карельских гидроэнергетических каскадов – Выгозерского.

Выгозеро – крупнейший водоем в бассейне р. Выг и один из самых больших по площади в Карелии – в течение XX столетия подверглось двум крупным антропогенным трансформациям, связанным с гидротехническим освоением бассейна р. Нижний Выг (гидроэнергетика, водный транспорт). В результате экосистемы самого озера и ряда водных объектов на водосборе р. Нижний Выг дважды претерпели существенные изменения.

Первое крупное преобразование связано со строительством в 1932 г. Беломорско-Балтийского канала (ББК), соединившего Белое море с Онежским озером. Выгозерское вдхр, созданное в 1933 г. на базе Выгозера и ряда других более мелких озер путем повышения их уровня Надвоицкой регулирующей плотиной, стало частью трассы ББК (рис.), а сама р. Нижний Выг была превращена в крупную гидротехническую систему – северный склон ББК. На этом этапе своего функционирования основной целью Выгского вдхр было обеспечение гарантированных глубин для судоходства в северной части канала.

Авторами была проведена реконструкция гидрографической сети бассейна р. Нижний Выг и оз. Выгозеро на 1930 г., выполненная на основе архивных материалов (рис.).

С 1954 г. началось развитие энергетического использования водных ресурсов р. Нижний Выг и дальнейшее преобразование гидрографической сети [Литвиненко, 1999; Литвиненко и др., 2014]. На р. Онде – притоке р. Нижний Выг, в 9,5 км от устья был сооружен Ондский гидроузел, подперший реку до уровня Выгозерского вдхр. Пользуясь близостью к р. Онде притока Выгозера – Тимошкина ручья – в 1954 г. на его основе был создан саморегулирующийся (с изменяющимся направлением течения) Майгубский канал, соединивший верхний бьеф Ондской ГЭС с Выгозерским вдхр. Он может работать в двух режимах. В период весеннего половодья на турбины ГЭС поступает сток р. Онды, а воды р. Верхний Выг аккумулируются в Выгозере. В него же по каналу также поступают избыточные ондские воды, не используемые на Ондской ГЭС.



**Водохозяйственный комплекс бассейна Выгозерско-Ондского водохранилища:**

а – реконструкция гидрографической сети на основе карты Северного района Беломорско-Балтийского водного пути, 1930 г. (НА РК, ф. 563, оп. 1, д. 18): 1 – Выгозеро в естественном состоянии; 2 – современные очертания Выгозерско-Ондского водохранилища; 3 – отметка уреза воды; 4 – реки;

б – бассейн Выгозерско-Ондского водохранилища: 1 – границы бассейна Беломорско-Балтийского канала; 2 – границы водосбора Выгозерско-Ондского водохранилища; 3 – границы Республики Карелия; 4 – гидротехнические сооружения и водохранилища Выгского каскада (1 – Беломорская ГЭС; 2 – Выгостровская ГЭС; 3 – Маткоженская ГЭС; 4 – Палокоргская ГЭС; 5 – Ондская ГЭС; 6 – Надвоицкая плотина; 7 – Ондозерская плотина; 8 – Сегозерская плотина; 9 – Ондское вдхр.; 10 – Выгозерское вдхр.; 11 – Ондозерское вдхр.; 12 – Сегозерское вдхр.)

В маловодный период на станцию подаются воды р. Онды и сток, поступающий по каналу с Выгозерского вдхр [Григорьев, 1961; Литинская, 1994]. Эта схема пока является единственной в практике отечественного гидроэнергетического строительства. Таким образом, было создано объединенное Выгозерско-Ондское вдхр, регулирующее внутригодовой сток воды в створе Ондского гидроузла.

Одновременно в истоке р. Сегежи, впадающей в Выгозерско-Ондское вдхр, был сооружен Сегозерский гидроузел, плотина которого повысила уровень Сегозера на 6,3 м, создав водохранилище многолетнего регулирования стока. Это обеспечило бесперебойную работу каскада ГЭС, построенных в последующие годы на северном склоне ББК.

В результате реконструкции гидрографической сети бассейна р. Нижний Выг, выразившейся в сооружении 9 гидроузлов, ряд его крупных озер (Выгозеро, Сегозеро, Ондозеро) превращены в водохранилища, образованы новые водоемы – верхние бьефы ГЭС (рис.). При этом затоплено около 900 км<sup>2</sup> территории, а озерность бассейна увеличилась на 4 %. В результате создания Выгозерского вдхр ряд водных объектов прекратили свое существование (озера Телекинское, Бобровое, р. Телекинская, нижние течения других притоков).

У притоков Выгозера уменьшились длина и водосборная площадь. Для озер, ставших водохранилищами, изменились морфометрия и удельный водосбор. Аккумулирующая способность озер увеличилась, а водообмен, в результате аккумуляции дополнительных масс воды, уменьшился. Практически весь сток поверхностных вод бассейна р. Нижний Выг зарегулирован [Кабранова, 1977; Литинская, Кабранова, 1978].

Современный гидрологический режим Выгозерско-Ондского вдхр установился с 1957 г. Он зависит от работы Сегозерского, Надвоицкого, Ондозерского и Ондского гидроузлов (рис.). Сегозерский и Ондозерский гидроузлы регулируют приточность, Надвоицкий и Ондский – сработку полезной емкости.

На протяжении десятков лет эксплуатации ББК существенно изменился гидрологический режим Выгозера, впадающих рек и озер, расположенных на их приустьевых участках. Представление о трансформации Выгозера – Выгозерского вдхр – Выгозерско-Ондского вдхр дает таблица, в которой показаны средние значения гидрологических параметров.

Схема регулирования водных ресурсов водохранилища, которая предусматривает обеспечение работы каскада Выгских ГЭС, соблюдение требований судоходства, поддержание бесперебойного водоснабжения потребителей, представлена в нормативном документе «Основные положения правил использования водных ресурсов...» [1972]. В них установлены характеристики и условия регулирования уровня воды Выгозерско-

Ондского вдхр – поддержание уровней в диапазоне 89,30 м БС (нормальный подпорный уровень, НПУ) – 88,35 м БС (уровень наибольшей сработки водохранилища перед половодьем – уровень мертвого объема), наполнение полезной емкости, обеспечение судоходных отметок (минимальный навигационный уровень – 89,15 м БС).

### Основные характеристики Выгозерско-Ондского вдхр для различных периодов эксплуатации

Озеро (водохранилище)	Период	Средний уровень, м БС	Площадь зеркала, км <sup>2</sup>	Глубина, м		Объем, км <sup>3</sup>
				средняя	макси- мальная	
оз. Выгозеро	До 1932 г.	82,7	561	6,1	18,0	3,4
вдхр Выгозерское	1934–1955	88,8	1196	7,2	25,0	8,7
вдхр Выгозерско-Ондское	1957–1974	89,1	1270	7,1	25,0	9,1

Таким образом, по сравнению с периодом естественного режима средняя отметка уровня воды в водоеме поднялась с отметки 82,71 до 89,06 м БС (средний годовой уровень за 2000–2004 гг.), или на 6,35 м, объем воды в котловине увеличился в 2,6 раза, изменился внутригодовой уровеньный режим водохранилища.

Наибольшее влияние на гидрологический режим впадающих рек и их приустьевых участков, в том числе р. Сегежи, р. Пезеги и Линдозера, оказало существенное изменение площади зеркала объединенного Выгозерско-Ондского вдхр. Приращение водной поверхности водохранилища по сравнению с периодом до 1931 г. составило 690 км<sup>2</sup>, при этом приращение площади произошло за счет затопления прилегающей территории и устьевых долин малых рек.

Приток в Выгозерско-Ондское вдхр формируется в основном за счет стока рек Сегежи, Верхнего Выга и Вожмы, причем сток р. Сегежи составляет до 50 % от общего стока в водохранилище. На долю рек Верхнего Выга и Вожмы приходится около 25 %. Сток из Выгозерско-Ондского вдхр осуществляется в систему ББК через Ондский гидроузел на каскад Выгских ГЭС (87 %) и через Надвоицкий гидроузел (13 %). Сток через Ондский гидроузел за период 1957–2005 гг. составил 5,8 км<sup>3</sup>.

Внутригодовое распределение притока в Выгозерско-Ондское вдхр зависит от сочетания режима р. Сегежи и естественной приточности с незарегулированной части водосбора. Максимальное поступление речных вод в водохранилище в апреле и, главным образом, в мае обусловлено стоком малых рек, в другие месяцы основную долю составляет сток р. Сегежи.

Работа выполнена при финансовой поддержке проектов РНФ № 14-17-00740-П.

## Литература

*Григорьев С. В.* Внутренние воды Карелии и их хозяйственное использование. Петрозаводск: Гос. изд-во Карельской АССР, 1961. 140 с.

*Кабранова А. И.* Водный баланс Выгозерско-Ондского водохранилища // Сб. работ ЛГМО. Вып. 11. Л.: Гидрометеоздат, 1977. С. 78–93.

*Литвиненко А. В.* К истории гидроэнергетического освоения водных объектов Карелии // Экологические исследования природных вод Карелии. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 1999. С. 21–27.

*Литвиненко А. В., Филатов Н. Н., Богданова М. С. и др.* Антропогенная трансформация и хозяйственное использование озера Выгозеро // Водные ресурсы. 2014. Т. 41, № 4. С. 1–10.

*Литинская К. Д.* Водохранилища в системе водного хозяйства // Использование и охрана водных ресурсов бассейна Белого моря. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 1994. С. 57–72.

*Литинская К. Д., Кабранова А. И.* Зарегулированный режим Выгозерско-Ондского водохранилища // Водные ресурсы Карелии и их использование. Петрозаводск: Карельск. фил. АН СССР, 1978. С. 5–21.

*Основные положения* правил использования водных ресурсов водохранилищ бассейна р. Нижнего Выга (Выгозерского, Сегозерского, Ондозерского, Палокоргского, Маткожненского, Выгостровского и Беломорского). М.: Мин. Мелиорации и вод. хоз-ва РСФСР. Упр. по регулир. и исполыз. вод. рес., 1972. 28 с.

### ANTHROPOGENIC TRANSFORMATION OF THE NIZHNI VYG LAKE-RIVER SYSTEM (REPUBLIC OF KARELIA)

**A. V. Litvinenko, N. N. Filatov, M. S. Bogdanova, V. A. Karpechko**

*Northern Water Problems Institute, KarRC RAS*

The unique process of anthropogenic transformation of one of the largest lakes of Karelia, Vygozero, and waterbodies of its catchment is shown. The characteristic retrospective and modern morphometric parameters and some elements of the water regime are given.

### КЛИМАТИЧЕСКИЕ ФАКТОРЫ МЕЖГОДОВЫХ КОЛЕБАНИЙ И ДОЛГОСРОЧНЫЙ ПРОГНОЗ УРОВНЯ КАСПИЙСКОГО МОРЯ

**В. Н. Малинин, С. М. Гордеева**

*Российский государственный гидрометеорологический университет*

Статья посвящена выявлению генезиса межгодовых колебаний уровня моря и уточнению физико-статистического метода прогноза уровня. Показано, что годовой уровень можно рассматривать как интегральный показатель крупномасштабного влагообмена в системе океан – атмосфера – суша. Предложен простой метод

прогноза уровня моря с годовой заблаговременностью, основанный на использовании легко определяемых значений уровня в Баку в декабре за два предшествующих года, который обеспечивает требуемую точность прогноза.

### **Введение**

Социально-экономическое развитие в прибрежной зоне Каспия связано с колебаниями уровня. Негативное воздействие изменения уровня отражается на рациональном использовании природного потенциала, в частности, земельных, рыбных, рекреационных ресурсов, а также ресурсов нефти и газа. Поэтому изучение причин межгодовых колебаний и особенно долгосрочный прогноз уровня Каспийского моря (УКМ) является чрезвычайно актуальной проблемой. Достаточно сказать, что в 60–70-е гг. прошлого столетия гидрометеорологическая наука «проспала» длительный подъем уровня, начавшийся в конце 70-х, вследствие чего экономический ущерб исчислялся миллиардами долларов. С тех пор прошло полвека, придумано несколько десятков методов сверхдолгосрочного прогноза УКМ, обзор которых содержится в [Водный баланс..., 2016], но ни один из них не получил полного признания, и мы до сих пор не можем уверенно говорить о том, когда начнется новый длительный рост (снижение) УКМ. Это связано с тем, что до настоящего времени «отсутствует ясное понимание механизмов, управляющих изменчивостью уровня» [Водный баланс..., 2016]. В настоящее время надежными можно считать только методы прогноза характеристик уровня моря с годовой заблаговременностью [Калинин и др., 1968; Мещерская, Александрова, 1993; Малинин, 1994а, б; Абузьяров, 2009]. В связи с этим основными задачами данной работы являлись выявление генезиса межгодовых колебаний уровня моря и уточнение физико-статистического метода прогноза УКМ.

### **Генезис межгодовых колебаний уровня моря**

Еще в 90-е гг. прошлого столетия причины межгодовых колебаний УКМ были рассмотрены одним из авторов [Малинин, 1994а] в рамках генетической модели формирования межгодовых колебаний УКМ, сделан вывод о том, что уровень Каспия следует рассматривать как интегральный показатель крупномасштабного влагообмена в системе океан – атмосфера – суша. В этих работах на основе статистического анализа компонент водного баланса за более чем 100-летний период показано, что наибольший вклад в изменчивость приращений уровня (более 70 % дисперсии) дает приток речных вод, а если конкретнее, то зона формирования стока Волги, находящаяся за тысячи километров от самого моря. Именно здесь за счет межгодовой изменчивости увлажнения поверхности суши

формируется генетический сигнал, который затем как сток Волги поступает в море и в значительной степени влияет на межгодовые колебания уровня. Очевидно, что формирование стока от начала половодья до начала следующего половодья такой крупной реки, как Волга, практически полностью зависит от предшествующего увлажнения в ее бассейне. В свою очередь, общее увлажнение представляет собой разность осадки минус испарение, причем межгодовая изменчивость осадков для сравнительно больших территорий значительно выше межгодовой изменчивости суммарного испарения. Поэтому осадки контролируют межгодовые колебания увлажнения в бассейне Волги и описывают преобладающую долю дисперсии межгодовых колебаний УКМ [Малинин, 1994б].

В дальнейших работах [Малинин и др., 2003, 2015] выявлено воздействие комплекса процессов крупномасштабного взаимодействия океана и атмосферы в Северной Атлантике (СА) на межгодовую изменчивость зонального переноса водяного пара. При усилении процессов циклонической активности в СА и, прежде всего, в области исландской депрессии происходит возрастание испарения и понижение температуры поверхности океана. При этом увеличивается влагосодержание атмосферы. Кроме того, усиление циклонической активности вызывает повышение зональной составляющей эффективной скорости горизонтального переноса атмосферной влаги, характеризующей количество переносимого водяного пара в системе средней циркуляции атмосферы и крупномасштабных синоптических вихрей. Наконец, при росте циклонической активности происходит углубление Исландского минимума давления и его пространственные миграции. В свою очередь, его углубление усиливает интенсивность Североатлантического колебания, которое в значительной степени регулирует адвективный (за счет средней циркуляции) зональный перенос атмосферы в умеренных широтах. Все это должно приводить к значительному повышению зонального переноса водяного пара в системе общей циркуляции и синоптических вихрей на европейский континент и европейскую территорию России. При ослаблении циклонической и возрастании антициклонической активности картина будет меняться на противоположную. Это позволяет всю цепочку причинно-следственных связей формирования межгодовых колебаний УКМ представить в виде концептуальной модели (рис.), из которой видно, что генезис межгодовых колебаний УКМ обусловлен особенностями крупномасштабного взаимодействия океана и атмосферы в СА. Итак, приходим к выводу, что уровень Каспия можно рассматривать как интегральный показатель крупномасштабного влагообмена в системе океан – атмосфера – суша.



### Генетическая модель формирования межгодовых колебаний уровня моря

#### Прогноз уровня моря с годовой заблаговременностью

Физико-статистический метод прогноза УКМ с годовой заблаговременностью, разработанный в 1994 г. [Малинин, 1994б], состоит из трех последовательных этапов: прогноз годового стока Волги, прогноз внутригодовых изменений объема моря  $\Delta V$ , прогноз годового уровня. Для прогноза годового стока используются характеристики увлажнения в бассейне Волги за два предшествующих года, далее прогностические оценки стока применяются для прогноза  $\Delta V$ , которые, в свою очередь, входят в расчетную схему прогноза УКМ. Несмотря на высокую точность прогностических оценок УКМ, происходит некоторое накопление ошибок к конечному этапу прогнозирования. Кроме того, при прогнозе стока Волги в качестве предикторов используются, в частности, коэффициенты испаряемости, оценка которых вызывает определенные затруднения. В связи с этим желательно такое уточнение рассматриваемого подхода, которое бы позволяло с высокой точностью получить прогноз УКМ только на основе легко определяемых характеристик.

Исходя из физико-статистического метода, запишем простую двухпараметрическую модель оценки среднегодовых значений УКМ в  $i$ -й год в виде:

$$h_i = f(h_{12(i-1)}, \Delta V_i) = f(h_{12(i-1)}, \Delta h_i), \quad (1)$$

где  $h_{12(i-1)}$  – уровень в декабре предшествующего года,  $\Delta h_i = h_{12(i)} - h_{12(i-1)}$  – внутригодовые приращения уровня. Значения  $h_{12(i-1)}$  и  $\Delta h_i$  характеризуют, соответственно, инерционную и динамическую составляющие в изменениях уровня. Итак, для прогноза УКМ на один год нужно знать фактические значения  $h_{12(i-1)}$  и прогностические оценки  $\Delta h_i$ . Очень важно, что первый предиктор дает главный вклад в формирование  $h_i$ , причем роль его увеличивается в периоды монотонных изменений уровня. Это означает, что, во-первых, нет необходимости предъявлять слишком жесткие требования к прогнозам  $\Delta h_i$ , а, во-вторых, приближенный прогноз уровня может быть дан уже только на основе данных о  $h_{12(i-1)}$ . Из формулы (1) видно, что среднегодовой УКМ может быть предвычислен по данным об уровне за декабрь текущего и предшествующего года.

В качестве исходных данных в расчетах использовался уровень моря в г. Баку за период с 1968 по 2009 г. При этом зависимая выборка принималась за 1968–2000 гг., а независимая – за период с 2001 по 2009 г. Отметим, что межгодовой ход уровня в г. Баку очень тесно связан с осредненным по всей акватории моря уровнем, за который обычно принимаются результаты осреднения данных по четырем уровнемерным станциям: Баку, Махачкала, Красноводск, Форт-Шевченко. Коэффициент корреляции уровня в Баку со средним уровнем моря составляет  $r = 0,98-0,99$ .

Использование классической модели множественной линейной регрессии для расчета среднегодового уровня моря на основе фактических данных об уровне за декабрь текущего и предшествующего года позволило получить следующее уравнение:

$$h_i = 10,47 + 0,51h_{12(i-1)} + 0,49h_{12(i)}. \quad (2)$$

Весьма важно, что коэффициенты данной зависимости очень мало меняются с изменением объемов зависимой и независимой выборок. Коэффициент детерминации данной модели, показывающий долю объясненной дисперсии функции отклика, очень близок к единице ( $R^2 = 0,998$ ). При этом расчет  $h_i$  по независимым данным (табл.) показал, что стандартная ошибка модели почти не изменилась по сравнению с обучающейся выборкой (2,8 и 2,7 см/год, соответственно). Очевидно, величину 2,8 см/год можно рассматривать как теоретическую ошибку физико-статистического метода, т. е. тот предел, к которому нужно стремиться при построении прогностических моделей.

На первом этапе рассматривалась инерционная модель вида:

$$h_i = 12.51 + 0,994h_{12(i-1)}. \quad (3)$$

Для независимой выборки стандартная ошибка инерционного прогноза составляет  $\sigma_{y(x)} = 6,4$  см/год, что значительно ниже допустимой ошибки прогноза ( $\Delta_{\text{доп}} = 0,67\sigma_{y(x)} = 42,5$  см), определяемой по величине стандартного отклонения. Поскольку декабрьский уровень за предшествующий год ( $h_{12(i-1)}$ ) известен, то прогнозу подлежит только уровень моря в декабре текущего года  $h_{12i}$ . Очевидно, для его прогноза целесообразно вначале рассмотреть возможности чисто инерционной модели, предикторами в которой служат среднемесячные значения уровня моря предшествующего года, т. е.

$$h_{12(i)} = f(h_{12(i-1)}, h_{11(i-1)}, \dots, h_{1(i-1)}, h_{12(i-2)}), \quad (4)$$

где  $h_{12(i-2)}$  – среднемесячный уровень в декабре с заблаговременностью два года. Отсюда видно, что общее число предикторов в указанной модели равно  $m = 13$ . В результате использования пошаговой регрессии получена оптимальная модель, которая включает в качестве предикторов уровень моря в декабре двух предшествующих лет и имеет вид:

$$h_{12(i)} = 3,45 + 1,23 h_{12(i-1)} - 0,26 h_{12(i-2)}. \quad (5)$$

Коэффициент детерминации модели составляет  $R^2 = 0,959$ , а стандартная ошибка прогноза по независимой выборке  $\sigma_{y(x)} = 12,3$  см/год (табл.). Подставляя теперь эту зависимость в модель (2), получаем окончательно следующую прогностическую модель для оценки среднегодовых значений уровня моря в  $i$ -й год:

$$h_i^* = 12,16 + 1,11 h_{12(i-1)} - 0,12 h_{12(i-2)}. \quad (6)$$

Результаты расчетов по данной зависимости свидетельствуют о высокой точности прогноза УКМ. По зависимой выборке стандартная ошибка составляет 8,2 см/год, а по независимой – 5,8 см/год (табл.), т. е. даже меньше. Итак, даже по фактическим данным об уровне моря в декабре за два предшествующих года можно уверенно прогнозировать среднегодовой уровень в г. Баку и средний уровень для всего моря.

#### Оценки параметров регрессионных моделей при прогнозе среднегодового уровня моря в г. Баку по зависимой (1968–2000 гг.) и независимой (2001–2009 гг.) выборке

Модель	Число предикторов	Коэффициент детерминации, $R^2$	Критерий Фишера, $F$	Стандартная ошибка модели, $\sigma_{y(x)}$ , см/год	Стандартная ошибка прогноза уровня по независимым данным, см/год
2	2	0,998	13901	2,7	2,8
3	1	0,988	2918	8,3	6,4
5	2	0,959	402	15,7	12,3
6	2	0,989	1506	8,2	5,8
7	12	0,999	1607	3,2	4,5
7	6	0,995	1010	5,5	5,6

В тех случаях, когда точность прогноза УКМ по зависимости (6) представляется недостаточной, то для повышения точности могут быть привлечены данные об осадках в бассейне Волги. В этом случае прогностическая модель среднего годового уровня моря в  $i$ -й год будет иметь вид:

$$h_i = F\{h_i^*, P_{j(i-1)}^x, P_{j(i-1)}^r, P_{j(i-2)}^x, P_{j(i-2)}^r\}, \quad (7)$$

где  $P_{j(i-1)}^x, P_{j(i-2)}^x$  – осадки за холодный период (октябрь – март) на  $j$ -й станции за два предшествующих года,  $P_{j(i-1)}^r, P_{j(i-2)}^r$  – осадки за теплый период (апрель – сентябрь) на  $j$ -й станции за два предшествующих года. Из формулы (7) следует, что в качестве предикторов помимо рассчитанного по формуле (6) уровня моря  $h_i^*$  используются значения осадков в холодный и теплый периоды года на 30 станциях стокоформирующей зоны бассейна Волги. Оптимальная модель, в которой все предикторы являются значимыми, включает 12 предикторов. В этом случае ошибка по зависимой выборке уменьшается до 3,2 см/год, т. е. почти до минимальной теоретической ошибки, а ошибка по независимой выборке – до 4,5 см/год (табл.). При огрублении модели до 6 предикторов ошибки возрастают немного (5,5 см/год и 5,6 см/год, соответственно), но зато существенно возрастает надежность модели. При этом в модель входят осадки только за холодный период предшествующего года.

Таким образом, хотя привлечение в качестве дополнительных предикторов осадков на водосборе Волги улучшает прогноз уровня Каспийского моря, однако он требует существенно большего количества информации.

### Заключение

Если генезис межгодовых колебаний УКМ в первом приближении можно считать выявленным, то проблема сверхдолгосрочного прогноза уровня до настоящего времени относится к числу центральных нерешенных проблем современной гидрометеорологии. Действительно, вряд ли кто-то сможет дать научно обоснованное предсказание о том, когда начнется новый длительный рост (снижение) УКМ. А в том, что это когда-нибудь произойдет, нет сомнений. В отличие от сверхдолгосрочных прогнозов методы прогноза УКМ с годовой заблаговременностью в настоящее время можно считать надежными. Об этом свидетельствуют результаты независимых прогнозов уровня, приведенные в таблице. Так, даже по модели, в которой предикторами служат только легко определяемые значения уровня в Баку в декабре за два предшествующих года, стандартная ошибка прогноза годового уровня моря по независимым данным составила 5,8 см/год, что удовлетворяет практическим требованиям.

## Литература

*Абузяров З. К.* Усовершенствованный метод прогноза годового хода уровня Каспийского моря // Тр. Гидрометцентра России. 2009. Вып. 343. С. 48–66.

*Водный баланс* и колебания уровня Каспийского моря. Моделирование и прогноз. М.: Триада лтд, 2016. 378 с.

*Калинин Г. П., Смирнова К. И., Шереметьевская О. И.* Воднобалансовые расчеты будущих уровней Каспийского моря // Метеорология и гидрология. 1968. № 9. С. 45–52.

*Малинин В. Н.* О генезисе межгодовых колебаний уровня Каспийского моря // Водные ресурсы. 1994а. № 4–5. С. 492–499.

*Малинин В. Н.* Проблема прогноза уровня Каспийского моря. СПб.: РГТМИ, 1994б. 160 с.

*Малинин В. Н., Радикевич В. М., Гордеева С. М., Куликова Л. А.* Изменчивость вихревой активности атмосферы над Северной Атлантикой. СПб.: Гидрометеоиздат, 2003. 171 с.

*Малинин В. Н., Гордеева С. М., Горбушина Я. А.* К оценке влияния Северной Атлантики на перенос атмосферной влаги в Европу // Общество. Среда. Развитие. 2015. № 3. С. 179–185.

*Меццарская А. В., Александрова Н. А.* Прогноз уровня Каспийского моря по метеорологическим данным // Метеорология и гидрология. 1993. № 3. С. 72–82.

## CLIMATIC FACTORS OF INTERANNUAL VARIATIONS AND LONG-TERM FORECAST OF THE CASPIAN SEA LEVEL

V. N. Malinin, S. M. Gordeeva

*The Russian State Hydrometeorological University*

The article is devoted to revealing the genesis of interannual sea level variations and clarifying the physical-statistical method of level forecasting. It is shown that the annual level can be considered as an integral indicator of large-scale moisture exchange in the ocean-atmosphere-land system. We propose a simple method for forecasting the sea level with annual lead time, based on the use of back-of-the-envelope level values in Baku in December for the previous two years and providing the required forecast accuracy.

## ОСОБЕННОСТИ СЕЙШЕВЫХ КОЛЕБАНИЙ В БАССЕЙНЕ С ОТКРЫТЫМ ВХОДОМ

Ю. В. Манилюк

*Морской гидрофизический институт РАН, г. Севастополь*

Свободные длинные линейные волны, зависящие от двух пространственных координат, рассматриваются в модельном бассейне прямоугольной формы постоянной глубины с открытым входом. Исследование проводится на основе полученно-

го аналитического решения. Изучаются периоды волн, колебания уровня и скорости волновых течений. Установлена их связь с геометрическими характеристиками бассейна (глубина, длина, ширина). Произведено сравнение свойств сейшевых колебаний в бассейне с открытой границей и в полностью замкнутом бассейне. При этом выявлены свойства сейш, характерные только для бассейна с открытой границей.

Сейши являются одним из самых распространенных видов движения жидкости в ограниченных водоемах и вносят существенный вклад в формирование их гидрологических режимов. Отдельный большой класс образуют бассейны со свободным входом: бухты, лагуны, эстуарии, гавани, губы, лиманы, фьорды и другие. Все они имеют вход (иногда несколько), связывающий их с основным бассейном. Сейши в бухте могут быть причиной такого явления, как тягун [Лабзовский, 1971]. При этом отмечаются сильные возвратно-поступательные движения воды, приводящие к ударам судов о причалы или друг о друга, обрыву швартовых, затруднению или полному прекращению погрузо-разгрузочных операций [Rabinovich, 2009]. Также у входа в бассейн сейши вызывают сильные течения, затрудняющие судоходство [Лабзовский, 1971]. Исследования сейш в бассейнах с открытой границей ведутся на протяжении более ста последних лет. Историю этих исследований можно найти, например, в «Океанографической энциклопедии» [1980]. В работе [Rabinovich, 2009] приведены формулы для расчета периодов сейш в бухтах простой формы для случаев, когда движение зависит от одной пространственной координаты. В статье [Manilyuk, Cherkesov, 1997] исследуется влияние геометрических характеристик залива на сейши в ограниченном бассейне.

Целью настоящей работы является получение на основе классической гидродинамической постановки аналитического решения задачи о сейшах в прямоугольном бассейне постоянной глубины с одним входом, зависящего от двух пространственных переменных; исследование с его помощью сейшевых колебаний в бассейне данного типа.

Рассмотрим свободные линейные колебания однородной невязкой жидкости в бассейне, имеющем одну свободную границу. Будем предполагать, что волны длинные, атмосферное давление над акваторией бассейна постоянное. Влиянием вращения Земли пренебрежем. В данном случае движение жидкости описывается системой уравнений длинных волн [Черкесов и др., 1992]:

$$u_t = -g\zeta_x; v_t = -g\zeta_y; \zeta_t = -(hu)_x - (hv)_y, \quad (1)$$

где использованы следующие обозначения:  $x, y$  – декартовы координаты,  $u, v$  – проекции вектора скорости движения жидкости на оси  $x, y$

соответственно,  $\zeta$  – отклонение свободной поверхности,  $h$  – глубина бассейна,  $t$  – время,  $g$  – ускорение свободного падения.

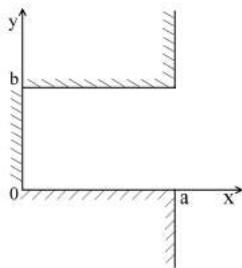
На твердых боковых стенках бассейна должно выполняться условие непротекания

$$V_n = 0. \quad (2)$$

Здесь  $V_n$  – нормальная к боковым стенкам составляющая скорости. На жидкой границе бассейна  $\Gamma$  требуется выполнение условия

$$\zeta(x, y, t)|_{\Gamma} = 0, \quad (3)$$

означающего, что на ней расположены узловые линии для всех мод свободных колебаний жидкости.



**Рис. 1. Модельный бассейн**

Рассмотрим бассейн (рис. 1) прямоугольной формы, имеющий постоянную глубину  $h$ . Его длина равна  $a$ , ширина  $b$ . Вход в бассейн имеет ширину, равную  $b$ . С учетом этого граничные условия (2), (3) запишутся так:

$$u(0, y, t) = 0; \quad v(x, 0, t) = 0; \quad v(x, b, t) = 0; \quad \zeta(a, y, t) = 0 \quad (4)$$

Будем искать решение системы (1) в виде функций, периодических по времени и удовлетворяющих граничным условиям (4):

$$\begin{aligned} u(x, y, t) &= u_1(x, y)e^{i\sigma t}, \quad v(x, y, t) = v_1(x, y)e^{i\sigma t}, \\ \zeta(x, y, t) &= \zeta_1(x, y)e^{i\sigma t}. \end{aligned} \quad (5)$$

Здесь  $\sigma$  – частота колебаний жидкости,  $i$  – мнимая единица.

Для нахождения  $\zeta$ , учитывая (5), а также, что глубина бассейна  $h = const$ , из третьего уравнения системы (1) имеем

$$\frac{\partial^2 \zeta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \zeta}{\partial y^2} + \lambda \zeta = 0, \quad (6)$$

где  $\lambda = \sigma^2 / gh$  и представляет собой квадрат волнового числа.

Здесь и ниже для простоты письма будем опускать индекс «1» у функций  $u_1(x, y)$ ,  $v_1(x, y)$ ,  $\zeta_1(x, y)$ . Граничные условия (4) примут вид:

$$\frac{\partial \zeta(0, y)}{\partial x} = 0; \quad \frac{\partial \zeta(x, 0)}{\partial y} = 0; \quad \frac{\partial \zeta(x, b)}{\partial y} = 0; \quad \zeta(a, y) = 0. \quad (7)$$

В результате приходим к краевой задаче на собственные значения для уравнения эллиптического типа второго порядка с постоянными коэффициентами (6) с однородными граничными условиями (7). Ее можно решить аналитически, воспользовавшись методом разделения переменных Фурье [Владимиров, 1981]. Выполнив решение данных краевых задач и задав амплитуду начального отклонения свободной поверхности, получим выражения для вычисления собственных частот и периодов:

$$\sigma_{km} = \frac{\pi}{2ab} \sqrt{gh} \sqrt{(1+2k)^2 b^2 + 4m^2 a^2}, \quad (8)$$

$$\tau_{km} = \frac{4}{\sqrt{gh}} \frac{ab}{\sqrt{(1+2k)^2 b^2 + 4m^2 a^2}}. \quad (9)$$

И соответствующих им собственных функций

$$\zeta_{km}(x, y) = \zeta_{0_{km}} \cos \frac{(1+2k)\pi x}{2a} \cos \frac{m\pi y}{b}, \quad (10)$$

где  $k = 0, 1, 2, \dots$ ;  $m = 0, 1, 2, \dots$ ,  $\zeta_{0_{km}}$  – амплитуда начального отклонения свободной поверхности.

Подставив соотношение (10) в третье выражение (5) и выделив вещественную часть, находим формулу для расчета отклонений свободной поверхности

$$\zeta_{km}(x, y, t) = \zeta_{0_{km}} \cos \frac{(1+2k)\pi x}{2a} \cos \frac{m\pi y}{b} \cos \sigma_{km} t. \quad (11)$$

С учетом первых двух выражений из (5) и соотношения (11) выпишем формулы для вычисления составляющих скорости движения жидкости:

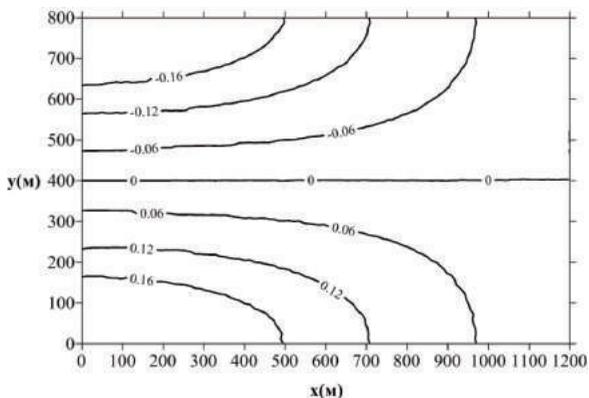
$$u_{km}(x, y, t) = \zeta_{0_{km}} \sqrt{\frac{g}{h}} \frac{(1+2k)b}{\sqrt{(1+2k)^2 b^2 + 4m^2 a^2}} \sin \frac{(1+2k)\pi x}{2a} \cos \frac{m\pi y}{b} \sin \sigma_{km} t, \quad (12)$$

$$v_{km}(x, y, t) = \zeta_{0_{km}} \sqrt{\frac{g}{h}} \frac{2ma}{\sqrt{(1+2k)^2 b^2 + 4m^2 a^2}} \cos \frac{(1+2k)\pi x}{2a} \sin \frac{m\pi y}{b} \sin \sigma_{km} t. \quad (13)$$

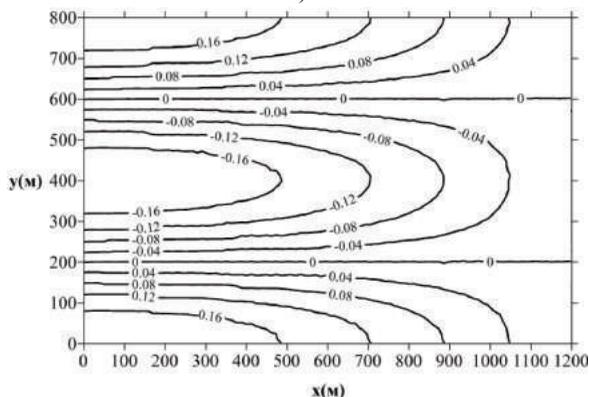
Профили свободной поверхности жидкости для первых нескольких мод продольных сейш ( $k \neq 0, m = 0$ ) в бассейне с открытой границей представлены в работе [Rabinovich, 2009]. Изолинии уровня для данного вида сейш всегда параллельны оси  $y$ . При этом, по сравнению с полностью замкнутым бассейном, происходит сдвиг узловых линий к кутовой части бассейна. Вектор скорости данного вида сейш имеет только одну ненулевую составляющую, амплитуда которой определяется формулой:

$$u_{0_{k0}} = \zeta_{0_{k0}} \sqrt{\frac{g}{h}}. \quad (14)$$

Она прямо пропорциональна амплитуде начального отклонения свободной поверхности и обратно пропорциональна  $\sqrt{h}$ . Аналогичная закономерность имеет место для случая, когда бассейн полностью замкнут.



а)



б)

**Рис. 2. Изолинии уровня для поперечных сейш:**

а – мода ( $k = 0, m = 1$ ); б – мода ( $k = 0, m = 2$ )

Профили свободной поверхности для поперечных сейш ( $k = 0, m \neq 0$ ) в бассейне с открытой границей принципиально отличаются от тех, что имеют место в полностью замкнутом бассейне. На рис. 2 представлены изолинии уровня для первых двух мод поперечных сейш, построенные на основе расчета, выполненного для модельного бассейна, аппроксимирующего бухту Круглая, расположенную в окрестностях Севастополя. При этом амплитуда начального возвышения уровня  $\zeta_0$  задавалась равной 20 см. Как видно из этого рисунка, с удалением от стенки (0, y) происходит нарушение параллельности изолиний, и они

изгибаются к стенкам  $(x, 0)$ ,  $(x, b)$ . В случае полностью замкнутого бассейна изолинии уровня для данной моды всегда параллельны оси  $x$ .

Для амплитуд составляющих скорости поперечных сейш из формул (12), (13) имеем:

$$u_{0_{0m}} = \zeta_{0_{0m}} \sqrt{\frac{g}{h}} \frac{b}{\sqrt{b^2 + 4m^2 a^2}}, \quad v_{0_{0m}} = \zeta_{0_{0m}} \sqrt{\frac{g}{h}} \frac{2ma}{\sqrt{b^2 + 4m^2 a^2}}. \quad (15)$$

Из (15) следует, что волновые течения в случае поперечных сейш могут иметь две неравные нулю составляющие скорости  $u$  и  $v$ . Это существенно отличает сейши в бассейне с открытой границей от сейш в полностью замкнутом бассейне, для которого амплитуды составляющих скорости  $u_0 = 0$ , а  $v_0$  определяется формулой, аналогичной (14).

Для продольно-поперечных сейш ( $k \neq 0, m \neq 0$ ) из выражений (12), (13) следует, что амплитуды составляющих скорости  $u$  и  $v$  зависят от величин  $a, b, h$ . Также можно показать, что для сейш данного вида максимум модуля скорости волновых течений определяется по формуле:

$$|\mathbf{V}_{km}|^{\max} = \sqrt{\max(u_{0km}^2, v_{0km}^2)}. \quad (16)$$

**Выводы.** Установлено, что сейшевые колебания в замкнутом бассейне и в бассейне с открытой границей имеют как одинаковые, так и различные свойства.

Свойства сейшевых колебаний, отличающиеся друг от друга, в бассейне с открытой границей и в полностью замкнутом бассейне:

1. Периоды сейшевых колебаний в прямоугольном бассейне постоянной глубины с открытым входом всегда меньше периодов соответствующих мод в полностью замкнутом бассейне таких же размеров и глубины.

2. Величины периодов поперечных сейш ( $k = 0, m \neq 0$ ) в бассейне с открытой границей зависят и от ширины бассейна, и от его длины. В полностью замкнутом бассейне периоды поперечных сейш не зависят от длины бассейна.

3. У поперечных сейш ( $k = 0, m \neq 0$ ) в бассейне с открытой границей с удалением от стенки  $(0, y)$  происходит нарушение параллельности изолиний уровня, и они изгибаются к стенкам  $(x, 0)$ ,  $(x, b)$ . В случае полностью замкнутого бассейна изолинии уровня данного вида сейш всегда параллельны оси  $x$ .

4. Узловые линии уровня для продольных сейш ( $k \neq 0, m = 0$ ) в бассейне с открытой границей сдвинуты внутрь бассейна по сравнению с положением узловых линий в полностью замкнутом бассейне.

5. Волновые течения в случае поперечных сейш ( $k = 0, m \neq 0$ ) могут иметь две неравные нулю составляющие скорости  $u$  и  $v$ . При этом амплитуды составляющих скорости  $u_{0,km}$  и  $v_{0,km}$  обратно пропорциональны  $\sqrt{h(b^2 + 4m^2a^2)}$ , а также  $u_{0,km}$  прямо пропорциональна  $b$ ,  $v_{0,km}$  прямо пропорциональна  $2a$ . В полностью замкнутом бассейне амплитуды составляющих скорости  $u_0 = 0$ , а  $v_0$  не зависит от геометрических размеров бассейна и обратно пропорциональна  $\sqrt{h}$ .

6. В случае, когда  $k = 0, m = 0$ , в бассейне с открытым входом имеет место мода Гельмгольца, которая отсутствует в полностью замкнутом бассейне. Волновое течение для этой моды всегда направлено параллельно оси  $x$ , и его максимальная скорость не зависит ни от ширины бассейна  $b$ , ни от его длины  $a$ . Она прямо пропорциональна амплитуде начального отклонения свободной поверхности и обратно пропорциональна  $\sqrt{h}$ . Наибольшие скорости течений будут иметь место на открытой границе бассейна.

Свойства сейшевых колебаний, общие как для бассейна с открытой границей, так и для полностью замкнутого бассейна:

1. Периоды продольных сейш ( $k \neq 0, m = 0$ ) не зависят от ширины бассейна.

2. Узловые линии уровня для всех рассмотренных видов сейш параллельны одной из осей координат.

3. Положение узловых линий в случае поперечных сейш в бассейне с открытой границей и в полностью замкнутом бассейне совпадают.

4. Наибольшие скорости волновых течений имеют продольные сейши ( $k \neq 0, m = 0$ ). При этом их величины одинаковы для всех мод и не зависят ни от ширины бассейна, ни от его длины. Они прямо пропорциональны амплитуде начального отклонения свободной поверхности и обратно пропорциональны корню квадратному из глубины бассейна.

Работа выполнена в рамках темы государственного задания ФГБУН МГИ «Комплексные междисциплинарные исследования океанологических процессов, определяющих функционирование и эволюцию экосистем Черного и Азовского морей, на основе современных методов контроля состояния морской среды и гридтехнологий» (0827-2014-0010).

### Литература

- Владимиров В. С.* Уравнения математической физики. М.: Наука, 1981. 512 с.  
*Лабзовский Н. А.* Непериодические колебания уровня моря. Л.: Гидрометеоиздат, 1971. 112 с.

*Океанографическая энциклопедия.* Л.: Гидрометеиздат, 1980. 304 с.  
*Черкесов Л. В., Иванов В. А., Хартнев С. М.* Введение в гидродинамику волн.  
СПб.: Гидрометеиздат, 1992. 264 с.

*Manilyuk Yu. V., Cherkesov L. V.* The influence of the gulf's geometry on seiche oscillations in an enclosed basin // *Physical oceanography.* 1997. Vol. 8, Iss. 4. P. 217–227.

*Rabinovich A. B.* Seiches and Harbor Oscillations (Chapter 9) // *Handbook of Coastal and Ocean Engineering* / Ed. Y. C. Kim. Singapoure: World Scientific Publ., 2009. P. 193–236.

## THE PROPERTIES OF SEICHE OSCILLATIONS IN A BASIN WITH AN OPEN BOUNDARY

**Yu. V. Manilyuk**

*Marine Hydrophysical Institute of RAS, Sevastopol*

Free long linear waves that depend on two spatial coordinates were considered in a model open inlet basin of rectangular form and constant depth. The study is based on an analytical solution. The periods of the waves, oscillations of the level and velocity of wave currents were investigated. Their relationship with the geometric characteristics of the basin (depth, length, width) was established. The properties of seiche oscillations in a basin with an open boundary and in a completely closed basin were compared. The properties of seiches that are specifically characteristic of a basin with an open boundary were identified.

## ВАРИАЦИИ ТЕРМИЧЕСКОГО РЕЖИМА ЮЖНОЙ ЧАСТИ ОЗЕРА БАЙКАЛ ПО НЕПРЕРЫВНЫМ ИЗМЕРЕНИЯМ ТЕМПЕРАТУРЫ ВОДЫ С 2000 ПО 2016 г.

**М. А. Науменко<sup>1</sup>, В. В. Гузиватый<sup>1</sup>, С. В. Ловцов<sup>2</sup>, С. Г. Каретников<sup>1</sup>,  
Н. М. Буднев<sup>2</sup>, А. В. Кураев<sup>3</sup>, Е. С. Троицкая<sup>4</sup>, М. Н. Шимараев<sup>4</sup>**

<sup>1</sup>*Институт озераведения РАН*

<sup>2</sup>*Иркутский государственный университет, НИИ прикладной физики*

<sup>3</sup>*Centre National de la Recherche Scientifique (CNRS), LEGOS, UMR5566  
(CNRS-UPSIRD-CNES)*

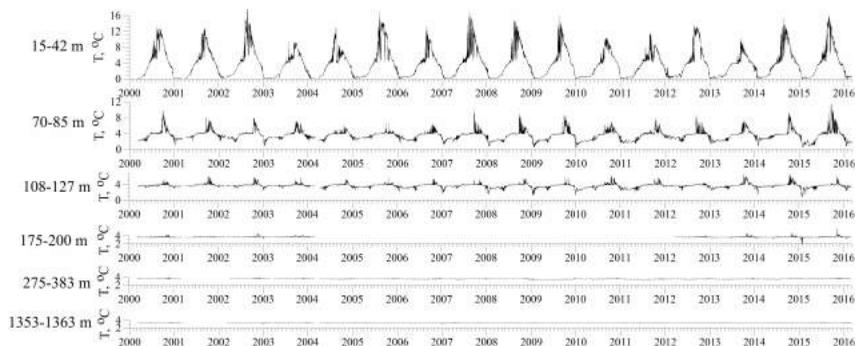
<sup>4</sup>*Лимнологический институт СО РАН*

В докладе рассматриваются вариации температуры воды от поверхности до дна на основе непрерывных измерений, проводимых с использованием термокос, установленных в южной части Байкала при выполнении проекта по созданию и эксплуатации Байкальского нейтринного телескопа. Рассмотрен годовой ход температуры на различных горизонтах, оценена степень ее изменчивости от года к году. Определены даты и продолжительность различных фаз полного гидрологического цикла, определяемого как период между началом ледовых условий в

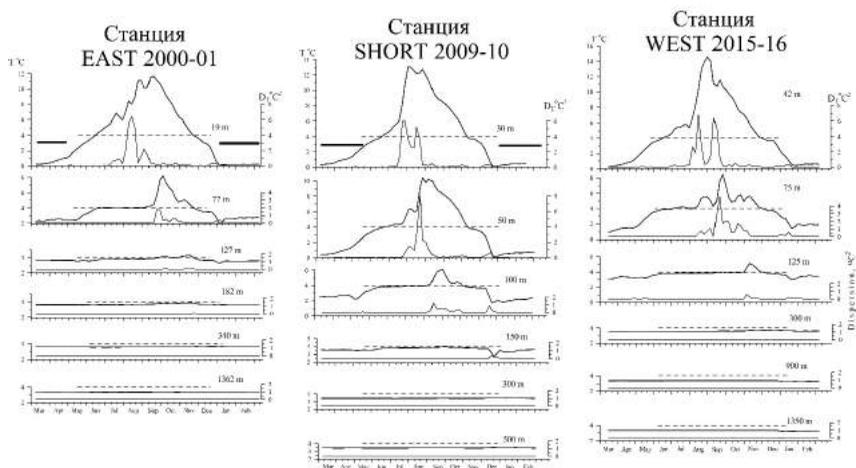
текущем году и началом ледовых условий предыдущего года. Продолжительность полного гидрологического цикла используется для нормирования продолжительности каждой фазы каждого года для их сравнения. В докладе рассматриваются процессы вертикального обмена теплом, продолжительность и параметры слоя скачка и периоды интенсивной весенней и осенней конвекции.

Озеро Байкал, крупнейший естественный мировой резервуар пресной воды, изучается с начала двадцатого века. Г. Ю. Верещагин, основоположник байкаловедения и создатель специализированной лаборатории по изучению озера, уделял значительное внимание гидрофизическим процессам в водной толще Байкала. В XX в. на основе многочисленных судовых наблюдений были выявлены основные черты термического режима и системы течений озера [Shimaraev et al., 1994; Minoura, 2000]. Начиная с 1999 г. осуществляются непрерывные измерения температуры воды в южной части Байкала при выполнении проекта по созданию и эксплуатации Байкальского нейтринного телескопа [Shimaraev et al., 1993; Schmid et al., 2008; Tsimitri et al., 2015]. По настоящее время измерения проводились на двух-трех станциях с использованием термокос, датчики которых располагались от глубины 15–40 м до дна: мелководная станция была заякорена на глубине 500 м, глубоководная – 1362 м. Обычно копирование информации с логгеров за годовой цикл с дискретностью 10 минут осуществлялось в начале марта каждого года. Общее количество измерений с 2000 по 2016 г. составило более 25 миллионов. Цель нашего доклада заключается в предварительном анализе имеющихся высокочастотных температурных измерений от поверхности до дна и представлении результатов для дальнейшего развития идей пространственно-временной изменчивости термических процессов в оз. Байкал. Подчеркнем, что уникальность данных, прежде всего, связана с непрерывностью измерений и дискретностью измерений.

Временные изменения демонстрируют ярко выраженные сезонные изменения с нетрадиционным, несинусообразным ходом температуры, который представляет собой каждый год скачкообразное увеличение температуры в период развитой стратификации в верхнем слое. На глубинах более 70 м кривые сезонного хода становятся более пологими с коротким периодом максимума (рис. 1). На глубине более 100 м сезонные изменения температуры незначительны, что соответствует практически нулевой дисперсии (рис. 2).



**Рис. 1.** Временной ход температуры воды на различных горизонтах станции EAST с 1 марта 2000 г. по 1 марта 2016 г.



**Рис. 2.** Временной ход температуры воды (среднее за 10 суток) и ее дисперсии на различных горизонтах трех различных станций. Толстая линия обозначает период ледостава, пунктирная линия – 4 °С

Непрерывные измерения температуры верхнего слоя позволяют проанализировать этапы (фазы) изменения наступления различных сезонов в южной части оз. Байкал (табл.). Под полным гидрологическим циклом мы понимаем период между датой появления льда в текущем году и датой появления льда в предыдущем году, средняя длительность этого цикла за шестнадцатилетний период в среднем составляет 367 суток и изменяется от 341 суток в 2009 г. до 396 суток в 2013 г. Продолжительность

**Полный гидрологический цикл озера Байкал с 2000 по 2014 г.**

Год	Начало льда	Конец льда	Дата $T > 4^{\circ}$ весной	Дата максим. $T$	Дата $T < 4^{\circ}$ осенью	Прод. лед. явл., сутки	Прод. от $4^{\circ} C$ до макс., сутки	Прод. от макс., до $4^{\circ} C$ , сутки	Продолж., сутки	
									$>4^{\circ} C$	$<4^{\circ} C$
2000	12 Январь	6 Май	18 Июнь	12 Август	25 Ноябрь	$\frac{115}{32,0}$	$\frac{55}{15,3}$	$\frac{105}{29,2}$	$\frac{160}{44,6}$	$\frac{199}{55,4}$
2001	5 Январь	13 Май	27 Июнь	5 Сентябрь	9 Декабрь	$\frac{128}{33,3}$	$\frac{70}{18,2}$	$\frac{95}{24,7}$	$\frac{165}{43,0}$	$\frac{219}{57,0}$
2002	24 Январь	27 Апрель	22 Июнь	21 Август	30 Ноябрь	$\frac{93}{26,1}$	$\frac{60}{16,9}$	$\frac{101}{28,4}$	$\frac{161}{45,2}$	$\frac{195}{54,8}$
2003	15 Январь	30 Апрель	29 Июнь	25 Июль	29 Ноябрь	$\frac{105}{27,9}$	$\frac{26}{6,9}$	$\frac{127}{33,7}$	$\frac{153}{40,6}$	$\frac{224}{59,4}$
2004	27 Январь	28 Апрель	20 Июнь	19 Август	3 Декабрь	$\frac{92}{26,4}$	$\frac{60}{17,2}$	$\frac{106}{30,4}$	$\frac{166}{47,6}$	$\frac{183}{52,4}$
2005	10 Январь	3 Май	23 Июнь	8 Август	2 Декабрь	$\frac{113}{30,4}$	$\frac{46}{12,4}$	$\frac{116}{31,2}$	$\frac{162}{43,5}$	$\frac{210}{56,5}$
2006	17 Январь	6 Май	30 Июнь	23 Август	29 Ноябрь	$\frac{109}{29,5}$	$\frac{54}{14,6}$	$\frac{98}{26,6}$	$\frac{152}{41,2}$	$\frac{217}{58,8}$
2007	21 Январь	29 Апрель	13 Июнь	16 Август	4 Декабрь	$\frac{98}{27,2}$	$\frac{64}{17,8}$	$\frac{110}{30,6}$	$\frac{174}{48,3}$	$\frac{186}{51,7}$
2008	16 Январь	3 Май	1 Июль	18 Август	4 Декабрь	$\frac{108}{28,7}$	$\frac{48}{12,8}$	$\frac{108}{28,7}$	$\frac{156}{41,5}$	$\frac{220}{58,5}$
2009	26 Январь	29 Апрель	24 Июнь	13 Август	19 Ноябрь	$\frac{93}{27,3}$	$\frac{50}{14,7}$	$\frac{98}{28,7}$	$\frac{148}{43,4}$	$\frac{193}{56,6}$

2010	2 Январь	15 Май	12 Июль	6 Сентябрь	8 Декабрь	<u>133</u> 35,7	<u>56</u> 15,0	<u>93</u> 24,9	<u>149</u> 39,9	<u>224</u> 60,1
2011	10 Январь	20 Апрель	29 Июнь	31 Август	9 Декабрь	<u>100</u> 26,2	63 16,5	<u>100</u> 26,2	<u>163</u> 42,8	218 57,2
2012	26 Январь	22 Апрель	25 Июнь	27 Август	5 Декабрь	<u>87</u> 25,4	<u>63</u> 18,4	<u>100</u> 29,2	<u>163</u> 47,7	<u>179</u> 52,3
2013	2 Январь	6 Май	4 Июль	8 Сентябрь	Нет данных	<u>124</u> 31,3	<u>66</u> 16,7	<u>100</u> 25,3	<u>166</u> 41,9	<u>230</u> 58,1
2014	2 февраль	1 Май	20 Июнь	3 Август	11 Декабрь	Нет данных	<u>44</u>	<u>130</u>	<u>174</u>	Нет данных
Ср.	16 Январь	1 Май	25 Июнь	19 Август	3 Декабрь	<u>105</u> 29,1	<u>55</u> 15,2	<u>106</u> 28,4	<u>161</u> 43,7	<u>207</u> 56,3
Мин	2 Январь	20 Апрель	13 Июнь	25 Июль	19 Ноябрь	<u>87</u> 25,4	<u>26</u> 6,9	<u>93</u> 24,7	<u>148</u> 39,9	<u>179</u> 51,7
Макс	2 февраль	15 Май	12 Июль	8 Сентябрь	17 Декабрь	<u>133</u> 35,7	<u>70</u> 18,4	<u>130</u> 33,7	<u>174</u> 48,3	<u>230</u> 60,1
Амп, сутки	31	25	29	45	28	46	44	37	26	51

полного гидрологического цикла используется для нормирования продолжительности для каждой фазы каждого года для их сравнения. Асимметрию сезонного хода температуры верхнего слоя характеризует продолжительность периода от перехода температуры воды через 4 °С осенью до даты наступления льда (в среднем 45 суток) и продолжительность периода от даты исчезновения льда до наступления четырехградусной температуры воды весной (в среднем 55 суток). Переход температуры верхнего слоя воды через 4 °С указывает на дату возникновения стратификации. Период роста температуры воды до максимума всегда меньше, чем от максимума до температуры 4 °С. Так, в 2003 г. первый период был меньше второго в четыре раза, а в 2001 г. – в 1,4 раза.

Около одной трети полного гидрологического цикла занимают ледовые явления.

Непрерывные высокочастотные наблюдения температуры воды на оз. Байкал позволили, используя десятидневное скользящее осреднение, построить и проанализировать ход температуры и ее дисперсии на различных горизонтах [Буднев и др., 2008]. Очевидно, что существуют запаздывания между максимумами температуры на различных горизонтах: чем глубже горизонт измерений, тем больше временной сдвиг между верхним горизонтом и нижним. Для глубины более 100 м он достигает двух месяцев.

Важной особенностью приповерхностного слоя является то, что наибольшая степень изменчивости (дисперсия) температуры наблюдается в период роста температуры воды в условиях устойчивой стратификации примерно за месяц до возникновения максимума температуры на горизонте, что наблюдается и в Ладожском озере [Атлас..., 2015].

В докладе рассматриваются процессы вертикального обмена теплом, продолжительность и параметры слоя скачка, периоды интенсивной весенней и осенней конвекции.

Данная работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ 16-55-76025 «Евразийские озера в экстремальных климатических условиях».

## Литература

- Атлас* Ладожского озера. СПб.: Нестор-История, 2015. 200 с.
- Буднев Н. М. и др. Результаты моделирования эволюции температурного режима верхних слоев оз. Байкал по данным экспериментов 2000–2001 гг., 2004–2005 гг. // Изв. Иркут. гос. ун-та, сер. Науки о Земле. 2008. № 1 (1). С. 76–83.
- Minoura K. (ed.). Lake Baikal. A Mirror in Time and Space for Understanding Global Change Processes. Elsevier Science, 2000. 348 p.
- Shimaraev M. N., Granin N. G., Zhdanov A. A. Deep ventilation of Lake Baikal waters due to spring thermal bars // Limnol. Oceanogr. 1993. Т. 38, N 5. P. 1068–1072.

*Shimaraev M. N., Verbolov V. I., Granin N. G., Sherstyankin P. P.* Physical limnology of Lake Baikal: a review / Ed. M. N. Shimaraev. Baikal International Center for Ecological Research. Print. N 2. Irkutsk: Okayama, 1994. 81 p.

*Tsimitri C., Rockel B., W'uest A. et al.* Drivers of deep-water renewal events observed over 13 years in the South Basin of Lake Baikal // *J. Geophys. Res. Oceans*. 2015. N 120. P. 1508–1526.

## **VARIATIONS OF THE THERMAL REGIME OF THE SOUTHERN PART OF LAKE BAIKAL ACCORDING TO CONTINUOUS MEASUREMENTS OF WATER TEMPERATURE FROM 2000 TO 2016**

**M. A. Naumenko<sup>1</sup>, V. V. Guzivaty<sup>1</sup>, S. V. Lovtsov<sup>2</sup>, S. G. Karetnikov<sup>1</sup>,  
N. M. Budnev<sup>2</sup>, A. V. Kuraev<sup>3</sup>, E. S. Troitskaya<sup>4</sup>, M. N. Shimaraev<sup>4</sup>**

<sup>1</sup>*Institute of Limnology RAS*

<sup>2</sup>*Irkutsk State University*

<sup>3</sup>*Centre National de la Recherche Scientifique (CNRS), LEGOS, UMR5566  
(CNRS-UPSIRD-CNES)*

<sup>4</sup>*Institute of Limnology of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences*

Variations in water temperature from surface to bottom are considered, based on continuous measurements carried out using thermistor chains installed in the southern part of Lake Baikal within the project for construction and operation of the Baikal neutrino telescope. The annual course of temperature at various horizons was considered, the degree of its among-year variations was estimated. The dates and duration of different phases of the full hydrological cycle, defined as the period between the beginning of ice conditions in the current year and the date of the beginning of ice conditions in the previous year, were determined. The duration of the full hydrological cycle is used to determine the normal duration for each phase of each year to enable comparisons. The processes of vertical heat exchange, the duration and parameters of the thermocline, internal waves, and the periods of active spring and autumn convection are considered.

## **ОСОБЕННОСТИ КЛИМАТИЧЕСКИХ ИЗМЕНЕНИЙ ТЕМПЕРАТУР ВОЗДУХА ЛАДОЖСКОГО ОЗЕРА И ОЗЕРА БАЙКАЛ ЗА ПОСЛЕДНИЕ 70 ЛЕТ**

**М. А. Науменко, С. Г. Каретников**

*Институт озераедения РАН, г. С.-Петербург*

В качестве исходных используются данные о среднесуточных температурах воздуха по метеостанциям «Сортавала», расположенной на севере Ладожского озера, и «Бабушкин», расположенной на юге оз. Байкал. Проведен сравнительный анализ трендов среднегодовых, среднемесячных и среднесуточных значений температуры воздуха всего периода, с 1945 по 2015 г., а

также двух его частей – с 1945 по 1980 и с 1979 по 2015 г. Определены месяцы со статистически значимыми трендами всего периода и двух его частей. Для теплого и холодного периодов года проанализированы статистически значимые изменения средних значений и трендов продолжительностей, температур воздуха и дат перехода через 0 °С весной и осенью для м/с «Сортавала» и м/с «Бабушкин».

Изменения термических и ледовых характеристик двух крупнейших озер Европы и Азии за последние 70 лет прежде всего могут быть объяснены изменениями климата регионов этих озер. Целью настоящей работы было достоверно оценить степень изменения температурного режима атмосферы с оценкой величин значимых трендов среднегодовых, среднемесячных и среднесуточных температур воздуха.

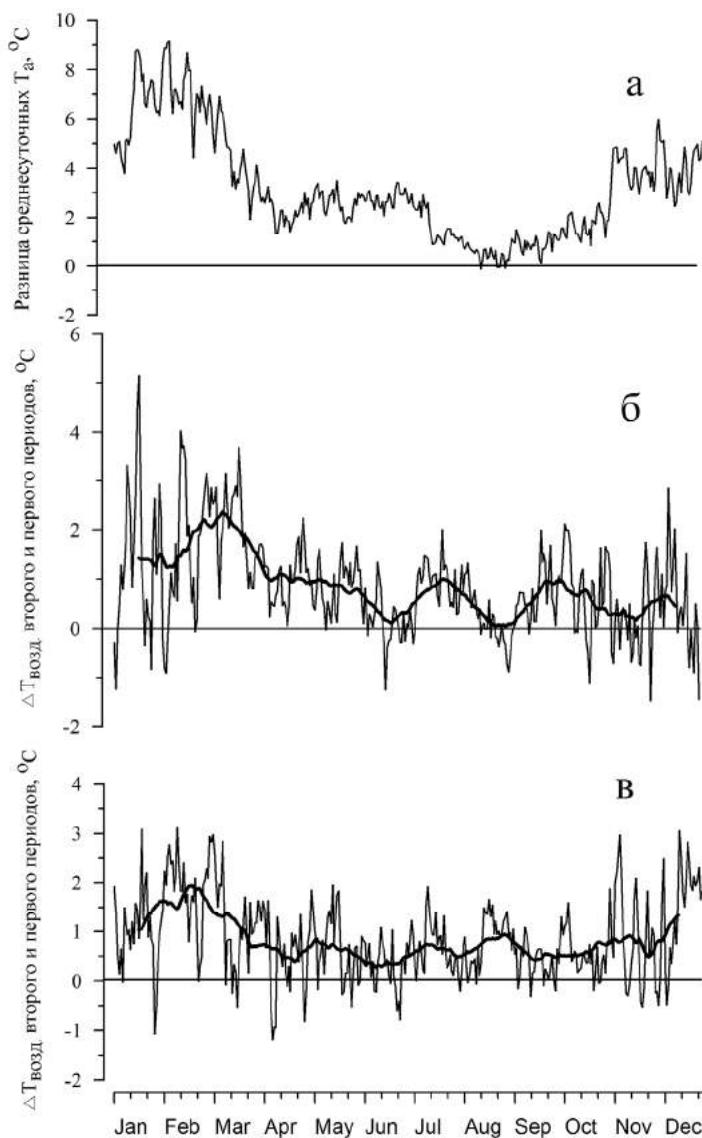
Для характеристики температурного режима региона Ладожского озера был подготовлен временной ряд ежедневных температур воздуха на метеорологической станции «Сортавала», расположенной на северном побережье озера за период с 1945 по 2015 г. Аналогичный ряд данных был подготовлен для метеорологической станции «Бабушкин», расположенной на южном берегу оз. Байкал.

Для оценки климатических изменений в связи с рекомендациями Всемирной метеорологической организации [IPCC, 2001] исходный ряд был разбит на две половины продолжительностью более 30 лет: первый период с 1945 по 1980 г. и второй период с 1979 по 2015 г. Для достижения совместимости ряды перекрывались на два года. Однородность двух половин ряда оценивалась при помощи критерия Стьюдента с независимыми переменными. В таблицах все средние величины, относящиеся к разным генеральным совокупностям, выделены жирным шрифтом. Статистическая значимость линейных трендов была определена при 5% уровне значимости с использованием критерия Стьюдента [Малинин, 2008].

На рис. (а) приведена разность среднесуточных значений температур воздуха между двумя выбранными метеостанциями, показывающая, что, несмотря на более северное расположение Ладожского озера и его меньшую континентальность, воздух в районе Сортавалы на протяжении всего года теплее, чем в районе Бабушкина, только в августе и сентябре эта разница минимальна. Индекс континентальности (К) рассчитан с учетом годовой амплитуды среднесуточной температуры воздуха (А) и широты местности (φ) [Хромов, Петросянц, 2001]:

$$K = (A - 5,4 \sin(\varphi)) / A.$$

Индекс указывает на значительную континентальность Байкала (К = 0,53) по сравнению с Ладожским озером (К = 0,39).



Разность среднесуточных значений температуры воздуха по м/с «Сортавала» и м/с «Бабушкин» (а) и между периодами 1945–1980 и 1979–2015 гг. для м/с «Сортавала» (б) и м/с «Бабушкин» (в). Жирной линией показано скользящее тридцатидневное среднее

Разницы между среднесуточными температурами второго и первого периодов для двух метеостанций, приведенные на рис. (б и в), показывают, что в течение всего года воздух для обеих метеостанций во втором периоде стал теплее примерно на одну и ту же величину. Скользящее тридцатидневное среднее, обозначенное жирной линией, подчеркивает наибольшие различия между двумя периодами как для м/с «Сортавала», так и для м/с «Бабушкин», наибольшие различия приходятся на зимние месяцы.

По среднегодовым значениям температур воздуха за весь период и отдельно для первого и второго периодов, представленным в табл. 1, видно, что статистически значимо отличаются среднегодовые значения первого и второго периодов как для м/с «Сортавала», так и м/с «Бабушкин».

**Таблица 1. Средние значения (°С) и характеристики линейных трендов (°С/год) среднегодовых температур воздуха и их амплитуд по м/с «Сортавала» и «Бабушкин»**

Годы	Среднее, °С		Амплитуды температур, °С		Значимые тренды, (°С)	
	«Сортавала»	«Бабушкин»	«Сортавала»	«Бабушкин»	R <sup>2</sup> (%)	
					«Сортавала»	«Бабушкин»
Весь ряд	3,55	0,33	7,70	8,88	0,025	0,019
1945–2015					19,8	21,4
1945–1980	<b>2,98</b>	<b>-0,12</b>	<b>8,02</b>	8,90	–	–
1979–2015	<b>3,86</b>	<b>0,74</b>	<b>7,42</b>	8,88	0,056	0,027
					31,0	13,37

Среднегодовые амплитуды суточных значений температур воздуха, а значит, и континентальность региона м/с «Сортавала» значительно уменьшились во втором периоде. Значимые тренды в сторону увеличения среднегодовых температур воздуха двух метеостанций выявлены только для всего и второго периодов.

Среднемесячные значения температуры воздуха тоже были разбиты на два периода, и результаты проведенного статистического анализа показаны в табл. 2. Значимые изменения среднемесячных температур воздуха по м/с «Сортавала» характерны для весенне-летних, а по м/с «Бабушкин» – практически для всех месяцев года. Интересно, что для первого периода по данным м/с «Сортавала» не было обнаружено статистически значимых трендов, а по данным м/с «Бабушкин» все значимые тренды были отрицательными. Во второй период для региона м/с «Бабушкин» были обнаружены значимые положительные тренды в весенние и летние месяцы, достигающее 0,07 °С/год. Для региона м/с «Сортавала» во второй период обнаружены значимые положительные тренды только в летние месяцы. Величины трендов 0,03–0,08 примерно одинаковы для обеих метеостанций.

Таблица 2. Средние значения (°С) и характеристики линейных трендов среднемесячных температур воздуха по м/с «Сортавала» и «Бабушкин» (°С/год) с величинами коэффициентов детерминации (%)

Месяцы	«Сортавала»						«Бабушкин»					
	Среднемесячные			Значимые тренды			Среднемесячные			Значимые тренды		
	1945–2015	1945–1980	1979–2015	Весь период R <sup>2</sup>	1 период R <sup>2</sup>	2 период R <sup>2</sup>	1945–2015	1945–1980	1979–2015	Весь период R <sup>2</sup>	1 период R <sup>2</sup>	2 период R <sup>2</sup>
1	-8,74	-9,48	-8,16	-	-	-	-15,34	-15,94	-14,91	-	-	-
2	-9,04	-9,85	-8,39	-	-	-	-15,99	-16,72	-14,8	0,033 7,58	-	-
3	-4,79	-5,88	-3,76	0,061 15,6	-	-	-9,03	-9,68	-8,42	0,028 8,17	-	-
4	1,70	1,14	2,22	0,027 11,8	-	-	-0,33	-0,56	-0,09	-	-0,060 22,09	0,072 20,11
5	8,36	7,90	8,78	0,026 12,1	-	-	6,04	5,64	6,39	0,012 6,80	-0,048 30,36	0,030 11,24
6	13,81	13,71	14,00	-	-	-	11,16	11,10	11,40	-	-	0,045 19,81
7	16,85	16,42	17,22	0,024 9,0	-	0,056 12,8	15,04	14,68	15,41	0,020 11,38	-0,039 14,00	0,063 26,02
8	15,20	15,01	15,38	-	-	0,057 24,4	14,62	14,23	14,97	0,013 5,79	-	0,036 12,73
9	9,97	9,68	10,22	-	-	0,064 22,5	9,13	8,77	9,23	0,010 6,03	-	0,036 20,22
10	4,38	3,98	4,75	-	-	-	2,74	2,47	2,99	-	-0,061 21,33	-
11	-0,88	-1,05	-0,75	-	-	0,084 11,7	-4,61	-5,14	-4,23	0,024 7,15	-	-
12	-5,51	-5,86	-5,19	-	-	-	-9,50	-10,15	-8,83	-	-	-

Анализ трендов среднесуточных значений температуры воздуха показал наличие значимых трендов лишь для 5–10 % суток в году.

Для обеих метеостанций были подсчитаны суммы отрицательных и положительных температур воздуха как алгебраические суммы среднесуточных температур воздуха начиная с дат устойчивого перехода через 0 °С весной и осенью. Период от весеннего до осеннего перехода через 0 °С назван теплым, а от осеннего до весеннего – холодным. Зная продолжительности этих периодов, легко рассчитать средние температуры холодных и теплых периодов для всех анализируемых годов. В табл. 3 представлен сравнительный анализ трендов по двум метеостанциям продолжительности, средних температур и дат перехода через 0 °С для всего периода и двух его частей.

**Таблица 3. Сравнение теплого и холодного периодов года**

			«Сортавала»			«Бабушкин»		
			Весь период	1945–1980	1979–2015	Весь период	1945–1980	1979–2015
Продолж., сутки	холодный период	Средн.	138	143	133	168	<b>172</b>	<b>165</b>
		Тренд	0,091	–	–0,846	–0,167	–	–
		R <sup>2</sup>	34,30		14,74	7,36		
	теплый период	Средн.	227	<b>220</b>	<b>232</b>	197	<b>194</b>	<b>200</b>
		Тренд	–0,646	–	1,023	0,166	–	0,487
		R <sup>2</sup>	9,07		16,31	8,25		18,75
Средняя температура, °С	холодного периода	Средн.	–6,77	–7,19	–6,48	–10,1	<b>–10,6</b>	<b>–9,7</b>
		Тренд	–	–	–	0,019	–	–
		R <sup>2</sup>				5,69		
	теплого периода	Средн.	9,81	9,7	9,93	9,4	9,5	9,3
		Тренд	–	–	–	–	–	–
		R <sup>2</sup>						
Дата перехода	к холодному периоду	Средн.	14 нояб.	11 нояб.	16 нояб.	29 окт.	28 окт.	31 окт.
		Тренд	–0,201	–	0,705	–	–	–
		R <sup>2</sup>	5,70		14,77			
	к теплому периоду	Средн.	1 апр.	<b>5 апр.</b>	<b>29 мар.</b>	14 апр.	16 апр.	12 апр.
		Тренд	–0,201	–	–	–	–	–0,281
		R <sup>2</sup>	8,45					11,45

Холодный период года над обеими озерами в последние годы становится короче, а над Байкалом еще и значимо теплее. Теплый период года – значимо длиннее, а средние температуры воздуха этого периода остаются неизменными. В последние годы над регионом Ладожского озера наблюдаются значимые тренды в сторону более позднего осеннего перехода через 0 °С, а в районе м/с «Бабушкин» – в сторону более раннего весеннего перехода через 0 °С. Над Ладожским озером, кроме того, после 1980 г. произошло значимое смещение средних дат весеннего перехода через 0 °С на более ранние сроки.

**Выводы.** Климатические изменения, выражающиеся в увеличении среднегодовых температур воздуха над Ладожским озером и над южной частью оз. Байкал после 1980 г., в основном происходят за счет значимых положительных трендов температур воздуха в летние месяцы.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований 16-55-76025 ЭРА\_а.

#### **Литература**

*Малинин В. Н.* Статистические методы анализа гидрометеорологической информации. СПб., 2008. 408 с.

*Хромов С. П., Петросяну М. А.* Метеорология и климатология. М.: МГУ, 2001. С. 334–394.

*IPCC, 2001: Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.*

### **SOME FEATURES OF CLIMATIC CHANGES OF AIR TEMPERATURES OF LAKE LADOGA AND LAKE BAIKAL FOR THE LAST 70 YEARS**

**M. A. Naumenko, S. G. Karetnikov**

*Institute of Lake Research, Russian Academy of Sciences, St. Petersburg*

The main data for the analysis were mean daily air temperatures from the Sortavala weather station located in the north of Lake Ladoga and Babushkin weather station located in the south of Lake Baikal. A comparative analysis of trends in the mean annual, mean monthly and mean daily air temperatures for the entire period, from 1945 to 2015, and its two parts from 1945 to 1980 and from 1979 to 2015 was carried out. The months with statistically significant trends over the entire period and its two parts were determined. For the warm and cold periods of the year, statistically significant changes in mean values and trends of durations, air temperatures and dates of transition across 0 °C in spring and autumn for w/s Sortavala and w/s Babushkin were analyzed.

### **РАСЧЕТ ГЕОСТРОФИЧЕСКИХ ТЕЧЕНИЙ В МАЛОМ ОЗЕРЕ В ПЕРИОД ЛЕДОСТАВА**

**Н. И. Пальшин, Г. Э. Здоровеннова, С. Р. Богданов, С. Ю. Волков,  
Т. В. Ефремова, Р. Э. Здоровеннов, А. Ю. Тержевик**

*Институт водных проблем Севера КарНЦ РАН*

Представлены результаты расчетов геострофических течений в покрытом льдом малом бореальном озере. Расчеты выполнены модифицированным динамическим методом для малых слабопроточных озер. Показано, что средняя циркуляция в озере имеет геострофический характер. В результате расчетов установлено фор-

мирование основного антициклонического круговорота, который охватывал почти все озеро и был устойчив на протяжении всей зимы. Сравнение результатов расчетов с измеренными данными показало хорошее соответствие между ними.

Представлены результаты расчетов геострофических течений в покрытом льдом малом бореальном озере. Расчеты выполнены в соответствии с модифицированным нами динамическим методом для малых слабопроточных озер, в которых суммарный расход воды через поперечное сечение озера должен быть равен нулю, а скорости течения на границе вода – дно на максимальных глубинах тоже приравнивались нулю. В работе использованы данные, полученные на оз. Вендюрском (географическая широта  $62,5^\circ$  с. ш., площадь озера около  $10 \text{ км}^2$ , средняя и максимальная глубины 5,3 и 13 м, соответственно) в результате пространственных съемок температуры и электропроводности воды в разные периоды зимних сезонов 1994–1995 (6 разрезов – 54 станции по акватории всего озера) и 1998–1999 гг. (4 разреза – 40 станций в восточной половине озера). Расстояния между станциями на разрезах 100–250 м, а между разрезами – от 600 до 800 м. Точность измерения температуры – тысячные доли градуса, по электропроводности воды – десятые доли мкСм/см, дискретность измерения по глубине около 5 см. Измерения течений проводились в зимние месяцы 1994–1995 и 1995–1996 гг. в центральной и восточной частях озера на различных глубинах с дискретностью от секунд до нескольких минут. Продолжительность непрерывной регистрации течений составляла от одного часа до нескольких дней. Для измерения течений использовались высокочувствительные приборы: акустический измеритель течений АСМ, разработанный НПО «Экран», и волосковый измеритель течений DWСМ, разработанный в ИВПС КарНЦ РАН [Glinsky, 1998]. Результаты предварительного анализа полученных данных опубликованы в работах [Bengtsson et al., 1996; Malm et al., 1998]. Для получения среднего течения на каждом горизонте необходимо было проводить измерения с продолжительностью, превышающей период основной продольной сейши (27 мин). Предположительно, движения воды в озере порождались горизонтальными градиентами температуры воды, создаваемыми неравномерным выделением тепла донными осадками.

Оценки чисел Россби показали, что эффект вращения Земли оказывало влияние на перенос воды в слабопроточном озере Вендюрском, а средняя циркуляция имеет геострофический характер. В результате расчетов установлено формирование основного антициклонического круговорота, который охватывал почти все озеро и был устойчив на протяжении всей зимы. В декабре 1998 г. (через три недели после установления ледового покрова) максимальные скорости течения наблюдались на гори-

зонтах 1–3 м вдоль южного берега и достигали 6–8 мм/с. Во второй половине зимы (февраль–март) одновременно с уменьшением потоков тепла из донных отложений скорости течений уменьшались почти в три раза (максимальные скорости составляли 2–3 мм/с). В это время над локальным углублением дна у северного берега формировался циклонический вихрь с близкими скоростями течений, но меньшего масштаба.

Сравнение результатов расчетов с измеренными данными показало хорошее соответствие между ними. На основе смоделированных результатов можно лучше понять динамические процессы в озере, так как количество натуральных данных средних течений было ограничено продолжительностью их измерений, которые проводились на отдельных станциях на четвертом разрезе. Полученная расчетная картина течений хорошо согласуется с результатами, приведенными в работах [Бояринов и др., 2003; Петров и др., 2007].

Исследование выполнено при финансовой поддержке гранта РФФИ № 16-05-00436\_а.

#### Литература

Бояринов М. П., Митрохов А. В., Пальшин Н. И. и др. Динамика вод в малом озере в период ледостава // Гидроэкологические проблемы Карелии и использование водных ресурсов. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2003. С. 24–32.

Петров М. П., Терзhevik А. Ю., Здорovenнов Р. Э., Здорovenнова Г. Э. Движения воды в мелководном озере, покрытом льдом // Водные ресурсы. 2007. Т. 34, № 2. С. 131–140.

Bengtsson L., Malm J., Terzhevik A. et al. Field investigation of Winter thermo- and hydrodynamics in a small Karelian lake // *Limnol. Oceanogr.* 1996. Vol. 41. P. 1502–1513.

Glinsky A. Current meters for measurement of low-speed velocities in ice covered lakes // *Limnol. Oceanogr.* 1998. Vol. 43. P. 1661–1668.

Malm J., Bengtsson L., Terzhevik A. et al. Field study on currents in a shallow ice-covered lake // *Limnol. Oceanogr.* 1998. Vol. 43 (7). P. 1669–1679.

#### CALCULATION OF GEOSTROPHIC FLOWS IN A SMALL LAKE UNDER ICE

N. I. Palshin, G. E. Zdorovennova, S. R. Bogdanov, S. Yu. Volkov, T. V. Efremova, R. E. Zdorovennov, A. Yu. Terzhevik

*Northern Water Problems Institute, KarRC RAS*

The results of calculations of geostrophic currents in an ice-covered small boreal lake are presented. The calculations were performed by a modified dynamic method for small low-flow lakes. It is shown that the average circulation in the lake has a geostrophic character. As a result of the calculations, the existence of the main anticyclonic circulation covering the lake almost entirely and occurring throughout the winter was established. The results of the calculations were in good agreement with measured data.

## ОСОБЕННОСТИ ГИДРОЛОГИЧЕСКОГО РЕЖИМА ПРИРОДНО-ТЕХНОГЕННОЙ СИСТЕМЫ ОЗЕРА ЧАНЫ

**В. М. Савкин, О. В. Кондакова**

*Институт водных и экологических проблем СО РАН*

Показана важнейшая природная особенность бессточного озера Чаны – цикличность колебаний уровня воды. Рассмотрен современный водный баланс озера Чаны как природно-техногенного объекта (после отсечения Юдинского плеса в 1971 г.). Рассчитаны основные составляющие годовых водных балансов оз. Чаны за 2001–2010 гг., уточнены среднемноголетние величины составляющих водного баланса озера за период 1971–2010 гг.

Озеро Чаны является самым крупным естественным водоемом Западно-Сибирской равнины. Оно расположено в центральной части Барабинской низменности на территории Новосибирской области. Чановская озера система включена в список водно-болотных угодий мирового значения (Рамсарские угодья). Основное питание оз. Чаны получает за счет атмосферных осадков и стока рек Каргат и Чулым, впадающих в него с юго-востока и дренирующих обширные заболоченные территории, расположенные северо-восточнее озера. Площадь водосборного бассейна оз. Чаны составляет 27 340 км<sup>2</sup>.

Важнейшей особенностью гидрологического режима оз. Чаны является цикличность колебаний уровня воды, связанная с изменчивостью общей увлажненности территории Обь-Иртышского междуречья, обусловленной вековыми и внутривековыми колебаниями климата. Колебания уровня воды в озере являются своеобразным индикатором проявления фаз повышенной и пониженной водности региона.

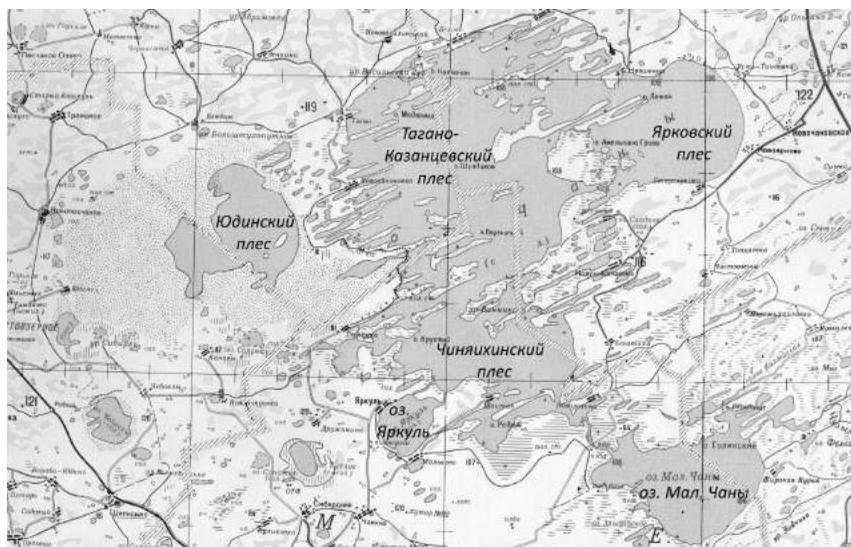
В течение последних 200 лет лесостепные и степные пространства, среди которых расположено оз. Чаны, постепенно усыхают. В конце XVIII и в большей части XIX столетия этот процесс носил чисто природный характер – как развитие регрессивной, засушливой фазы многовекового ритма общей увлажненности. С конца XIX столетия к нему присоединился антропогенный фактор – как следствие вырубки лесов в бассейне и особенно распашки исконных лесостепных территорий [Шнитников, 1976]. В последней четверти XVIII в. площадь озер Чановской системы достигала 10–12 тыс. км<sup>2</sup>, в начале XIX в. составляла 5,0–5,5 тыс. км<sup>2</sup>, в начале XX в. – около 3000 км<sup>2</sup>, а к 1960 г. снизилась до 2300 км<sup>2</sup>.

Для сохранения рыбохозяйственного значения озера в сентябре 1971 г. от основной части озера системой дамб был отделен Юдинский плес (площадь около 700 км<sup>2</sup>), что позволило сократить потери на испарение с поверхности озера и создать условия для повышения уровня воды

в восточной его части за счет стока рек Каргат и Чулым. На лишенном притока Юдинском плесе началось прогрессирующее высыхание. Площадь озера в настоящее время изменяется в пределах 1400–2000 км<sup>2</sup>.

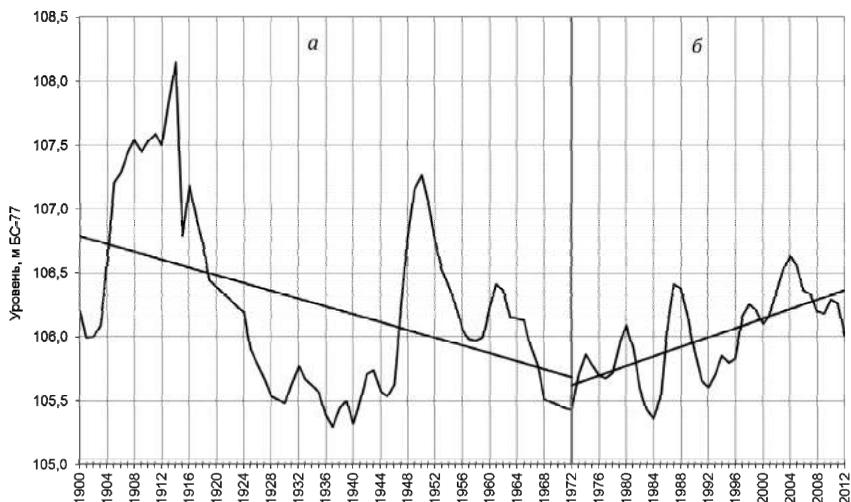
Оз. Чаны имеет сложную плановую конфигурацию (рис. 1). Оно состоит из двух частей – оз. Большие Чаны, в состав которого входят Яркоковский, Тагано-Казанцевский, Чиняихинский плесы и оз. Яркуль, и оз. Малые Чаны, соединенного с оз. Большие Чаны протокой Кожурла.

Наблюдения за уровнем воды проводятся на Ярковском и Тагано-Казанцевском плесах и на озерах Малые Чаны и Яркуль. С 2007 г. все посты привязаны к Балтийской системе высот 1977 г. Наиболее длительный ряд наблюдений (с 1898 г.) имеется по станции Квашино (Ярковский плес) (рис. 2).



**Рис. 1.** Карта оз. Чаны (состояние местности дано на 1991–1998 гг.)

В структуре колебаний уровня оз. Чаны с 1898 по 2000 г. выделяются следующие периоды: 1) низкочастотные колебания с периодом около 40 лет (их период постепенно увеличивается), связанные с колебаниями общей увлажненности территории; 2) колебания с периодом, уменьшающимся от 20 до 10 лет, связанные с изменением солнечной активности; 3) постоянные колебания более высокой частоты с периодами 6 лет и 3 года, возможно связанные с изменением водности рек бассейна. Наибольшие по амплитуде колебания уровня озера обусловлены совпадением во времени максимумов колебаний первых двух частотных диапазонов [Васильев и др., 2006].



**Рис. 2. Колебания уровня оз. Чаны (д. Квашино) до (а) и после (б) отделения Юдинского плеса**

С колебаниями уровня оз. Чаны связано изменение минерализации воды, что существенно отражается на функционировании экосистемы озера. В частности, при понижении уровня воды и увеличении минерализации ухудшаются условия питания, нереста и зимовки рыб. Бессточность озера, морфология его котловины, низкий водообмен между его частями и распределяющее действие вод рек Чулым и Каргат, впадающих в оз. Мал. Чаны, обуславливают неоднородность распределения минерализации по акватории озера. Величина минерализации постепенно возрастает от 0,7–1,0 г/дм<sup>3</sup> в оз. Мал. Чаны до 5,6–6,0 г/дм<sup>3</sup> в наиболее отдаленном от зоны речного питания Ярковском плесе. В Институте водных и экологических проблем составлена карта минерализации воды оз. Чаны [Обзор..., 2015]. В обособленном Юдинском плесе вода высоко минерализована, в отдельные годы минерализация достигает 20 г/дм<sup>3</sup>.

Изменение уровня бессточного озера происходит при нарушениях равновесия между приходными и расходными статьями его водного баланса [Крицкий, 1973]. Приходные статьи – в основном сток впадающих в озеро рек и атмосферные осадки, выпадающие на его поверхность; доля подземного стока обычно сравнительно невелика. Расходная статья баланса – испарение с поверхности водоема. В зависимости от того, какая из статей – поступление или расходование воды – получает перевес, уровень воды повышается или понижается.

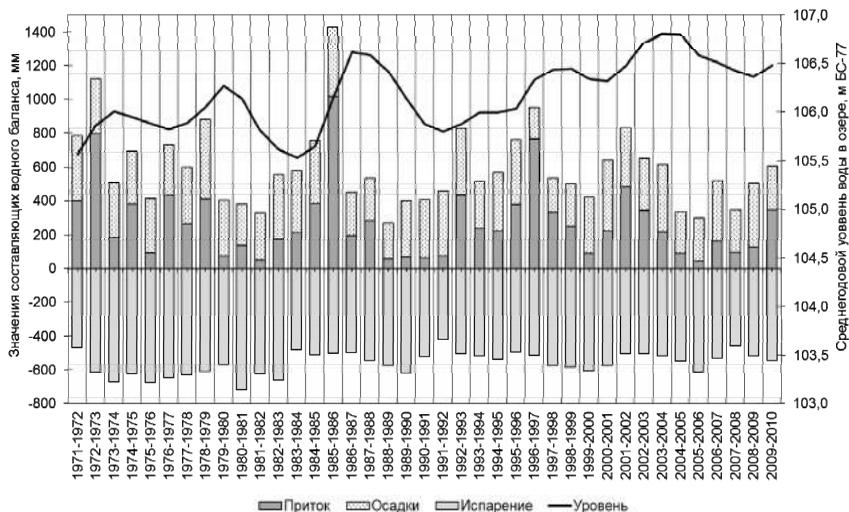
Водный баланс оз. Чаны до отделения Юдинского плеса рассчитывался многими исследователями за разные периоды и в годы различной водности. Водный баланс озера после отделения Юдинского плеса был рассчитан Н. П. Смирновой за период 1971–1978 гг. [Пульсирующее озеро..., 1982] и в последующем – за 1971–1983 гг. с учетом уточненных морфометрических характеристик, полученных Институтом озероведения АН СССР в 1985 г. При этом подчеркнуто, что оз. Чаны стало новым водоемом, характеризующимся более быстрой реакцией на изменение речного притока.

В Институте водных и экологических проблем СО РАН был рассчитан водный баланс за 1983–2000 гг. [Савкини др., 2006; Обзор..., 2015]. В настоящей статье приведен водный баланс по гидрологическим годам за период 2001–2010 гг. и уточненные среднемноголетние величины его составляющих (табл.). Компоненты водного баланса рассчитаны согласно [Рекомендации..., 1989]. За начало гидрологического года принято 1 ноября.

Средние многолетние значения элементов водного баланса за 1971–2010 гг. составили: речной приток –  $0,44 \text{ км}^3$  (слой притока 271 мм – 45,6 % от приходной части баланса); атмосферные осадки на поверхность озера – 322 мм (54,4 %); суммарное испарение (с учетом транспирации) – 561 мм. Речной приток рассчитан с учетом притока с участков рек, расположенных ниже гидрометрических створов. Средняя невязка баланса составила –1,3 % по отношению к приходной части. Причинами невязки водного баланса оз. Чаны являются несовершенство методов измерений и расчетов его составляющих, отсутствие сведений о подземном и боковом притоке в озеро.

Соотношение между основными составляющими водного баланса оз. Чаны для периода 1971–2010 гг. показано на рис. 3. Максимальное приращение уровня (813 мм) наблюдалось в наиболее многоводном 1985–1986 г. и было связано с очень высоким притоком ( $1,54 \text{ км}^3$ ) – максимальным за весь период наблюдений. Максимальное снижение уровня (на 318 мм) наблюдалось в маловодном 1988–1989 г. (приток  $0,09 \text{ км}^3$ ). Коэффициент корреляции между притоком и приращением уровня за период 1971–2010 гг. составляет 0,87, что показывает значительное влияние колебаний притока на изменение уровня воды озера.

Важнейшей задачей является исследование возможности управления водным режимом оз. Чаны. До настоящего времени управление уровнем воды в озере ориентировалось только на жесткую систему дамб, отделяющих Юдинский плес и предусматривающих сброс в него излишек воды через водосброс, расположенный на полуострове Сарганов (однако в настоящее время это по некоторым причинам не осуществляется). Современное управление уровнем воды в озере необходимо связывать



**Рис. 3. Основные составляющие водного баланса и уровень воды оз. Чаны за 1971–2010 гг.**

**Водный баланс оз. Чаны за 1971–2010 гг.**

Год	Осадки		Приток		Суммарное испарение		Приращение уровня		Невязка		
	мм	км <sup>3</sup>	мм	км <sup>3</sup>	мм	км <sup>3</sup>	мм	км <sup>3</sup>	мм	км <sup>3</sup>	%
2000–2001	421	0,68	221	0,36	577	0,93	+135	+0,22	-69	-0,11	-10,8
2001–2002	346	0,67	483	0,93	504	0,97	+260	+0,50	+64	+0,12	+7,8
2002–2003	311	0,66	342	0,73	505	1,08	+83	+0,18	+65	+0,14	+9,9
2003–2004	396	0,89	220	0,49	517	1,16	+128	+0,29	-29	-0,07	-4,8
2004–2005	246	0,55	89	0,20	549	1,23	-163	-0,37	-51	-0,11	-15,3
2005–2006	258	0,52	41	0,08	615	1,25	-255	-0,52	-61	-0,12	-20,4
2006–2007	358	0,70	163	0,32	531	1,04	+67	+0,13	-77	-0,15	-14,9
2007–2008	251	0,43	96	0,17	458	0,79	-160	-0,28	+49	+0,09	+14,2
2008–2009	376	0,62	126	0,21	519	0,86	+92	+0,15	-109	-0,18	-21,8
2009–2010	262	0,50	345	0,66	544	1,05	+48	+0,09	+14	+0,03	+2,4
Среднее за 1971–1983	334	0,48	281	0,40	627	0,91	+0,1	-0,00	-13	-0,02	-2,0
Среднее за 1983–2000	313	0,49	296	0,47	531	0,85	+40	+0,05	+39	+0,06	+6,3
Среднее за 2000–2010	322	0,62	212	0,41	532	1,04	+23	+0,04	-20	-0,04	-3,8
Среднее за 1971–2010	322	0,52	270	0,44	561	0,92	+23	+0,03	+8	+0,01	+1,3

с созданием гидротехнической системы, позволяющей гибко управлять уровнем оз. Чаны, например, путем постройки шлюза для специальных попусков воды в усыхающие рыбопромысловые озера бессточной котловины. Некоторые варианты расчетов управления уровнем оз. Чаны приведены в статье [Болгов и др., 2012] для различных сценариев водопользования на водосборе озера.

### Литература

*Болгов М. В., Коробкина Е. А., Кондакова О. В.* Вероятностный прогноз уровня озера Чаны для различных сценариев развития водопользования // Водные и экологические проблемы Сибири и Центральной Азии: Тр. Всерос. науч. конф. с междунар. участием, посвящ. 25-летию юбилею Института водных и экологических проблем СО РАН: В 3-х т. Т. 1. Барнаул, 2012. С. 18–27.

*Васильев О. Ф., Савкин В. М., Сапрыкина Я. В.* Анализ колебаний уровня озера Чаны // Докл. Академии Наук. 2006. Т. 407, № 4. С. 533–536.

*Крицкий С. Н.* Методика анализа и расчета колебаний уровня замкнутых водоемов // Водные ресурсы. 1973. № 6. С. 9–26.

*Обзор экологического состояния озера Чаны / Отв. ред. О. Ф. Васильев, Я. Вейн.* Новосибирск: ГЕО, 2015. 255 с.

*Пульсирующее озеро Чаны / Под ред. А. В. Шнитникова.* Л.: Наука, 1982. С. 77–101.

*Рекомендации по расчетам водного баланса крупных рек и водохранилищ.* Л.: Гидрометеоздат, 1989. 99 с.

*Савкин В. М., Орлова Г. А., Кондакова О. В.* Современный водный баланс бессточного озера Чаны // География и природные ресурсы. 2006. № 1. С. 123–130.

*Шнитников А. В.* Большие озера Срединного региона и некоторые пути их использования // Озера Срединного региона. Л.: Наука, 1976. С. 5–133.

## PECULIARITIES OF THE HYDROLOGICAL REGIME OF THE CHANY LAKE NATURAL-TECHNOGENIC SYSTEM

**V. M. Savkin, O. V. Kondakova**

*Institute for Water and Environmental problems, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences*

The cyclic fluctuation of water level as the most significant natural peculiarity of Lake Chany is outlined. Contemporary water balance of the lake as a natural-technogenic system (after the cutting off of the Yudinskiy pool) is considered. The annual water balance components of Lake Chany for the period 2001–2010 were calculated, and their long-term mean values for the period 1971–2010 were updated.

# ОБ УСЛОВИЯХ СУЩЕСТВОВАНИЯ БИМОДАЛЬНОСТИ ПЛОТНОСТИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ВЕРОЯТНОСТИ УРОВНЯ КАСПИЯ

**А. В. Фролов**

*Институт водных проблем РАН*

Рассмотрены многолетние колебания уровня Каспийского моря как выходного процесса нелинейной системы, обладающей положительной и отрицательными обратными связями. Предложена модель Каспийского моря, учитывающая отток морской воды в залив Кара-Богаз-Гол. Получена плотность распределения уровня моря в виде решения соответствующего уравнения Фоккера-Планка-Колмогорова. Показано, что бимодальная плотность распределения вероятности уровня моря, отвечающая бессточному Каспию (при отсеченном заливе Кара-Богаз-Гол), переходит в одномодальную в случае одновременного действия зависимостей испарения и оттока морской воды в залив Кара-Богаз-Гол от уровня моря.

Изучению вероятностных закономерностей колебаний уровня Каспия, крупнейшего в мире озера, посвящено множество исследований [Крицкий, Менкель 1946; Крицкий и др., 1975; Музылев, 1980; Музылев и др., 1982; Привальский, 1985; Хубларян, Найденов, 1991; Фролов, 2003; Semenov et al., 2013 и др.]. Моделирование многолетних колебаний уровня Каспийского моря (УКМ) обычно проводят в рамках стационарного приближения, т. е. предполагается, что вынуждающие процессы (например, суммарный речной приток в море) имеют стационарный характер, а морфометрические характеристики чаши моря и гидравлические условия оттока морской воды в залив Кара-Богаз-Гол полагаются неизменными.

Ключевым моментом в изучении многолетних колебаний УКМ как стохастического процесса является нахождение типа и параметров плотности распределения вероятности (ПРВ) уровня. От этой функции в значительной степени зависит надежность и точность расчетов характеристик уровня Каспия в перспективе.

Каспийское море совместно с притоком и остальными составляющими водного баланса естественно рассматривать как некоторую гидрологическую систему с входными и выходными процессами [Frolov, 2002; Фролов, 2003]. Приток в море представляет собой входной процесс. Колебания уровня воды в море и функционально зависящий в естественном режиме отток в залив Кара-Богаз-Гол рассматривают как выходные процессы. Испарение может состоять из двух компонент. Одна из них – стохастическая компонента – рассматривается как входной процесс, другая – детерминистическая – как выходной процесс, будучи функцией уровня моря.

В общем случае в механизме формирования колебаний УКМ существуют положительная и отрицательные обратные связи. Действие отрицательных обратных связей направлено на демпфирование колебаний уровня Каспия, т. е. на возврат отклоненного уровня к равновесному состоянию. Отрицательные обратные связи обусловлены, во-первых, переменностью площади поверхности моря, во-вторых, оттоком морской воды в залив Кара-Богаз-Гол. Переменность площади поверхности моря действует во всем диапазоне колебаний уровня Каспия. Отток в залив Кара-Богаз-Гол значительно действует как отрицательная обратная связь только в относительно небольшом диапазоне колебаний уровня моря, примерно от 1,0 до 4,5 м относительно отметки  $-31$  БС, принимаемой за нулевую. Положительная обратная связь направлена на дестабилизацию уровня моря (т. е. на отклонение уровня от равновесного состояния) и формируется под влиянием зависимостей слоя испарения и площади акватории от уровня моря. Впервые необходимость учета зависимости испарения от уровня воды в Каспии была отмечена в работе [Крицкий и др., 1975]. Нелинейная зависимость испарения с поверхности Каспия от уровня моря была впервые рассмотрена в работе [Хублярян, Найденев, 1991].

Зависимость  $v^-(h)$  оттока в залив Кара-Богаз-Гол от УКМ, отвечающая гидравлическим условиям в проливе, соединяющем море и залив после разрушения дамбы в 1992 г., приведена на рис. 1. Зависимость  $e(h)$  слоя испарения от УКМ соответствует имеющимся натурным данным (рис. 1). Зависимости  $L(h)$  расходования годовых объемов воды из моря от УКМ приведены на рис. 2.

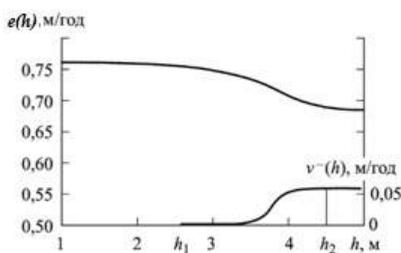


Рис. 1. Зависимость слоев испарения  $e(h)$  и оттока в Кара-Богаз-Гол  $v^-(h)$  от уровня Каспия  $h$

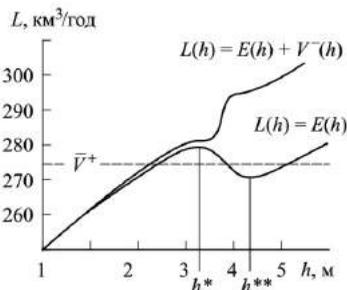


Рис. 2. Зависимость от уровня Каспия  $h$  объемов расходования воды  $L$ :  $L(h) = E(h)$  – на испарение;  $L(h) = E(h) + V^-(h)$  – суммарно на испарение и отток в Кара-Богаз-Гол; пунктирная линия – объем среднего притока в Каспий  $\bar{V}^+$

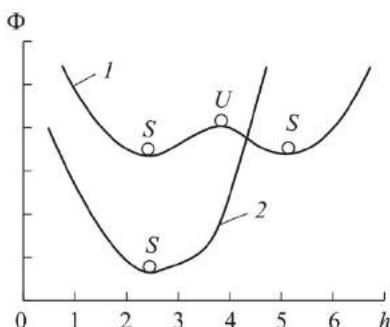
Отрицательная обратная связь, обусловленная оттоком в залив Кара-Богаз-Гол, действует на интервале  $(h_1, h_2)$  (рис. 1). С подъемом уровня моря отток в залив монотонно возрастает до максимальной величины, определяемой испаряющей способностью залива, примерно  $18\text{--}22 \text{ км}^3/\text{год}$ .

Действие положительной обратной связи ограничено интервалом отметок уровня  $(h^*, h^{**})$ , на котором  $\frac{d}{dh} E(h) < 0$ ,  $h^*$  и  $h^{**}$  – точки локального максимума и минимума зависимости  $E(h)$ , соответственно (рис. 2). На интервале  $(h^*, h^{**})$  увеличение глубины моря приводит к уменьшению слоя испарения  $e(h)$  таким образом, что увеличение площади поверхности моря  $F(h)$  оказывается недостаточным для увеличения объема  $E(h)$  испаряемой воды.

Вне интервала  $(h^*, h^{**})$  зависимость  $E(h)$  действует как отрицательная обратная связь, т. е. с подъемом уровня объем испаряемой воды возрастает.

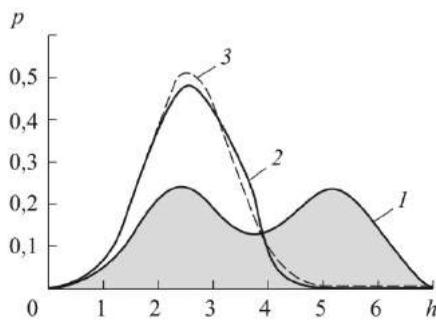
Плотность распределения вероятности УКМ может принципиально различаться для двух состояний моря: а) бессточного, т. е. в условиях отсечения залива Кара-Богаз-Гол, при отсутствии оттока морской воды в залив; б) проточного, т. е. с оттоком морской воды в залив.

В соответствии с данными о водном балансе Каспия [Музылев и др., 1982] и зависимостями  $L(h)$ , приведенными на рис. 2, были построены графики для вероятностного потенциала  $\Phi(h)$  и плотности распределения вероятности  $p(h)$  УКМ для бессточного и проточного моря (рис. 3 и 4 соответственно).



**Рис. 3. Вероятностные потенциалы ПРВ уровня:**

1 – для бессточного Каспия; 2 – для проточного Каспия; U – неустойчивый, S – устойчивые уровни



**Рис. 4. Плотности распределения вероятности уровня Каспия:**

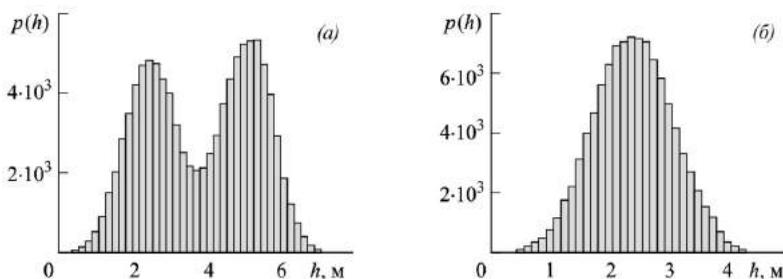
1 – для бессточного Каспия; 2 – проточного Каспия; 3 – гауссовская ПРВ

ПРВ УКМ находились как решения уравнения Фоккера-Планка-Колмогорова для стационарной ПРВ.

В случае бессточного Каспия действие нелинейной зависимости объема испарения от уровня моря приводит к «ландшафту», описываемому кривой 1 на рис. 3. Этот ландшафт имеет две долины и одну вершину. Соответствующая плотность распределения уровня  $p(h)$  – бимодальная, имеет два максимума и один минимум (кривая 1 на рис. 4).

Ландшафт, соответствующий проточному морю, изображен кривой 2 на рис. 3. Вероятностный потенциал ПРВ уровня проточного Каспия имеет только один минимум, следовательно, ПРВ УКМ оказывается одно-модальной (одновершинной). Заметим, что в этом случае ПРВ УКМ может быть аппроксимирована гауссовым распределением (кривая 3 на рис. 4).

Численное (имитационное) моделирование колебаний УКМ, проведенное с использованием алгоритма из работы [Фролов и др., 2014], полностью подтвердило аналитические результаты. Гистограммы УКМ для двух режимов – без оттока морской воды в залив Кара-Богаз-Гол и при наличии такого оттока – приведены на рис. 5.



**Рис. 5. Гистограммы УКМ по результатам численного моделирования:**  
*a* – для бессточного Каспия; *б* – для Каспия с оттоком в залив Кара-Богаз-Гол

При отсутствии оттока из Каспия в залив Кара-Богаз-Гол ПРВ УКМ бимодальна, при наличии оттока – одномодальна.

**Вывод.** Вид плотности распределения вероятности уровня Каспия применительно к выбранному варианту водного баланса моря существенно зависит от режима оттока морской воды в залив Кара-Богаз-Гол. Прекращение оттока в залив приводит к режиму колебаний уровня, при котором стационарная ПРВ УКМ становится бимодальной. В режиме проточного водоема, при оттоке морской воды в залив Кара-Богаз-Гол, ПРВ УКМ оказывается одномодальной.

Работа выполнена при финансовой поддержке РНФ (проект № 14-17-00740-П) и РФФИ (проект № 15-05-06160).

## Литература

*Крицкий С. Н., Менкель М. Ф.* Некоторые положения статистической теории колебаний уровней естественных водоемов и их применение к исследованию режима Каспийского моря // Тр. Первого совещания по регулированию стока. М.: Л.: АН СССР, 1946. С. 76–93.

*Крицкий С. Н., Коренистов Д. В., Раткович Д. Я.* Колебания уровня Каспийского моря. М.: Наука, 1975. 158 с.

*Музылев С. В.* Теоретико-вероятностный анализ колебаний уровней бессточных водоемов // Водные ресурсы. 1980. № 5. С. 21–40.

*Музылев С. В., Привальский В. Е., Раткович Д. Я.* Стохастические модели в инженерной гидрологии. М.: Наука, 1982. 184 с.

*Привальский В. Е.* Климатическая изменчивость. М.: Наука, 1985. 203 с.

*Фролов А. В.* Моделирование многолетних колебаний уровня Каспийского моря: теория и приложения. М.: ГЕОС, 2003. 171 с.

*Фролов А. В., Выручалкина Т. Ю., Соломонова И. В.* Моделирование негауссова векторного процесса в приложении к гидрологии // Водные ресурсы. 2014. Т. 41, № 6. С. 559–564.

*Хубларян М. Г., Найденов В. И.* О тепловом механизме колебаний уровня водоемов // ДАН СССР. 1991. Т. 319, № 6. С. 1438–1444.

*Frolov A. V.* The Caspian Sea as Stochastic Reservoir. Hydrological Models for Environmental Management. Dordrecht; Boston; London: Kluwer Acad. Publishers, 2002. P. 91–108.

*Semenov V. A., Nikitina N. G., Mokhov I. I.* Atlantic Multidecadal Variability and Hydrological Cycle in the Caspian Sea Watershed // Research Activities in Atmospheric and Oceanic Modelling. 2013. N 43. P. 16–17.

## CONDITIONS FOR EXISTENCE OF THE CASPIAN SEA LEVEL BIMODAL PROBABILITY DENSITY FUNCTION

**A. V. Frolov**

*Water Problems Institute, RAS*

The paper considers long-term fluctuations of the Caspian Sea level as a nonlinear system output with positive and negative feedbacks. The Caspian Sea model with due consideration of the outflow to Kara-Bogaz-Gol Bay is designed. The density distribution of the sea level is obtained as a solution to the corresponding Fokker-Planck-Kolmogorov equation. The bimodal probability density of the sea level distribution, which meets the endorheic Caspian Sea (if Kara-Bogaz-Gol Bay is cut off), is shown to turn into the single-mode probability density in the case of simultaneous influence of evaporation and seawater outflow into Kara-Bogaz-Gol Bay on the sea level.

# ГИДРОЛОГО-ГИДРОХИМИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА СИСТЕМЫ ОРШИНСКО-ПЕТРОВСКИХ ОЗЕР ТВЕРСКОЙ ОБЛАСТИ

Е. А. Чекмарева

*Институт водных проблем РАН*

В работе представлена гидрологическая и гидрохимическая характеристика малоизученной системы Оршинско-Петровских озер (Тверская область). Натурные исследования включали гидрометрические измерения, описание растительности и отбор проб донных отложений, грунтовых и поверхностных вод. Химический анализ проб воды и донных отложений был проведен в химической лаборатории Ивановской НИС – филиала ФГБУН ИВП РАН (аттестат аккредитации RA.RU.21AN96).

Система Оршинско-Петровских озер находится внутри болотного массива «Оршинский мох» площадью 43,2 тыс. га (рис.) в пределах Калининского (48 %), Рамешковского (47 %) и Кимрского (5 %) районов Тверской области, в бассейне Верхней Волги. Всего система включает 9 озер площадью от 32 до 2 км<sup>2</sup>, 25 озер площадью 1–0,01 км<sup>2</sup> (Барушевское, Березовское, Большой Витун, Большое Черненькое, Вельга, Дореево, Кобыльское, Красненькое, Либвец, Лука, Лютенькое, Малый Витун, Малое Песочное, Малое Черненькое, Озерце, Прилука, Речка, Соминоц, Сомово, Соколье, Сухое, Тотное, Чайкино, Черное, Чистенькое), которые занимают 7,3 тыс. га земли. Также в систему Оршинско-Петровских озер входит множество водоемов площадью до 0,01 км<sup>2</sup> и обводненные территории.



Система Оршинско-Петровских озер

Морфометрические характеристики исследуемых нами озер представлены в табл. 1.

**Таблица 1. Морфометрические характеристики исследуемых озер Оршинско-Петровской озерной системы, по состоянию на 2017 г. [Государственный..., 2017]**

№ п/п	Озеро	Площадь, км <sup>2</sup>	Длина, км	Ширина max/ср., км	Длина береговой линии, км	Глубина max/ср., м
1	Страдовня	2,52	1,93	1,71/1,31	6,39	–
2	Оршинское	2,08	1,92	1,37/1,08	5,32	–
3	Глухое	2,17	1,93	1,51/1,12	5,68	–
4	Светлое	8,30	3,72	3,15/2,23	11,00	4,00/1,35
5	Щучье	2,84	2,03	1,80/1,40	6,29	–
6	Глубокое (Конечное)	4,93	3,14	2,97/1,57	10,60	3,60/1,70
7	Белое	4,10	2,57	2,15/1,60	8,00	2,60/1,60
8	Озерце	0,90	1,25	0,90/0,72	2,57	1,50/0,50
9	Великое	32,00	11,20	5,25/2,86	29,60	3,51/2,74
10	Лука	0,63	2,05	0,54/0,31	4,83	–
11	Песочное	5,70	3,44	2,59/1,66	9,40	1,80/1,10
12	Вельга	0,23	0,84	0,48/0,27	2,98	–

Озера соединены протоками, ручьями, каналами (табл. 2) и являются реликтами (остатками) приледникового водоема. Берега озер практически на всем протяжении заболочены, высотные отметки урезом системы озер – 135–145 м над уровнем моря. Глубина озер не превышает 4 м.

**Таблица 2. Морфометрические характеристики малых водотоков Оршинско-Петровской озерной системы, 2017 г.**

№ п/п	Водоток	Вытекает из/ протекает через	Длина, км	Площадь водосбора, км <sup>2</sup>	Впадает в
1	р. Орша	оз. Оршинское/–	72	752	р. Волга
2	р. Созь (Созька)	оз. Великое/–	34	575	Иваньков. вдхр.
3	р. Сосца	–/–	22	306	р. Созь
4	р. Песочня	оз. Песочное/–	12	60,7	р. Сосца
5	руч. Песочный	–	11	–	р. Созь
6	руч. Борозда	оз. Великое/ оз. Соминоц	6	–	оз. Лука
7	канал Шестинский	–/оз. Бол. Черненькое, Дореево, Страдовня	24	59	р. Орша
8	канал Каблуковский	–/оз. Барушевское, оз. Страдовня	13	49	р. Орша
9	канал Денисовский	–/ оз. Вельга	12	79	р. Орша

Геологическое строение исследуемой территории представлено отложениями доломитов (север, северо-запад и северо-восток), мергелей, алевролитов, глин и песков различной мощности, перекрытых болотными торфяными отложениями мощностью до 12 м. На оз. Великом прибрежное пространство занято водно-ледниковыми отложениями озов (гряд) и каммов (гребней) московского оледенения (гравий, пески, суглинки) мощностью 13,5 м.

Питание озер осуществляется за счет болотных, грунтовых, подземных вод и атмосферных осадков.

Поверхностный водосбор системы озер представляет собой сложный комплекс участков болотного массива «Оршинский мох»: выпуклых грядово-мочажинных болот; верховых облесенных, низинных травяных и лесных болот, типичных для Восточно-Европейской равнины. Около 50 % площади «Оршинского мха» было охвачено торфоразработками во второй половине XX в. Западная часть болотного массива (Калининский район) находится в нарушенном состоянии, здесь развита сеть осушительных каналов и узкоколейных железных дорог. Под воздействием торфоразработок контуры озер Оршино, Вельга и Лютенское изменились, свободная поверхность водного зеркала уменьшилась, активировались процессы зарастания озер и образования верхового болота.

Подземный водосбор центральной части Оршинско-Петровской системы озер сложен верхнечетвертичным аллювиальным водоносным горизонтом (пески, супеси с прослоями суглинков и глин, мощность до 15 м). Озеро Великое окружают воды спорадического распространения в песках, супесях и галечниках, среди валунных суглинков и глин московской морены. Водоносные горизонты подстилают кемерийдж-келловейский водоупор (глины с прослоями алевролитов, мощность до 31 м), днепровский водоупор (суглинки и глины валунные с гнездами песков, мощность 3–56 м), татарский водоупор (глины с прослоями алевролитов и песков, мощность до 25 м).

Грунтовые воды вблизи системы Оршинско-Петровских озер высокоминерализованные (198–661 мг/дм<sup>3</sup>), гидрокарбонатно-сульфатно-хлоридные. Высокие содержания натрия и калия (2,8–52,3 мг/дм<sup>3</sup>) отмечены в бассейнах рек Орша и Созь (юго-запад и юго-восток Оршинско-Петровской системы), нитратов (0,31–158,20 мг/дм<sup>3</sup>) – в бассейнах рек Орша, Песочня, Сосца, Созь (юг, юго-запад, юго-восток системы озер) и фосфатов (0,003–9,969 мг/дм<sup>3</sup>) – в бассейнах рек Песочня и Сосца (юго-восток системы).

Донные отложения представлены аллювием (пески, галька) и отложениями органического происхождения: древесные, растительные остатки, торф, сапрпель. Анализ химического состава донных отложений оз. Великого выявил невысокие содержания элементов. Донные отложения

подвержены промывке при интенсивном водообмене (в протоках, местах разгрузки грунтовых вод), накопление ила происходит в застойных заросших участках, ближе к берегу (табл. 3).

**Таблица 3. Концентрация химических веществ в составе донных отложений оз. Великого и рек Созь и Сосца, 2012 г.**

Показатель	Единицы измерения	Озеро Великое	Река Созь/Харитоново	Река Сосца/Литвинцево
HCO <sup>3-</sup>	%	0,009	0,015	0,022
Ca <sup>2+</sup> /Mg <sup>2+</sup>	мг-экв/100 г	0,15/0,10	0,30/0,26	0,51/0,40
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	мг/100 г	1,8	19,4	26,9
Cl <sup>-</sup>	%	0,41·10 <sup>-3</sup>	0,41*10 <sup>-3</sup>	7,83·10 <sup>-3</sup>
Fe общее	мг Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /100 г	19,0	95,8	162,6
P кирсан.	мг P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> /100 г	7,98	27,7	33,7
N-NH <sub>4</sub> поглощ.	мг N/100 г	0,55	1,9	1,9
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	мг N/100 г	0,18	0,27	0,21
Перм. окисляемость	мг O/100 г	6,6	8,2	8,2

В озерах Великое, Белое, Озерце и Глубокое (Конечное) произрастают следующие виды высшей водной растительности: кувшинка чисто-белая (*Nymphaea candida* Presl.), кубышка желтая (*Nuphar luteum* (L.) Smith.), рогоз (*Typha*), горец земноводный (*Polygonum amphibium* L.), сусак зонтичный (*Butomus umbellatus* L.), тростник обыкновенный (*Phragmites communis* Trin.). Биоразнообразие флоры в исследуемых озерах ниже в два раза по сравнению с малыми реками, вытекающими из них.

Наши исследования подтвердили вывод, сделанный ранее [Петроозерье, 2009], о том, что рассмотренные озера отличаются малой продуктивностью и дистрофностью.

Воды озер Великое, Белое, Озерце и Глубокое (Конечное) гидрокарбонатно-кальцево-сульфатные, отличаются низкой минерализацией, высокой цветностью, насыщение воды кислородом составляет более 70 %, содержание железа выше 0,3 мг/дм<sup>3</sup>, БПК<sub>5</sub> выше 3 мг O/дм<sup>3</sup> (табл. 4).

Мониторинг качества воды малых водотоков, вытекающих из Оршинско-Петровской озерной системы, был проведен в различные сезоны 2009–2016 гг. Анализ качества воды показал, что некоторые гидрохимические характеристики подвержены межгодовой и сезонной динамике.

Значения физико-химических показателей (рН, электропроводимость и мутность) в маловодные годы увеличиваются. Наиболее мутные воды в р. Созь (до 17,9 мг/дм<sup>3</sup>), высокая электропроводимость отмечена в реках Сосца и Орша (44,8 и 36,6 мS/m).

Концентрации главных ионов также подвержены межгодовой динамике. В воде р. Орши в маловодные годы, по сравнению с многоводными, происходит рост концентрации гидрокарбонатов (от 79,3 до 221 мг/дм<sup>3</sup>) и

кальция (от 20 до 58 мг/дм<sup>3</sup>). В питании р. Сосцы преобладающую роль играют грунтовые и болотные воды. Для ее вод характерны высокие содержания сульфатов (до 25,6 мг/дм<sup>3</sup>). В маловодные годы концентрации кальция достигают 86,2 мг/дм<sup>3</sup>, а хлоридов – 47,3 мг/дм<sup>3</sup>. Наиболее низкие концентрации гидрокарбонатов (33,6 мг/дм<sup>3</sup>), сульфатов (8,5 мг/дм<sup>3</sup>) и хлоридов (0,9 мг/дм<sup>3</sup>) характерны для р. Созь.

**Таблица 4. Динамика химического состава воды р. Созь на участке от оз. Великого до подпора Ивановского водохранилища (п. Первое Мая), 2012 г.**

Показатель	Единицы измерения	Озеро Великое	Река Созь		
			Спас-на-Сози	Харитово	Первое Мая
рН	единицы рН	7,34	6,23	7,38	7,28
Гидрокарбонаты, HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	мг/дм <sup>3</sup>	18,3	24,4	30,5	42,7
Кальций, Ca <sup>2+</sup>	мг/дм <sup>3</sup>	8,0	10,0	10,0	12,0
Магний, Mg <sup>2+</sup>	мг/дм <sup>3</sup>	2,4	2,4	3,6	4,9
Сульфаты, SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	мг/дм <sup>3</sup>	6,9	13,4	11,0	7,7
Хлориды, Cl <sup>-</sup>	мг/дм <sup>3</sup>	0,8	0,8	0,8	0,8
Кремний, Si	мг/дм <sup>3</sup>	4,8	5,3	4,0	4,5
Железо общее	мг/дм <sup>3</sup>	0,46	0,63	1,10	0,95
Марганец, Mn <sup>2+</sup>	мг/дм <sup>3</sup>	0,040	0,001	<0,001	<0,001
Фосфаты, PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>	мг/дм <sup>3</sup>	0,027	0,030	0,030	0,006
Ионы аммония, NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	мг/дм <sup>3</sup>	0,52	0,16	0,40	0,69
Нитрат-ионы, NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	мг/дм <sup>3</sup>	0,87	3,1	0,36	0,56
Цветность	град. Pt-Co шк.	150	150	150	180
Перманганатная окисл.	мг О/дм <sup>3</sup>	24	30	37	32
БПК <sub>5</sub>	мг О/дм <sup>3</sup>	3,6	3,1	2,9	2,5
Кислород, раств. O <sub>2</sub>	мг O <sub>2</sub> /дм <sup>3</sup>	8,4	5,5	7,4	7,8
Мутность	мг/дм <sup>3</sup>	13,7	19,9	15,6	9,7
Минерализация	мг/дм <sup>3</sup>	38	61	62	75

Показатель содержания легкоразлагаемого органического вещества (БПК<sub>5</sub>) в многоводные годы увеличивается, изменяясь в пределах 1,3–15,7 мг О/дм<sup>3</sup>. Значения перманганатной окисляемости высокие, особенно в многоводные годы, и достигают 95,4 мг О/дм<sup>3</sup> в р. Сосце. Цветность воды высокая и изменяется в диапазоне от 79 до 750 градусов Pt-Co шкалы. Наиболее цветные воды в р. Сосце.

Концентрации общего фосфора изменяются от 0,029 мг Р/дм<sup>3</sup> (р. Созь) до 0,203 и 0,234 мг Р/дм<sup>3</sup> (р. Сосца и р. Орша). В маловодные и жаркие года содержание растворенного минерального фосфора минимально (до 6 %), а в многоводные годы доля растворенного фосфора достигает 72 % от общей доли фосфора в реках Орша и Созь.

Наиболее высокие концентрации кремния отмечены в воде р. Орши (до 6,0 мг/дм<sup>3</sup>). Концентрации железа общего изменяются в пределах 0,5–

2,43 мг/дм<sup>3</sup>, марганца – 0,02–0,34 мг/дм<sup>3</sup>. Максимальные концентрации данных ингредиентов зафиксированы в воде р. Сосцы.

Исследуемые озера и болота составляют единую водную экосистему с высоким потенциалом к самоочищению, нераздельно функционирующую в пределах бассейна Верхней Волги. Система Оршинско-Петровских озер, как часть болотного массива «Оршинский Мох», относится к водно-болотным угодьям, соответствующим критериям Рамсарской конвенции: 1a, 1c, 2b, 2c, 3b [Рамсарская конвенция..., 1993]. Согласно этим критериям данная территория представляет собой эталонную региональную экосистему водно-болотных угодий, ценную в качестве местообитания разнообразной флоры и фауны, выполняющую существенную гидрологическую, биологическую и экологическую роль в функционировании Ивановского водохранилища и его водосборной территории.

Требуется детальное изучение статуса озер Оршинско-Петровской озерной системы и особенностей их функционирования. Необходим регулярный мониторинг данной территории, в особенности западной части, нарушенной вследствие торфоразработок, и центральной части, для отслеживания факторов загрязнения (бытовыми стоками и мусором, нефтепродуктами), беспокойства, нарушения растительного покрова, возникновения пожаров вследствие массового стихийного туризма.

### Литература

*Государственный водный реестр.* URL: <http://www.textual.ru> (дата обращения: 10.04.2017).

*Леонова Н. Б.* Оршинский мох, болото [Электронный ресурс] // Научно-популярная энциклопедия «Вода России». URL: <http://water-rf.ru> (дата обращения: 10.04.2017).

*Петроозерье* // Энциклопедический справочник «Тверская область». URL: <http://region.tverlib.ru>.

*Рамсарская конвенция* 1971 г. // Международные нормативные акты ЮНЕСКО. М., 1993 (дата обращения: 10.04.2017).

## HYDROLOGICAL AND HYDROCHEMICAL CHARACTERISTICS OF THE ORSHINSKO-PETROVSKIYE LAKES SYSTEM, TVER REGION

**E. A. Chekmareva**

*Institute of Water Problems of RAS*

The paper presents the hydrological and hydrochemical characteristics of the so far poorly studied Orshinsko-Petrovskiy lakes system (Tver Region). Field surveys included hydrometric measurements, vegetation description and sampling of sediments, groundwater and surface water. Chemical analysis of water and bottom sediment samples was performed at the chemical laboratory of the Ivan'kovo Research Station (accreditation RA.EN.21AH96), branch of the Water Problems Institute of the Russian Academy of Sciences.

# **ГИДРОХИМИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВОДЫ И ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЙ**

## **ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРНОЙ И ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ ИЕРАРХИИ ВОД ОЗЕРА БАЙКАЛ ПРИ ХИМИЧЕСКОМ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ ВЕЩЕСТВА ВОД ОЗЕРА БАЙКАЛ С ВЕЩЕСТВОМ ПОТОКОВ ПРИРОДНОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ**

**О. Ю. Астраханцева**

*Институт геохимии им. А. П. Виноградова СО РАН*

Предложен комплексный междисциплинарный системный подход к исследованию однородности и целостности химического взаимодействия компонентов вещества вод оз. Байкал с растворенными и взвешенными компонентами ( $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ , Al, Si,  $\text{Mn}^{2+}$ ,  $\text{Fe}_{\text{общ}}$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{PO}_4^{3-}$ ,  $\text{H}^+$ ,  $\text{O}_2$ , As, B, Cr, Cu, Cd, Hg, Pb, Sr, Zn, Co, U, V, Br, Rb, Mo,  $\text{C}_{\text{орг}}$ ,  $\text{N}_{\text{орг}}$ ,  $\text{P}_{\text{орг}}$ ,  $\text{S}_{\text{орг}}$ ,  $\text{CO}_2$ , Ti) и таких же компонентов вещества потоков природной составляющей окружающей среды (реки, взвесь рек, дождь и снег, аэрозоль, подземные воды, минеральные воды, приток озерных вод из других резервуаров озера, поток из донных отложений, поток в донные отложения, сток озерных вод в другие резервуары озера и в р. Ангара). Установлено, что химическое взаимодействие вещества вод оз. Байкал и вещества потоков природной составляющей окружающей среды – многорезервуарная система.

Озеро Байкал является самым древним, глубоким и крупным пресноводным водоемом Земли и как источник воды будущего человечества является громадным мировым потенциалом, в том числе для России. Необходимо сохранять оз. Байкал в состоянии, близком к природному. Отсутствие изученности механизмов взаимодействия оз. Байкал и природной составляющей окружающей среды, роли ее геохимических потоков в формировании химического состава вод озера не позволяет решать конкретные инженерные и экологические задачи, например, прогноз миграции загрязняющих компонентов в водах оз. Байкал. Необходимо изучение природных путей миграции, концентрации и рассеяния макро-, микро-, биогенных элементов и органического вещества, посту-

пающих в резервуары озера с потоками химических компонентов и органического вещества окружающей среды. Исследование аккумуляции химических компонентов в донных отложениях оз. Байкал крайне важно для геологических целей.

Воды оз. Байкал – биокосное вещество, жидкий минерал  $H_2O$  с растворенными и взвешенными компонентами – химическими элементами и органическим веществом ( $Na^+$ ,  $K^+$ ,  $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$ , Al, Si,  $Mn^{2+}$ ,  $Fe_{общ}$ ,  $SO_4^{2-}$ ,  $HCO_3^-$ , Cl,  $NO_3^-$ ,  $PO_4^{3-}$ ,  $H^+$ ,  $O_2$ , As, B, Cr, Cu, Cd, Hg, Pb, Sr, Zn, Co, U, V, Br, Rb, Mo,  $C_{орг}$ ,  $N_{орг}$ ,  $P_{орг}$ ,  $S_{орг}$ ,  $CO_2$ , Ti). Химическое взаимодействие компонентов вещества вод озера с такими же компонентами вещества потоков природной составляющей окружающей среды (реки, взвесь рек, дождь и снег, аэрозоль, подземные воды, минеральные воды, приток озерных вод из других резервуаров озера, поток из донных отложений, поток в донные отложения, сток озерных вод в другие резервуары озера и в р. Ангару) существует и развивается не произвольным способом, а подчиняется определенным законам природы – наблюдаемым устойчивостям некоторого образца, и закон является только описанием этой устойчивости. Необходимо понимание порядка в организации взаимодействия вещества вод оз. Байкал и вещества потоков природной составляющей окружающей среды, обуславливающего особенности движения вещества в этой системе.

Важнейшие элементы организации системы «вещество вод озера Байкал – вещество потоков природной составляющей окружающей среды» – физико-химическое состояние вещества вод озера и вещества потоков, впадающих в озеро и вытекающих из него, физико-химические условия внешней среды, определяющие это состояние и функциональные связи вещества вод озера с веществом окружающей среды. Что касается физико-химического состояния вещества вод оз. Байкал и вещества потоков, впадающих в озеро и вытекающих из него, то собранный большой эмпирический материал по веществу вод озера, донным отложениям и потокам нуждается в осмыслении и систематизации. Необходимо учитывать, что Байкал – глубокое рифтовое олиготрофное озеро, эволюцией которого управляют физико-химические законы, обусловленные рифтогенной структурой земной коры. Свойства внутренней среды изучаемого природного объекта, т. е. ее наиболее вероятные физико-химические параметры, можно определить только в состоянии равновесия (равенства) ее физико-химических параметров с аналогичными параметрами окружающей среды. Однако структура физико-химического состояния вещества вод оз. Байкал, равновесного по физико-химическим параметрам с такими же параметрами окружающей среды, на предмет ее однородности или иерархичности до сих пор не изучалась. Исследование физико-хими-

ческих взаимодействий вещества оз. Байкал и вещества окружающей среды (обмен веществом и энергией) не получило должного развития. Неизвестна структура характера физико-химического состояния и, соответственно, геохимической среды озера в плане однородности или иерархичности по акватории озера, неизвестна причина (фактор), обуславливающая целостность или иерархичность характера геохимической среды вещества вод оз. Байкал. По второму слагаемому: не учитывалась роль всех частных взаимодействий вещества вод оз. Байкал с веществом окружающей среды, составляющих общее (термодинамическое) взаимодействие, определяющих физико-химические параметры, энергетический баланс и энергетический потенциал вещества вод озера, а также характер (целостность или локальность) геохимической среды озера, которая, в свою очередь, обуславливает реакцию вещества вод озера на поступившие с потоками окружающей среды компоненты. И, наконец, третье слагаемое. Неизвестен отклик вещества вод оз. Байкал на поступление конкретных компонентов вещества потоков окружающей среды: транзит этих компонентов или аккумуляция. Неизвестны функциональные характеристики вещества вод озера при взаимодействии с веществом потоков. Вопрос осмысления сценария отношений в системе «вещество вод оз. Байкал – вещество окружающей среды» является ключевым в выяснении структурной и организационной сущности этой системы.

Цель нашего исследования – исследовать внешнюю (функциональную) и внутреннюю (структурную) иерархии вещества вод оз. Байкал при химическом взаимодействии компонентов вещества вод оз. Байкал и компонентов вещества потоков природной составляющей окружающей среды. Для достижения цели решены задачи:

1. В акватории вод оз. Байкал выделены зоны естественных физико-химических равновесий – пространственно локализованные зоны (резервуары) со стабильными физико-химическими параметрами (находящимися в равновесии с таковыми же параметрами окружающей среды) в масштабе исторического времени.

2. Рассчитаны среднегодовые содержания компонентов:  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Al}$ ,  $\text{Si}$ ,  $\text{Mn}^{2+}$ ,  $\text{Fe}_{\text{общ}}$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{PO}_4^{3-}$ ,  $\text{H}^+$ ,  $\text{O}_2$ ,  $\text{As}$ ,  $\text{B}$ ,  $\text{Cr}$ ,  $\text{Cu}$ ,  $\text{Cd}$ ,  $\text{Hg}$ ,  $\text{Pb}$ ,  $\text{Sr}$ ,  $\text{Zn}$ ,  $\text{Co}$ ,  $\text{U}$ ,  $\text{V}$ ,  $\text{Br}$ ,  $\text{Rb}$ ,  $\text{Mo}$ ,  $\text{C}_{\text{орг}}$ ,  $\text{N}_{\text{орг}}$ ,  $\text{P}_{\text{орг}}$ ,  $\text{S}_{\text{орг}}$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{Ti}$  в мг/л, % в водах, донных отложениях резервуаров оз. Байкал и химических потоках природной составляющей окружающей среды, впадающих в резервуары озера и вытекающих из них (реки, взвесь рек, дождь и снег, аэрозоль, подземные воды, минеральные воды, приток озерных вод из других резервуаров озера, поток из донных отложений, поток в донные отложения, сток озерных вод в другие резервуары озера и в р. Ангару).

3. Рассчитаны морфометрические характеристики и водные балансы всех резервуаров оз. Байкал и потоков, впадающих в резервуары и вытекающих из них.

4. Рассчитаны химические балансы всех резервуаров и потоков мегасистемы «вещество вод оз. Байкал – вещество потоков природной составляющей окружающей среды»; установлены пути миграции и места аккумуляции компонентов, поступающих в озеро с внешней и внутренней нагрузками.

5. В выделенных зонах через внутренние физико-химические параметры рассчитаны формы нахождения компонентов и характер геохимической среды (рН, Eh, минерализация).

Методы исследования: использован системный подход к исследованию физико-химических параметров и характера состояния геохимической среды вещества вод оз. Байкал, озеро рассматривается как макроскопический объект, часть закрытой мегасистемы «вещество вод оз. Байкал – вещество окружающей среды», к которой применимы законы классической термодинамики; использованы принципы локального равновесия, транзитивности, термического равновесия; применен метод многорезервуарности (рациональное выделение систем с различными физико-химическими свойствами). Разработан метод выделения из сложного эволюционирующего и иерархического природного объекта – оз. Байкал – локализованных зон, равновесных по физико-химическим параметрам с таковыми же параметрами вещества окружающей среды. Используются статистические методы. Разработана методика расчета химического состава независимых компонентов для физико-химических моделей «вещество вод резервуара озера Байкал – вещество потоков окружающей среды». Используются структурно-функциональный метод, метод балансовых расчетов и метод компьютерного моделирования равновесных (максимально вероятных) составов вещества вод оз. Байкал.

Предложенный комплексный междисциплинарный системный подход к исследованию однородности и целостности химического взаимодействия компонентов вещества вод оз. Байкал и компонентов вещества потоков природной составляющей окружающей среды позволил сделать следующие выводы.

1. Вещество вод оз. Байкал многорезервуарно по его физико-химическому состоянию и состоит из пяти резервуаров (Южного, Селенгинского, Среднего, Ушканьеостровского, Северного), неравновесных друг с другом, но равновесных с веществом окружающей среды, т. е. является находящейся в постоянстве своего состояния (стационарной) мегасистемой. Разновеликость гравитационного взаимодействия вещества вод оз. Байкал и вещества Земли по акватории озера является тем фактором, ко-

торый определяет структуру физико-химического состояния вещества вод озера как многорезервуарную.

2. В масштабе исторического времени химическое взаимодействие вещества вод оз. Байкал с веществом потоков окружающей среды – природная стационарная мегасистема пространственно локализованных геохимических состояний вещества озера, открытых по отношению к веществу потоков окружающей среды.

3. Иерархичность гравитационного взаимодействия вещества вод оз. Байкал и вещества Земли по акватории озера из-за его морфологических характеристик – резкой расчлененности дна обуславливает иерархичность общего – термодинамического взаимодействия вещества вод оз. Байкал и вещества окружающей среды, иерархичность их частных – теплового и химического взаимодействий, а также индивидуальность приходной и расходной статей в энергетических балансах – и, соответственно, самих энергетических балансов резервуаров. Индивидуальность энергетического потенциала каждого резервуара объясняет индивидуальность отклика вещества резервуаров на поступление компонентов вещества потоков окружающей среды и, соответственно, параметры геохимической среды в резервуарах как результат этих процессов.

4. Исследование структуры водного баланса оз. Байкал через его расчет в отдельных резервуарах озера показало, что в приходной части водного баланса материковый сток является главной составляющей только для Северного и Селенгинского резервуаров, для остальных резервуаров первое место по вкладу в водный баланс занимает приток озерных вод из соседних резервуаров озера. Выявлено среднее значение постоянной времени обмена вод для каждого резервуара: в Северном резервуаре – около 386 лет; в Ушканьеостровском – около 129 лет; в Среднем – около 287 лет; в Селенгинском – около 25 лет; в Южном – около 96 лет.

5. Установленные функции систем «вещество резервуаров оз. Байкал – вещество потоков окружающей среды»: комплексообразование, миграция, избирательный транзит и избирательная утилизация или включение в биогеохимические круговороты компонентов, поступивших в резервуары озера из внешней среды с веществом потоков. Внешняя функциональная иерархия вещества вод резервуаров оз. Байкал проявляется в организации движения (миграции) компонентов и проценте их аккумуляции в донных отложениях резервуаров.

6. Сходство функций вещества резервуаров озера наблюдается в отношении их пропускной и аккумулирующей способностей относительно поступающих с внутренними и внешними потоками основных элементов, микроэлементов, биогенных элементов и органического вещества, заключающихся в открытости – способности частично или полностью пропу-

кать (транзит) и обмениваться между резервуарами следующими компонентами:  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ , В, Мо, Hg, Sr,  $\text{C}_{\text{орг}}$ ,  $\text{N}_{\text{орг}}$ ,  $\text{S}_{\text{орг}}$  – и закрытости в отношении остальных компонентов (части катионов основных компонентов, биогенных элементов, части органического вещества, микроэлементов), которые связываются (вступают в комплексообразование) и остаются в резервуарах (захораниваются или вступают в химический круговорот). По этим компонентам резервуары полуавтономны, закрыты и не обмениваются с другими резервуарами. Различие функций резервуаров заключается в том, как расходуются аккумулированные компоненты: в Селенгинском резервуаре они захораниваются, в остальных небольшая их часть захоранивается, а большая часть вступает в химический круговорот.

7. В поставке биогенных элементов все резервуары, кроме Селенгинского, находятся на внутреннем обеспечении (потоки из донных отложений), и только Селенгинский резервуар питается внешним привносом. Внешняя и внутренняя нагрузки на протяжении озера, в зависимости от морфологии, резко меняются и индивидуальны в каждом резервуаре. Выявлены большие внутренние нагрузки – потоки из донных отложений в четырех резервуарах озера и незначительная – в Селенгинском резервуаре. Установлена ведущая роль внутриводоемных процессов в поступлении и утилизации биогенных элементов,  $\text{P}_{\text{орг}}$ , основных компонентов – катионов и группы микроэлементов в резервуарах оз. Байкал.

8. Химический состав донных отложений резервуаров обусловлен избирательной утилизацией вещества в донные осадки оз. Байкал: с внутриводоемными потоками в донные отложения поступают биогенные элементы,  $\text{P}_{\text{орг}}$ , часть остального органического вещества, часть основных компонентов – катионов и группа микроэлементов. Установлено, что во всех резервуарах оз. Байкал, кроме Селенгинского, процент утилизации (захоронения) поступающего вещества очень низок, вследствие того что вещество, поступившее с потоком в донные отложения, за отсутствием малой части возвращается с потоком из донных отложений. В четырех резервуарах озера утилизация вещества ничтожна (около 10 %), при этом существуют мощные химические круговороты компонентов. В Селенгинском резервуаре захоранивается 85 % вещества, поступившего с потоком в донные отложения.

9. Химическое взаимодействие вещества вод оз. Байкал и вещества потоков окружающей среды иерархично, и структура обмена упорядочена именно таким образом: поведение вещества вод озера при обмене веществом и энергией с веществом потоков окружающей среды индивидуализировано в веществе пяти резервуаров озера. Вещество мегасистемы «вещество вод оз. Байкал – вещество потоков окружающей среды» иерар-

хично – вещество каждого резервуара может рассматриваться как система, обладающая целостностью в отношении своих функций и определяемая в своих границах по физико-химическим параметрам.

10. Модель структуры состояния вещества вод оз. Байкал, равновесного по физико-химическим параметрам с веществом окружающей среды, представляет собой различающиеся среднемноголетние состояния геохимических сред, содержащих макро-, микрокомпоненты, биогенные элементы и органическое вещество, в подсистемах (вещество прибрежных, поверхностных, глубинных, придонных вод) пяти резервуаров оз. Байкал (Южного, Селенгинского, Среднего, Ушканьеостровского, Северного), характеризующиеся стабильными среднегодовыми параметрами: температурой, давлением, химическим составом, минерализацией и рассчитанными через эти параметры характеристиками кислотно-основных и окислительно-восстановительных состояний геохимических систем, формами существования элементов.

11. Установлено, в виде каких химических соединений компоненты присутствуют в веществе водных подсистем: все компоненты образуют ионные пары, причем в нескольких формах, только макрокомпоненты на 99 % представлены в виде свободных незакомплексованных ионов. Доминирующая форма серы –  $\text{SO}_4^{2-}$ , углерода –  $\text{HCO}_3^-$ . Хлор присутствует в виде иона  $\text{Cl}^-$ . У всех биогенных компонентов и микроэлементов, кроме Вг, основные формы нахождения в водах Байкала – ионные комплексы. Причем у таких компонентов, как Al, Cu, Cr, Fe, As, P, Hg, U, V, доминирующие формы нахождения в разных подсистемах различаются.

12. В Нормативах допустимых воздействий в «перечень особо опасных веществ» для резервуаров оз. Байкал необходимо включить вещества, изменяющие интенсивность внутренней нагрузки – потока из донных отложений и потока в донные отложения (элементы первого и второго класса экологической опасности).

## **A STUDY OF THE STRUCTURAL AND FUNCTIONAL ORGANIZATION OF THE CHEMICAL INTERACTION OF LAKE BAIKAL WATERS WITH SUBSTANCES IN THE FLOWS OF MATTER IN THE NATURAL ENVIRONMENT**

**O. Yu. Astrakhantseva**

*Vinogradov Institute of Geochemistry, Siberian Branch RAS*

An integrated and multidisciplinary approach is suggested for the study of homogeneity and integrity of the chemical interaction of substances in Lake Baikal waters with dissolved and suspended components ( $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ , Al, Si,  $\text{Mn}^{2+}$ ,  $\text{Fe}_{\text{tot}}$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{PO}_4^{3-}$ ,  $\text{H}^+$ ,  $\text{O}_2$ , As, B, Cr, Cu, Cd, Hg, Pb, Sr, Zn, Co, U, V, Br, Rb,

Mo, C<sub>org</sub>, N<sub>org</sub>, P<sub>org</sub>, S<sub>org</sub>, CO<sub>2</sub>, Ti) and the corresponding components in the flows of matter in the natural environment (rivers, suspended matter in rivers, rain- and snowfall, mist, groundwater, mineral water, inflow of lake water from other basins of the lake, outflux from bottom sediments, influx to bottom sediments, runoff of lake water to other basins of the lake and the Angara River).

## **ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА СОВРЕМЕННЫХ ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЙ ВОДОЕМОВ БАСЕЙНА ОНЕЖСКОГО ОЗЕРА**

**Н. А. Белкина**

*Институт водных проблем Севера КарНЦ РАН*

Обобщены результаты исследований химического состава донных отложений водоемов бассейна Онежского озера за период с 1964 по 2016 г. Рассмотрены основные факторы, влияющие на формирование донных отложений водоемов восточного склона Балтийского щита. Выявлена ведущая роль локальных ландшафтных условий на процесс седиментогенеза в малых озерах исследуемой территории. Показано разнообразие донных отложений, формирующихся в различных геохимических обстановках.

Исследования донных отложений проводятся в ИВПС КарНЦ РАН на протяжении 50 лет. На территории бассейна Онежского озера изучен химический состав донных отложений 137 озер, расположенных на разных отметках высот (от 183 м до 33 м БС), площадь водосборной территории которых изменяется от 0,1 до 10 236 км<sup>2</sup>, площадь зеркала – от 0,003 км<sup>2</sup> и до 266 км<sup>2</sup> (медиана 5,6 км<sup>2</sup>), объем водной массы – от 1,4·10<sup>-5</sup> до 1,79 км<sup>3</sup> (медиана 0,028 км<sup>3</sup>). На территории водосбора Онежского озера встречаются озера с разным типом озерного накопления (концентраторы минеральных веществ, накопители органического вещества, аккумуляторы наносов). Полигенная природа озерной седиментации, отличия гидрологических и морфометрических характеристик озер, разные площади и состав пород водосборов, а также разный трофический статус водоемов определяют различия в химическом составе осадков. В целом исследованные донные отложения представлены тремя типами. Первый тип – песчано-гравийные донные отложения, широко отлагающиеся в зоне литорали. Второй тип – глинистые грунты. Третий тип – илы, зона их залегания определяется глубиной озера, крутизной склонов и динамикой вод. Средние показатели химического состава донных отложений представлены в табл. 1.

**Таблица 1. Химический состав донных отложений озер бассейна Онежского озера, %**

Тип осадка	C <sub>орг.</sub>	СГК	СФК	P <sub>общ.</sub>	Fe	Mn	N-NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	N <sub>орг.</sub>
Песок	0,03–2,40* 0,98	0,01–1,35 0,36	0,03–0,64 0,29	0,01–0,04 0,03	0,00–6,73 0,50	0,00–0,08 0,02	0,001–0,004 0,002	0,06–0,77 0,22
Глина	0,71–5,58 2,64	0,14–0,66 0,45	0,07–0,79 0,44	0,06–0,12 0,09	0,03–1,68 1,15	0,04–0,45 0,17	0,000–0,030 0,009	0,08–0,97 0,34
Ил	1,30–42,50 15,43	0,04–11,60 1,79	0,00–9,10 1,52	0,03–5,00 0,17	0,17–42,20 4,18	0,00–1,02 0,23	0,003–0,170 0,027	0,01–3,99 1,17

*Примечание.* Над чертой – пределы колебаний, под чертой – среднее значение.

Основным зональным фактором, определяющим процесс формирования донных отложений, является климат. В условиях прохладного климата (переходный от морского к континентальному со среднегодовой температурой воздуха от 1,3 до 2,7 °С), со средним количеством атмосферных осадков (600–650 мм), при длительном летнем солнцестоянии (самый долгий день длится около 20 часов) в озерах исследуемой территории существуют благоприятные условия (небольшая температура воды, достаточная освещенность и прозрачность) для развития фитопланктона, контролирующего процесс накопления органического вещества в донных отложениях. Тем более что небольшие площади водосборов озер и залеженность бассейна ограничивают поступление в водоемы взвешенного вещества терригенного происхождения.

Основным аazonальным фактором, определяющим тип озерного накопления, является геологический. Природно-территориальный комплекс (ПТК) бассейна Онежского озера характеризуется и меридиональной изменчивостью (расположен на стыке двух геологических структур), и вертикальной изменчивостью (три ступени-яруса рельефа). Функционирование современной гидрографической сети территории ПТК во многом определяется рельефом, основные элементы которого были образованы в результате тектонических процессов, происходивших с архея до четвертичного периода. В плейстоцене, в результате неоднократных покровных оледенений, произошло сглаживание первоначальных форм, аккумуляция моренного материала, образование аккумулятивных, эрозивно-ледниковых и водно-ледниковых форм рельефа. В голоцене возобновилось поднятие центральной части щита и дифференцированное движение блоков горных пород. Озера бассейна имеют сложный генезис. Наиболее крупные озерные котловины тектонического происхождения связаны либо с разрывными тектоническими нарушениями разного порядка (простые и сложные грабены, приразломные котловины), либо со складчатыми структурами (котловины, приуроченные к синклиналим и антикли-

нальным складкам). Современные экзогенные озерные котловины (ледниковые, водно-эрозионные, водно-аккумулятивные, карстовые и др.) формировались преимущественно во время прохождения ледника и его дальнейшей деградации [Литинская, 1976].

Основная часть водосбора Онежского озера расположена в пределах Онежской палеопротерозойской структуры, где характерно преобладание горных пород кислого состава с высоким содержанием оксида кремния (II) (до 80–90 %) и низким содержанием фосфора (0,03–0,1 %) (граниты, гранито-гнейсы, гнейсы, кварциты, кварцито-песчаники) [Металлогения Карелии, 1999]. Важным для формирования донных отложений является то, что в условиях подзолообразовательного процесса, распространеного на территории ПТК, из почвенных горизонтов в озерно-речную сеть поступают соединения кремния и железа, гумусовые вещества и ограниченное количество фосфора, обеспечивая тем самым доминирование в водоемах диатомовой флоры, а также лимитирование озерных экосистем по фосфору. Оценка годового поступления взвешенного вещества в донные отложения Онежского озера, выполненная в 2016 г., которая может рассматриваться как интегральная характеристика водосборной территории, показала, что около 73 % от общей массы веществ составляет кремний, 11 % – железо, 8 % – органическое вещество [Белкина, 2016].

С целью оценки влияния особенностей ландшафта на процессы формирования химического состава донных отложений был проведен факторный анализ данных методом главных компонент (табл. 2). Всего было проанализировано 30 показателей химического состава донных осадков. Чтобы не отягощать факторную модель, к наиболее значимым параметрам, влияющим на седиментацию, мы отнесли: ландшафтные характеристики (площадь водной поверхности озера, площадь водосбора озера, высота над уровнем моря, глубина максимальная и глубина средняя), биологические параметры (количественные характеристики органического вещества и биогенных элементов в воде и донных отложениях), характеристики химического состава (минерализация вод и содержание основных элементов в воде и донных отложениях). Перед анализом матрицу значений всех переменных масштабировали по размаху (так как переменные характеризуют совершенно различные свойства объектов (озер)), поэтому масштабы величин сильно различались от столбца к столбцу с точки зрения как их абсолютных значений, так и размахов (стандартных отклонений) и были приведены к нормальному распределению. В результате анализа данных было выделено четыре фактора, дающих практически равные проценты объяснимой дисперсии. Наиболее важными характеристиками ландшафта, влияющими на формирование донных отложений, в равной мере являются: площадь водосборной территории (связана с нако-

плением минеральной составляющей донных отложений), геоморфологические условия, определяющие гидрологический режим и морфометрические характеристики озерных котловин (влияют на продукционные процессы в водоеме и накопление органического вещества), химический состав воды (связывает процесс осадконакопления с химическим составом пород и почв водосборной территории) и присутствие (отсутствие) железа в донных отложениях (является внутренним фактором, контролирующим процессы раннего диагенеза в самом осадке).

**Таблица 2. Матрица факторных весов**

Переменная	Фактор 1	Фактор 2	Фактор 3	Фактор 4
Широта	0,042818	0,084084	0,005757	0,110891
Долгота	0,082509	0,833960	0,153627	0,273609
Отметка высот	0,118168	0,864569	-0,291961	0,030862
Площадь зеркала	-0,340301	0,146926	0,764544	-0,228741
Объем воды	-0,483273	0,028884	0,661336	-0,343060
Период водообмена	0,915351	0,117507	0,117593	0,073656
Площадь водосбора	0,152119	0,174653	0,775194	-0,185342
Глубина максимальная	0,654903	0,168522	-0,384185	0,231213
Глубина минимальная	0,764940	0,327995	-0,174917	0,322509
Si в воде	-0,371981	-0,147702	-0,377344	0,424323
Fe в воде	0,438399	0,714378	0,156360	-0,098124
Минерализация вод	0,093348	0,788921	-0,126170	0,229271
C <sub>орг</sub>	-0,010866	-0,178083	0,863784	-0,048203
ППП	0,016320	-0,204800	0,882083	0,076194
N <sub>общ</sub>	0,027223	-0,079693	0,810697	0,016660
P <sub>общ</sub>	0,150121	0,192020	0,223005	0,764909
Fe	0,277314	0,068004	-0,207021	0,757206
Mn	0,188258	0,357511	-0,325577	0,718909

Равномерное распределение факторных нагрузок определяется разнообразием седиментационных обстановок, связанных с локальными ландшафтными условиями водосборов. Таким образом, сделать однозначный вывод о доминировании определенного типа озерного накопления на территории водосбора Онежского озера на основе имеющихся данных оказалось невозможным. Если учитывать распределение разных по гранулометрическому и химическому составу донных отложений по площади дна в исследованных озерах, то, по мнению автора, можно утверждать о преобладании минерального типа седиментогенеза в озерах бассейна. Кроме минеральных частиц терригенного происхождения (представляющих горные породы водосбора) в водоемах накапливаются минеральные компоненты, образующиеся в процессе седиментогенеза. Для озер восточной окраины Балтийского щита это озерные руды, которые являются

минеральными смесями некристаллического строения [Кулешевич и др., 2010]. Они состоят главным образом из гидроксидов Fe (гетит, лепидокрокит), оксидов марганца, также содержат небольшое количество глинистых минералов, кварца, реже карбонаты. Они образуются за счет осаждения взвешенного и коллоидного вещества, содержащего избыток железа. Выпадению коллоидов в осадок способствуют бактерии. Обычно руды залегают в прибрежной полосе озер шириной до 300 м. Глубина залегания от 1 до 5 м, мощность залежей – от 1 см до 1 м. Типичным примером такого водоема является оз. Шотозеро, расположенное в средней части речного бассейна, через него протекает р. Шуя, на водосборе которой распространены иллювиально-гумусово-железистые подзолы. 43 % площади дна озера занято рудными образованиями в виде корок, конкреций, оолитов, встречаются и «монетные» руды.

Еще одним минеральным ресурсом континентальных водоемов являются диатомиты, накапливающиеся в малых озерах при повышенном содержании в воде кремневой кислоты и минимальном поступлении в озеро минеральных и органических веществ, более чем на 50 % состоящие из кремнистых раковин микроскопических водорослей – диатомей. На территории бассейна Онежского озера диатомиты не столь развиты, как в Северной Карелии и на Кольском полуострове, но, тем не менее, их образование в настоящее время было зафиксировано в озерах на территории Заонежского полуострова (озера Нижнее Мягрозеро и Сяргозеро), в районе оз. Сямозеро, оз. Линдозеро [Демидов, Шелехова, 2006; Шелехова, Субетто, 2016].

Иловые донные отложения аккумуляционных зон 72 озер из 137 исследованных можно охарактеризовать как органические осадки (содержание органического вещества >30 %). Иловые отложения 65 озер можно отнести к минеральным осадкам (зольность >70 %). Несмотря на то что средние показатели химического состава выборки данных илов (потери при прокаливании изменяются от 2 до 90 % при среднем 31 % и медианном значении 29 %, зольность – от 9 до 97 % при среднем 67 % и медианном 69 %) формально соответствуют органическим осадкам, площадь дна, которая занята сапропелями, в большинстве исследованных водоемов составляет менее 50 %. Как правило, накопителями органического вещества на территории бассейна Онежского озера, где дно полностью покрыто илами, являются неглубокие водоемы с малой площадью зеркала и водосбора. Число подобных «ламп» в Карелии огромно. Примерами таких озер являются Голубая ламба (ППП<sub>550</sub> 89 %, зольность 9 %, площадь водосбора 0,25 км<sup>2</sup>, площадь зеркала 0,04 км<sup>2</sup>), ламба Корытово (ППП<sub>550</sub> 86 %, зольность 11 %, площадь водосбора 0,1 км<sup>2</sup>, площадь зеркала 0,003 км<sup>2</sup>). Необходимо подчеркнуть, что трофический статус этих

водоемов разный (Голубая ламба – ацидотрофный, Корытово – эвтрофный) и, соответственно, скорости осадконакопления в донных отложениях различаются более чем на порядок (0,5 и 10 мм в год), но, тем не менее, в обоих водоемах создаются условия, способствующие накоплению органического вещества. В целом содержание органического вещества в илах увеличивается с ростом трофического уровня от олиготрофного к эвтрофному [Белкина, 2011]. В ацидотрофных водоемах, расположенных на водоразделах и обладающих низкой продуктивностью, малая минерализация вод и отсутствие фосфора, по-видимому, лимитирует естественное развитие бентосных сообществ, способных переработать органическую массу растительного опада, поступающего с берегов (для донных отложений Голубой ламбы атомные отношения  $C : N = 25$ ;  $C : P = 1143$ ).

Необходимо отметить, что химический состав донных отложений озер, не испытывающих антропогенного воздействия, мало менялся в течение последних 100 лет, что доказывают вертикальные профили химических характеристик в колонках донных отложений (изменения только в верхнем аэробном слое), а также результаты периодических наблюдений, например, на озерах Заонежского полуострова, исследования на которых проводятся с 1929 г. [Белкина, 2005]. Для озер, на водосборе которых располагаются населенные пункты и сельхозугодия, отмечается более высокая доля терригенной составляющей в составе осадка, а также присутствие токсических веществ. Например, в донных отложениях оз. Суоярви содержание нефтепродуктов в районе города (0,55 %) на два порядка превышает фоновые значения, высокие концентрации тяжелых металлов наблюдаются в водоемах г. Петрозаводска (Четырехверстное, Сулажгорская ламба и т. д.) [Современное состояние..., 1998]. Яркими аккумуляторами наносов являются водоемы, расположенные в пределах селитебных территорий, либо водоемы с высоким коэффициентом водообмена, являющиеся частью озерно-речной системы (оз. Логмозеро).

В заключение необходимо отметить, что разнообразие химического состава донных отложений в водоемах на территории бассейна Онежского озера определяется ландшафтными условиями. В водоемах с минеральным типом озерного накопления встречаются донные отложения разного генезиса: терригенные, хемогенные (озерные руды) и биогенные (диатомиты). Органические осадки накапливаются не только в водоемах высокого трофического статуса, но и в ацидных ламбах. Наибольшей изменчивостью химического состава характеризуются донные отложения озер, на водосборе которых ведется хозяйственная деятельность.

## Литература

Белкина Н. А. Донные отложения Заонежского полуострова // Экологические проблемы освоения месторождения Средняя Падма / Ред. Е. П. Иешко. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2005. С. 65–71.

Белкина Н. А. Накопление фосфора в донных отложениях Онежского озера и внутренняя фосфорная нагрузка // Всерос. конф. по крупным внутренним водоемам (V Ладозский симпозиум): Сб. науч. тр. конф. СПб.: Лема, 2016. С. 81–86.

Демидов И. Н., Шелехова Т. С. Диатомиты Карелии (особенности формирования, распространения, перспективы использования). Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2006. 89 с.

Кулешевич Л. В., Ларькина Н. Ю., Инина И. С. Минералы железа в коллекции музея геологии докембрия: лимонитовые и гематитовые руды Карелии // Геология и полезные ископаемые Карелии. Вып. 13. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2010. С. 131–139.

Литинская К. Д. Режим уровней воды озер и водохранилищ Карелии. Л., 1976. 146 с.

Металлогения Карелии. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 1999. 340 с.

Современное состояние водных объектов Республики Карелия. По результатам мониторинга 1992–1997 гг. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 1998. 188 с.

Шелехова Т. С., Субетто Д. А. Диатомовые водоросли донных отложений озер Заонежья: оценка современного состояния озер, реконструкция изменения уровня Онежского озера // Тр. КарНЦ РАН, сер. Лимнология. 2016. № 5. С. 88–105.

## FORMATION FEATURES OF THE CHEMICAL COMPOSITION OF MODERN SEDIMENTS IN LAKES OF THE ONEGO LAKE CATCHMENT

N. A. Belkina

*Northern Water Problems Institute, KarRC RAS*

The results of studies on the chemical composition of sediments in water bodies of the Lake Onego catchment for the period from 1964 to 2016 are summarized. The main factors affecting the formation of sediments in lakes of the eastern part of the Baltic Shield were considered. The leading role in sedimentation in small lakes of the study area was found to belong to local landscape conditions. The diversity of the chemical composition of sediments formed under different geochemical conditions was demonstrated.

## ХЛОРИДНЫЕ ВОДЫ ОНЕЖСКОЙ СТРУКТУРЫ

Г. С. Бородулина

*Институт водных проблем Севера КарНЦ РАН*

Дана характеристика хлоридных, как правило, натриевых солоноватых подземных вод Онежской структуры. Показано, что происхождение хлоридных изотопически легких подземных вод в протерозойских породах щита, вероятно, связано с

процессом криогенного концентрирования морских вод межледниковья. Изотопически более тяжелые хлоридные воды платформенных отложений, возможно, являются седиментогенными. Феномен «Соляной ямы» в Заонежье – естественного источника солоноватой хлоридно-натриевой воды – объясним обнаруженной в кристаллическом щите галитовой толщей и тектонической подвижностью земной коры.

Подземный сток остается слабоизученным компонентом водного и солевого баланса озер, при исследовании которого необходимо установить, оказывает ли подземный сток влияние на водный и солевой баланс водоемов, в частности, Онежского озера. В свете новых данных о глубинном строении Онежской структуры (ОС) решение этого вопроса становится особенно актуальным.

В статье речь пойдет о хлоридных подземных водах ОС, наиболее часто здесь встречаемых. В неглубоких подземных водах Карелии хлориды, как правило, играют самую незначительную роль в анионном составе. Подземные воды зоны активного водообмена, вскрываемые родниками, колодцами и мелкими скважинами, в среднем содержат 1,6 мг/л хлоридов при средней минерализации 0,13 г/л. Диапазон медианных концентраций хлоридов в водах более глубоких горизонтов составляет от 3,5 мг/л (гидрокарбонатный кальциево-магниевый состав) до 680 мг/л (хлоридный натриевый).

Хлоридными являются воды, в анионном составе которых преобладают ионы хлора. Главным катионом при этом, как правило, является натрий. Абсолютные и относительные концентрации  $\text{Cl}^-$  и  $\text{Na}^+$  в хлоридных водах увеличиваются с ростом минерализации (рис. 1). Практически все известные нам хлоридные воды в пределах карельской части Балтийского кристаллического массива относятся к солоноватым (минерализация от 1 до 10 г/л). Соленые воды (минерализация выше 10 г/л) вскрываются отдельными скважинами в платформенных отложениях верхнего протерозоя и палеозоя в южной части структуры. Достоверных данных о соленых водах в верхних частях (до 200–300 м) щита ОС не получено, но следует учитывать, что открытые стволы разведочно-эксплуатационных скважин пересекают несколько зон обводненной трещиноватости, поэтому при откачке или самоизливе происходит смешение вод различных зон и происхождения, и можно предполагать, что минерализация воды глубоких горизонтов гораздо выше полученной при опробовании.

Хлоридные воды с минерализацией 1,1–4,5 г/л вскрыты скважинами на о. Кижы, на месторождении Средняя Падма, в поселках Великая Губа, Вичка, Челмужи, Кузаранда, Песчаное, в устье р. Суны. К северо-западу от Великой Губы в долине р. Судмы находится единственный известный в Карелии естественный очаг разгрузки хлоридных вод («Соляная яма»)

с минерализацией около 4 г/л. Влияние напорных подземных вод на гидрохимический режим рек этого района проявляется в изменении в меженный период состава воды с гидрокарбонатно-кальциевого на хлоридно-натриевый [Лозовик и др., 2005].

Максимальная минерализация (7,2 г/л) и концентрация хлор-иона (3,8 г/л) в пределах структуры зафиксированы в скважине в районе д. Маткачи, вскрывшей напорную хлоридную воду на глубине 100 м. Тот факт, что соседние скважины вскрыли пресные воды на глубине 30 м, свидетельствует о приуроченности разгрузки соленых вод к локальной тектонической зоне.

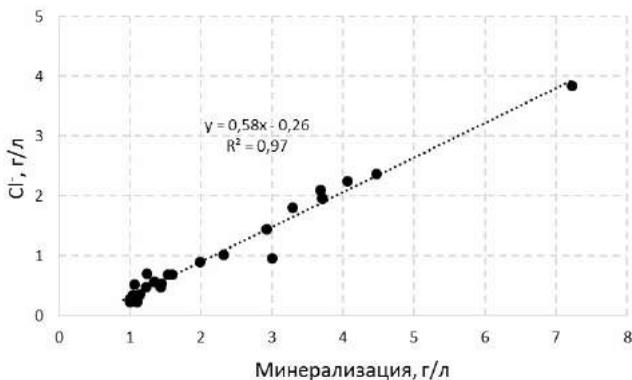


Рис. 1. Зависимость концентрации  $\text{Cl}^-$  от минерализации хлоридных вод

Характерной особенностью хлоридных вод является высокое содержание в них гелия – в среднем на порядок выше, чем в водах других типов. Так, концентрация гелия в воде вышеупомянутой скважины составила  $5,5 \times 10^{-2}$  мл/л (фон  $5 \times 10^{-5}$  мл/л). Как известно, природа гелиевых аномалий – активная разгрузка вод глубокой циркуляции по зонам повышенной проницаемости тектонической природы [Толстихин, 1986; Попов, Егоров, 1990; Богачев, Бородулина, 2008].

Кларковые концентрации хлоридов в кристаллических породах невелики и составляют 50–250 мг/кг. Тем не менее известно о соленых подземных водах и даже рассолах на Балтийском, Канадском щитах [Nurmi et al., 1988; Lampen, 1992]. Существуют гипотезы как автохтонного [Крайнов, Рыженко, 1999], так и аллохтонного происхождения хлоридно-натриевых вод в кристаллических породах щитов. Общим является положение, что разнообразие составов соленых подземных вод щитов – это результат смешения метеорных и глубинных вод в различ-

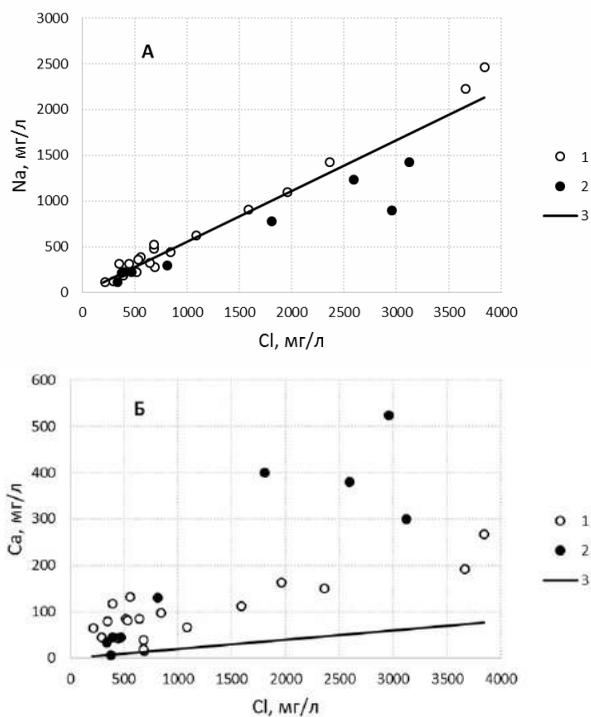
ных пропорциях. Согласно еще одной гипотезе соленые воды образуются путем криогенной концентрации приповерхностных морских и/или осадочных вод в ледниковые времена [Herut et al., 1990; Bein, Arad, 1992; Stotler et al., 2009]. Высокая хлоридность подземных вод кристаллических пород на глубинах 100–200 м трудно объяснима без существования дополнительного источника.

Авторы монографии [Крайнов и др., 2012], обобщая сведения по проблеме формирования хлоридных вод в массивах кристаллических пород до широкого освещения результатов бурения параметрической скважины в пределах ОС, вскрывшей галитовые отложения [Онежская..., 2011], считали, что такое глобальное явление, как соленые воды на шитах, невозможно связать с какими-либо древними и современными морскими бассейнами, и рассматривали альтернативные (автохтонные) процессы. Не исключая возможности протекания автохтонных процессов в глубоких зонах земной коры при определенных соотношениях порода – вода и в условиях высокого парциального давления  $\text{CO}_2$ , происхождение соленых подземных вод в пределах ОС в отдельных случаях можно связывать с фактическим источником хлоридов – древними (ятулий) галитовыми отложениями [Онежская..., 2011], а вероятные пути поступления хлоридов в верхние части геологического разреза объяснимы влиянием современной тектонической подвижности земной коры на формирование проницаемых зон. Возможность поступления глубинных соленых вод в верхние части коры подтверждается существованием источника «Соляная яма», солоноватая вода которого (4 г/л), вероятно, является результатом смешения с пресными приповерхностными водами, а первичная соленость глубинных вод значительно выше.

В настоящее время среди соленых хлоридных вод и рассолов различают два основных генетических типа – инфильтрационные и седиментогенные [Зайцев, 1986], разное происхождение которых отражается в различиях их химического состава. Подземная вода, растворяющая соли, имеет инфильтрационное происхождение, а источником веществ служат минералы галогенных формаций. При небольших скоростях или при отсутствии движения воды возрастает роль диффузионного переноса. Инфильтрационные воды содержат в основном компоненты самих солей и имеют Cl-Na состав, низкие концентрации большинства микроэлементов. Характерные соотношения между компонентами  $\text{Cl}/\text{Br} > 300$ ,  $[\text{Na}]/[\text{Cl}] > 0,86$ .

Седиментогенные воды захороняются вместе с вмещающими осадочными породами и подвергаются геохимической метаморфизации в ходе эволюции геологических структур. Взаимодействие вод с породами приводит к повышению содержания кальция и большинства микроэлементов, отношение  $[\text{Na}]/[\text{Cl}] < 0,86$ . Рассматривая соотношение Cl и  $\text{Na}^+$  в

хлоридных водах кристаллического массива и прилегающих с юга вендских отложений платформенного чехла, можно увидеть некоторые отличия между ними. Воды скважин в нижнепротерозойских породах соответствуют инфильтрогенным водам в отличие от вод платформы, которые с ростом минерализации при переходе от вод котлинского горизонта к подстилающему гдовскому обедняются натрием и значительно обогащаются кальцием и имеют признаки метаморфизованных вод (рис. 2). Как отмечают авторы [Коротков и др., 1978], соленые воды вендско-фанерозойского платформенного чехла по своему химическому составу близки к пластовым водам артезианских бассейнов Восточно-Европейской платформы. Для этих вод характерен Cl-Na-Ca состав, тесная связь Вг и Cl, почти полное отсутствие I.

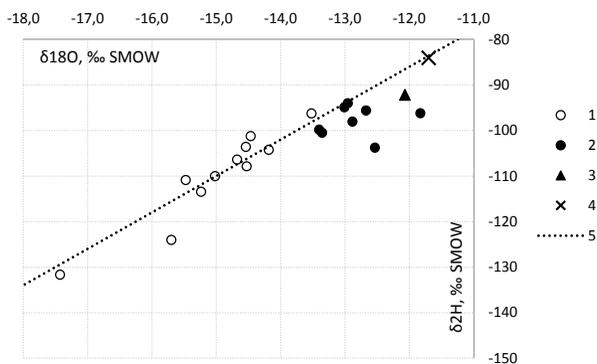


**Рис. 2. Связь  $\text{Na}^+$  (А) и  $\text{Ca}^{2+}$  (Б) с содержанием Cl в хлоридных водах:**

1 – воды кристаллических пород щита, 2 – воды платформенных отложений (венд), 3 – линия разбавления морских вод

Изотопный состав хлоридных вод ОС имеет метеогенное происхождение растворителя ( $H_2O$ ), но при этом значительно обеднен тяжелыми изотопами, «легче» среднемноголетнего состава современных атмосферных осадков ( $\delta^2H = -84 \text{ ‰}$  и  $\delta^{18}O = -11,7 \text{ ‰}$ ) [Бородулина и др., 2016]. Формирование в протерозойских породах щита изотопически легких подземных вод, возможно, связано с валдайским похолоданием, когда происходило криогенное концентрирование морских вод, захороненных в микулинское межледниковье. Слабая трещиноватость пород и небольшие уклоны пьезометрической поверхности указывают на весьма низкие темпы водообмена и сохранение реликтовых вод.

Хлоридные воды платформенной окраины не только по химическому, но и по изотопному составу имеют некоторые отличия от вод кристаллического массива: состав их более тяжелый, причем в отдельных случаях наблюдается кислородный сдвиг (обогащение тяжелым кислородом за счет изотопного обмена с породами) (рис. 3), что подтверждает процесс метаморфизма захороненных морских вод [Ферронский, Поляков, 2009]. Воды «Соляной ямы» характеризуются самым тяжелым изотопным составом среди изученных хлоридных вод.



**Рис. 3. Расположение точек изотопного состава хлоридных вод относительно локальной линии метеорных вод (ЛЛМВ):**

1 – воды кристаллического массива; 2 – воды платформенного чехла; 3 – «Соляная яма»; 4 – среднее атмосферных осадков; 5 – ЛЛМВ

Таким образом, химический и изотопный состав хлоридных вод отражает палеогеографические условия региона и гидродинамические особенности формирования подземных вод, связанные с длительным временем взаимодействия в системе порода – вода и влиянием тектонического

фактора, обуславливающего поступление глубинных вод, которые, возможно, формируются с участием галитовых отложений докембрия или погребенных морских вод, испытавших геохимическую метаморфизацию в ходе геологической эволюции.

### Литература

*Богачев М. А., Бородулина Г. С.* Связь аномалий гелия в подземных водах Карелии с тектоническими зонами // Связь поверхностных структур земной коры с глубинными: Тр. 14-й междунар. конф. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2008. С. 62–63.

*Бородулина Г. С., Токарев И. В., Крайнюкова И. А.* Изотопный состав природных вод бассейна Онежского озера // V Ладужский симпозиум: Тр. всерос. конф. по крупным внутренним водоемам. СПб., 2016. С. 90–95.

*Зайцев И. К.* Гидрогеохимия СССР. Л.: Недра, 1986. 239 с.

*Коротков А. И., Грейсер Е. Л., Саванин В. С. и др.* Соленые воды и рассолы Балтийского щита // ДАН. 1978. Т. 238, № 4. С. 951–954.

*Крайнов С. Р., Рыженко Б. Н.* Происхождение хлоридных подземных вод и рассолов в кристаллических щитах // ДАН. 1999. Т. 365, № 2. С. 245–249.

*Крайнов С. Р., Рыженко Б. Н., Швец В. М.* Геохимия подземных вод. Теоретические, прикладные и экологические аспекты. М.: ЦентрЛитНефтеГаз, 2012. 672 с.

*Лозовик П. А., Басов М. И., Зобков М. Б.* Поверхностные воды Заонежского полуострова, химический состав воды // Экологические проблемы освоения месторождения Средняя Падма. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2005. С. 20–35.

*Онежская палеопротерозойская структура (геология, тектоника, глубинное строение и минерагения). Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2011. 431 с.*

*Попов В. Г., Егоров Н. Н.* Гелиевые исследования в гидрогеологии. М.: Наука, 1990. 168 с.

*Толстухин И. Н.* Изотопная геохимия гелия, аргона и редких газов. Л.: Наука, 1986. 200 с.

*Ферронский В. И., Поляков В. А.* Изотопия гидросферы Земли. М.: Научный мир, 2009. 632 с.

*Bein A., Arad A.* Formation of saline groundwaters in the Baltic region through freezing of seawater during glacial periods // J. Hydrol. 1992. N 140. P. 75–87.

*Bottomley D. J., Katz A., Chan L. H. et al.* The origin and evolution of Canadian Shield brines: evaporation or freezing of seawater? New lithium isotope and geochemical evidence from Slave Craton // Chem. Geol. 1999. N 155. P. 295–320.

*Herut B., Starinsky A., Katz A., Bein A.* The role of seawater freezing in formation of subsurface brines // Geochim. Cosmochim. Acta. 1990. N 54. P. 13–21.

*Lampen P.* Saline groundwater in crystalline bedrock – a literature survey. Helsinki, 1992. 91 p.

*Nurmi P., Kukkonen I., Lahermo P.* Geochemistry and origin of saline groundwaters in the Fennoscandian Shield // Appl. Geochem. 1988. N 3. P. 185–203.

*Stotler R., Frappe S., Ruskeeniemi T. et al.* Hydrogeochemistry of groundwaters in and below the base of thick permafrost at Lupin, Nunavut, Canada // Journal of Hydrology. 2009. N 373. P. 80–95.

## CHLORIDE GROUNDWATER OF THE ONEGA STRUCTURE

G. S. Borodulina

*Northern Water Problems Institute, KarRC RAS*

Chloride-, usually sodium-type, brackish groundwater of the Onega structure was characterized. It is shown that the formation of chloride isotopically light groundwater in Proterozoic rocks of the shield is probably associated with the process of cryogenic concentration of interglacial seawaters. Isotopically heavier chloride waters of platform sediments may be sedimentogenic. The halite layer in the shield and the tectonic mobility of the Earth's crust explain the phenomenon of a natural spring with brackish sodium chloride water found in Zaonezhye.

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ВЕРОЯТНОСТНЫХ ОЦЕНОК АНАЛИТИЧЕСКИХ РЯДОВ ДАННЫХ ДЛЯ СРАВНИТЕЛЬНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ СОДЕРЖАНИЯ МЕТАЛЛОВ В ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЯХ ОЗЕР

В. С. Валиев, Д. В. Иванов, И. И. Зиганшин, Д. Е. Шамаев

*Институт проблем экологии и недропользования  
Академии наук Республики Татарстан*

Анализируется возможность применения метода расчета байесовых вероятностей для оценки содержания металлов в донных отложениях озер Республики Татарстан. Показано, что байесовы вероятности превышения медианных уровней содержания металлов в озерах имеют схожую тенденцию, что позволяет объективно выделять наиболее загрязненные водоемы. Для оценки фактического уровня загрязнения предлагается учитывать долю загрязненных проб по каждому озеру с учетом доли проб этого озера в общей совокупности образцов. Точная характеристика распределения металлов может быть получена на основании сочетанных оценок, включающих, наряду с осредненными и медианными, частотные показатели анализируемых рядов, важнейшими из которых являются вероятности превышения заданных порогов.

Оценка значительных массивов фактических данных мониторинга показателей качества донных отложений (ДО) водных объектов сама по себе является нетривиальной задачей, а при сопоставлении множества показателей в динамике становится проблемой, решение которой невозможно без учета вероятностных характеристик наблюдаемых явлений. Комплексный анализ любых систем, в том числе и ДО, сопряжен с процедурами формализации множества параметров, переводом их многомерных непрерывных рядов данных в плоскость качественных событий, имеющих вероятностную природу.

Вероятность того или иного события характеризуется частотой возникновения этого события, т. е. отношением количества наблюдений события  $n$  к общему количеству наблюдений  $N$  при большом (теоретически бесконечном) общем количестве наблюдений [Губарев, 1992]. При этом для случайных событий при вычислении их вероятности часто используют формулы Байеса [Туакова и др., 2015]: вероятность события, происходящего при конкретных условиях, равна отношению произведения частоты события при данных условиях с частотой относительного числа наблюдений в этих же условиях к сумме всех таких произведений при всех возможных условиях. Подобное представление данных является универсальной характеристикой, позволяющей не только сравнивать и сопоставлять их между собой, но и формировать интегральные оценки, обобщающие весь спектр показателей.

Метод расчета байесовых вероятностей был применен нами при оценке содержания металлов в ДО озер Республики Татарстан (РТ). Для проверки информативности рассчитанных интегральных показателей выборки аналитических параметров формировались на основе данных, полученных для озер разного генезиса, размеров, трофности и антропогенного воздействия. Для решения поставленных задач было обследовано 28 озер фоновых и урбанизированных территорий. Отбор стратифицированных колонок ДО озер мощностью 20–150 см выполнен трубками ГОИН. Керны разделялись на равные слои по 5 см исходя из средней скорости осадконакопления в озерах РТ 5 мм/год [Иванов и др., 2011]. В общей сложности отобрано и проанализировано 552 образца из 28 кернов. Общий пул металлов в составе ДО оценивался экстракцией 5н  $\text{HNO}_3$ . Концентрации металлов в растворе определяли методом пламенной атомно-абсорбционной спектроскопии на приборе Analyst 400.

Статистические методы включали расчет средних значений и медиан рядов данных и корреляционный анализ Пирсона в среде программы «STATISTICA» v.6.0. Для применения теоремы Байеса к поставленной задаче рассчитывались общие медианные уровни каждого металла (весь вариационный ряд, вне зависимости от водоема), формулировались события, вероятности которых затем оценивались.

Пусть событие  $A$  – это превышение содержания металла некоторой пороговой величины, в нашем случае медианы вариационного ряда всех наблюдений, а событие  $B_i$  – такое превышение произошло в водоеме  $i$ . Тогда  $p(B_i) = n_i/N$ , где  $N$  – сумма всех  $n$  ( $N = n_1 + n_2 + \dots + n_i$ ), а  $p(A|B_i) = 1$ .

Вероятность события  $A$  равна сумме всех вероятностей, учитывая как вероятность нашей гипотезы  $p(B)$ , так и условную вероятность события  $A$  при выполнении гипотезы  $p(A|B)$ :

$$P(A) = \sum_{i=1}^n p(B_i)p(A|B_i)$$

Согласно теореме Байеса, если события  $B_i$  ( $i = 1, 2, 3 \dots n$ ) образуют полную группу несовместимых событий:

$$\sum_{i=1}^n p(B_i) = 1$$

и при этом событие  $A$  происходит обязательно и происходит хотя бы в одном из  $B_i$ , то в этом случае вероятность определяется формулой Байеса:

$$P(B_i|A) = \frac{p(B_i)p(A|B_i)}{p(A)}$$

В результате обработки массива аналитических данных были рассчитаны величины средних арифметических концентраций металлов в ДО озер, их медианы, а также вероятности превышения общих медианных уровней металлов для каждого слоя отложений и затем для каждого из кернов.

Анализ полученных результатов указывает на то, что байесовы вероятности превышения медианных уровней содержания валовых форм металлов в одних и тех же озерах имеют схожую тенденцию, что позволяет даже визуально, по диаграммам, объективно выделять наиболее загрязненные водоемы (рис. 1). Важно отметить, что речь идет именно о вероятностях; средние значения концентраций, а также их медианы могут при этом значительно различаться и не отражать общей тенденции. Это обстоятельство иллюстрирует табл. 1. Например, средние и медианные уровни Cd в ДО оз. Юртушинского отмечаются при вероятности 0,019, тогда как в озерах Моховом, Мочальном, Чистом отмечены более высокие средние и медианные уровни этого элемента при меньшей вероятности (0,003–0,016). И, наоборот, высокое значение вероятности превышения общего медианного уровня, отмечаемое по Zn в оз. Кара-Куль, сопровождается достаточно низкими средними и медианными концентрациями металла, которые в Раифском, Моховом, Чистом и Архирейском озерах выше при более низкой вероятностной характеристике.

Вместе с тем между разными показателями ряда отмечены и прямые корреляционные взаимосвязи (табл. 2), причем по ряду металлов они статистически значимы ( $p < 0,05$ ). Взаимосвязи вероятностей с медианными значениями оказались несколько более выраженными, что обусловлено робастностью этого показателя.

Соотношение разных показателей, их соответствие и различие наглядно демонстрирует диаграмма свинца (рис. 2), на которой отмечены средние значения, медианы и вероятности по мере превышения медианных уровней.

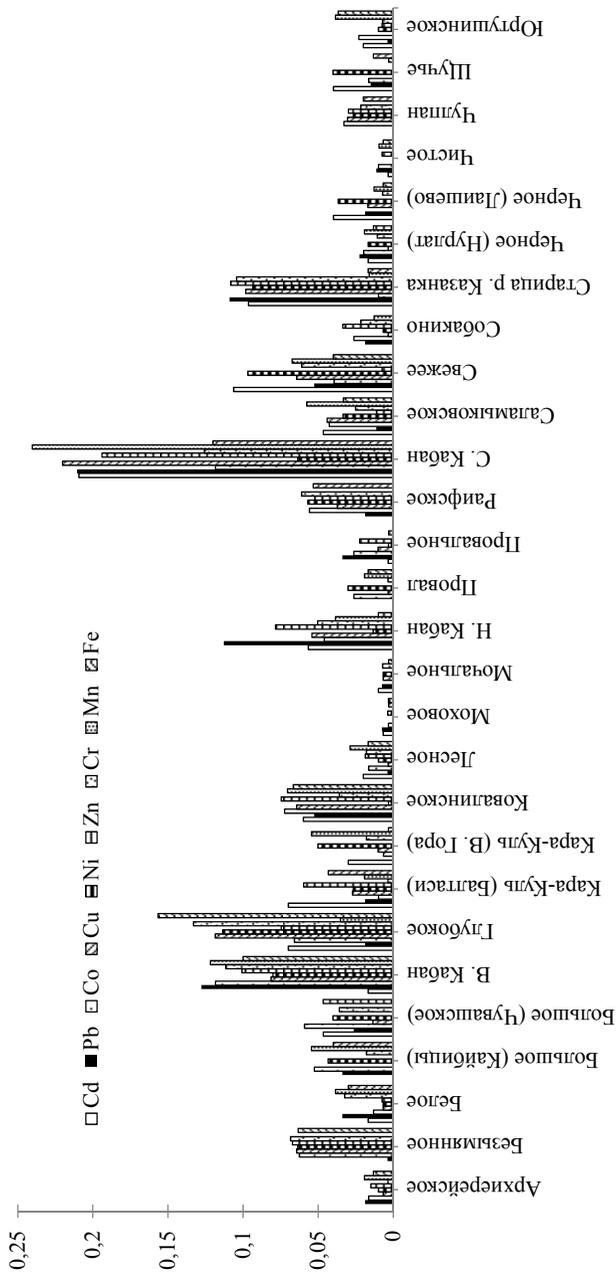


Рис. 1. Байесовы вероятности превышения меданных уровней содержания металлов в ДО озер

**Таблица 1. Сравнительная оценка показателей содержания валовых форм металлов в донных отложениях озер (среднее по керну)**

Озеро	Cd	Pb	Co	Cu	Ni	Zn	Cr	Mn	Fe
Фоновые озера									
Архиерейское	0,28	19,5	11,4	23,2	41,8	76,9	23,7	687	25 524
	0,27	20	9,9	23,5	39,5	71,8	22,5	614	22 296
	0	0,018	0,016	0,007	0,01	0,015	0,004	0,019	0,013
Безымянное	0,16	13,2	17,8	30,3	63,6	86,4	40,2	297	24 540
	0,17	13,1	18	30,2	64,6	87,9	40,4	298	22 502
	0	0,004	0,063	0,064	0,064	0,067	0,068	0	0,063
Белое	0,31	15,5	8,18	21	35,1	53,8	30,5	528	18 736
	0,28	15,1	8,07	26,6	34,6	52,2	30,6	521	18 437
	0,016	0,034	0,013	0,006	0,007	0,007	0,032	0,038	0,03
Кара-Куль (Балтаси)	0,60	10,8	7,37	22,9	36,8	77,7	17,7	357	19 193
	0,57	8,7	7,25	22	34,3	76,8	16,5	298	17 865
	0,069	0,018	0,009	0,027	0,026	0,059	0,0035	0,019	0,043
Ковалинское	0,57	16,5	10	27,9	35,8	85,1	27,3	496	25 046
	0,49	15,5	10,1	29,4	36,2	86,4	25,3	509	26 135
	0,059	0,053	0,072	0,064	0,003	0,075	0,035	0,071	0,066
Лесное	0,36	12,5	11,2	20,2	36	67,9	27,4	449	18 120
	0,35	12,2	8,3	20	33,8	67,7	27,9	441	17 619
	0,02	0,003	0,016	0,003	0,01	0,018	0,018	0,029	0,017
Моховое	0,47	23	9,6	13,1	26,6	78	22,9	459,5	24 111
	0,47	23	9,6	13,1	26,6	78	22,9	459,5	24 111
	0,006	0,007	0,003	0	0	0,004	0	0,003	0,003
Мочальное	0,57	14,5	6	23,8	38,8	53,5	25,9	359	15 535
	0,57	15,7	5,5	25,2	40,9	50,4	28,7	374	16 315
	0,009	0,007	0	0,006	0,006	0	0,007	0,003	0
Провал	0,18	9,82	9,1	20,1	44	34,8	21,3	474	17 868
	0,18	9,92	9,4	20,9	45,6	35,6	20,2	378	17 723
	0	0	0,026	0,003	0,03	0	0,004	0,019	0,017
Провальное	0,23	24,2	15,8	24,8	28,2	109,5	17,7	256	11 533
	0,16	19,2	17,8	23,5	29	75,5	20,5	249	10 487
	0,003	0,034	0,026	0,01	0,003	0,022	0	0,003	0
Раифское	0,17	12,4	15,2	26,4	52,2	87,7	38	327	26 990
	0,19	12,2	15,5	25,9	52,8	86,2	36,9	327	21 015
	0	0,018	0,055	0,037	0,056	0,052	0,061	0	0,053
Саламыков- ское	0,47	12,6	8,6	24,5	39,1	53,5	23,7	541	17 841
	0,45	11,2	8,6	24,8	36,5	50,6	25	507	17 250
	0,046	0,011	0,043	0,044	0,033	0,011	0,025	0,058	0,033
Свежее	0,42	12,9	7,2	23,5	41,3	49,9	26,9	426	17 079
	0,42	14,1	7,3	23,3	40,5	52,7	27,3	393	16 773
	0,106	0,053	0,039	0,064	0,096	0,007	0,06	0,067	0,04
Собакино	0,22	15,9	14,6	20,3	35,4	96,1	29,1	375	13 344
	0,22	15,9	15	19,8	36,5	83,7	29	362	13 312
	0	0,019	0,026	0,003	0,007	0,033	0,022	0,013	0
Черное (Нурлат)	0,35	14	15,5	18	47,2	41,9	24,8	1205	17 545
	0,32	16,6	10,3	17,6	42,8	42,8	23,6	433	14 793
	0,016	0,022	0,019	0,003	0,016	0	0,011	0,019	0,013

Окончание табл. 1

Озеро	Cd	Pb	Co	Cu	Ni	Zn	Cr	Mn	Fe
Чистое	0,33	20,4	9,9	17,9	32,4	71,3	18,9	480	25 859
	0,32	20,2	8,6	18,2	31,6	69,9	23,1	499	18 235
	0,003	0,011	0,009	0	0	0,007	0	0,009	0,006
Чулпан	0,15	12,9	16,5	25,7	48,2	74,8	31,2	321	19 557
	0,16	13,6	17,3	25,7	48,4	79,6	31,1	327	22 837
	0	0	0,032	0,031	0,026	0,029	0,022	0	0,02
Щучье	0,39	13,1	8,2	21,7	46,3	44,3	19,3	283	15 747
	0,36	13,7	7,6	21,9	47,1	42,1	18,4	284	14 722
	0,039	0,015	0,016	0	0,04	0	0	0,003	0,013
Юргушин-ское	0,31	9,55	7,5	19,5	30,9	62,8	16,2	634	28 012
	0,31	9,22	8,79	19,7	30,7	59,9	15,4	621	26 074
	0,019	0,004	0,023	0	0,01	0,007	0,007	0,038	0,036
Озера урбанизированных территорий									
Старица р. Казанки	50,2	126,3	5,37	776,5	322,2	596,9	1956	272	13 370
	41,4	123,8	5,29	586,9	327,3	616	2039	286	13 458
	0,096	0,109	0,009	0,098	0,094	0,108	0,104	0,016	0,017
Верхний Кабан	0,14	20,2	10,7	23,7	36,5	88,7	33,1	750	21 798
	0,12	21,7	11,9	26,2	41,9	82,4	36,2	731	24 414
	0,016	0,127	0,118	0,081	0,08	0,1	0,111	0,121	0,1
Нижний Кабан	0,73	29,4	8,4	27	22,1	106,3	29,7	417	10 750
	0,36	30,5	8	24,2	17,9	97,3	26,1	330	10 232
	0,056	0,112	0,046	0,054	0,013	0,078	0,05	0,038	0,01
Средний Кабан	0,93	19,6	6,8	40,8	30,1	88	24,8	660	16 482
	0,6	18,3	6,8	35,1	30,8	77,3	21,4	674	14 988
	0,21	0,211	0,118	0,22	0,063	0,194	0,125	0,24	0,12
Глубокое	0,36	10,2	7,5	26,3	43	61,9	39,7	289	23 856
	0,3	10,2	7,4	26,8	45,3	58,1	37,4	308	25 371
	0,07	0,019	0,066	0,119	0,114	0,075	0,133	0,035	0,157

Примечание. Среднее арифметическое, мг/кг; медиана, мг/кг; вероятность.

Таблица 2. Коэффициенты корреляции между средними значениями, медианами и вероятностями превышения общего медианного уровня

	Cd	Pb	Co	Cu	Ni	Zn	Cr	Mn	Fe
Медианы	<b>0,27</b>	<b>0,41</b>	0,28	0,28	<b>0,43</b>	<b>0,40</b>	0,35	<b>0,52</b>	<b>0,43</b>
Средние значения	<b>0,28</b>	0,41	0,18	0,28	<b>0,42</b>	0,42	0,35	<b>0,34</b>	<b>0,32</b>

Примечание. Значимы при  $p < 0,05$ .

В озерах с более высокой долей образцов ДО, в которых превышен общий медианный уровень содержания Pb, далеко не всегда отмечается высокий уровень средних и даже медианных значений. Соответственно, для оценки реального уровня загрязнения необходимо учитывать и долю «загрязненных» проб по каждому озеру, но с учетом доли проб этого озера в общей совокупности образцов.

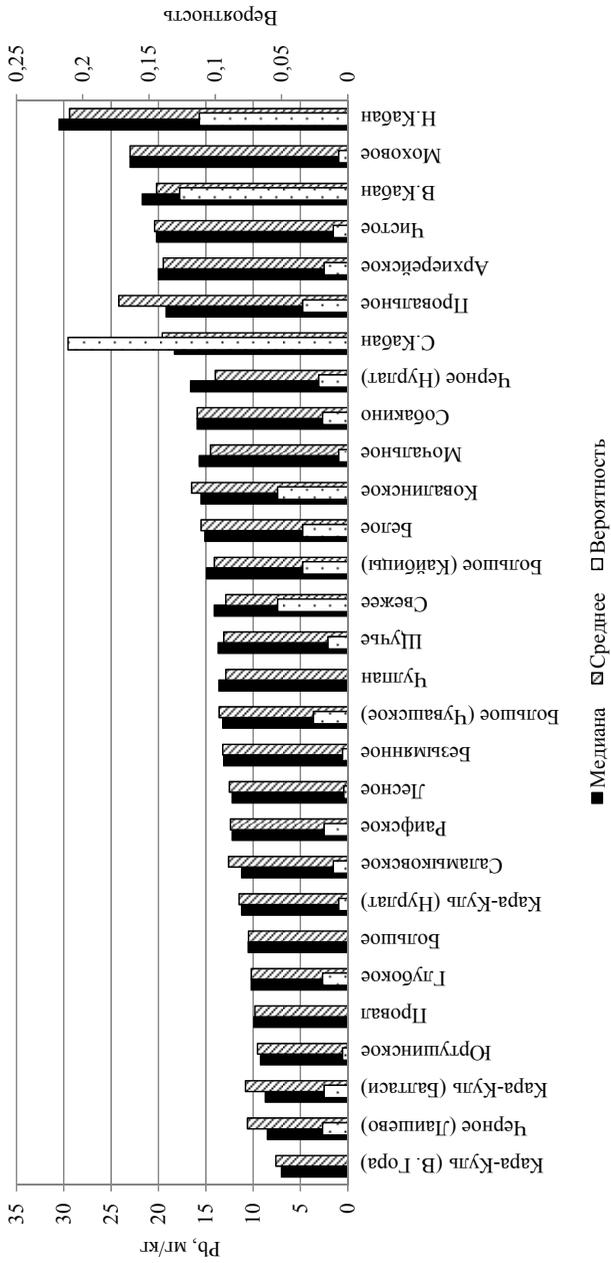


Рис. 2. Соотношение средних значений, медиан и вероятностей высокого содержания Рb в ДО озерах

Полученные результаты свидетельствуют о том, что абсолютные значения концентраций, даже представленные в виде медианных уровней соответствующих рядов, необходимо рассматривать в контексте их частотных характеристик.

При мониторинге ситуации и сравнительных оценках абсолютное содержание того или иного металла в донных отложениях, а также средние и медианы его рядов далеко не всегда указывают на общую тенденцию. Более точную характеристику распределения металлов можно получить лишь на основании сочетанных оценок, включающих, наряду с осредненными и медианными, также и частотные показатели анализируемых рядов, важнейшими из которых являются вероятности превышения заданных порогов.

Представленный в работе алгоритм можно использовать при сравнительных оценках разных объектов, сред, для мониторинга ситуации в динамике, а также при решении задач типизации и группирования объектов по какому-либо признаку.

### **Литература**

*Губарев В. В.* Вероятностные модели: Справочник. Новосибирск: НЭТИ, 1992. Ч. 1. 198 с.

*Иванов Д. В., Зиганшин И. И., Осмелкин Е. В.* Оценка скорости осадко-накопления в озерах Казани и Приказанья // Георесурсы. 2011. № 2 (38). С. 46–48.

*Тунакова Ю. А., Файзуллин Р. И., Валиев В. С.* Расчет вероятности поступления металлов в организм с потребляемой питьевой водой // Гигиена и санитария. 2015. Т. 94, № 5. С. 62–65.

### **APPLICATION OF PROBABILISTIC ESTIMATES OF ANALYTICAL DATA SERIES FOR COMPARATIVE DESCRIPTION OF METAL CONTENTS IN LAKE SEDIMENTS**

**V. S. Valiev, D. V. Ivanov, I. I. Ziganshin, D. E. Shamaev**

*Institute for Problems of Ecology and Mineral Wealth Use on Tatarstan Academy of Sciences*

The feasibility of calculating Bayesian probabilities in estimating the level of lake sediments contamination with metals in the Republic of Tatarstan is considered. It is shown that the Bayesian probabilities of exceeding the median metal content levels follow a similar tendency in different lakes, which makes it possible to objectively estimate the most polluted lakes. A more accurate assessment of metals' distribution can be obtained only through combined estimates, including the frequency indices of the series being analyzed, the most important of which are the probabilities of exceeding the given thresholds.

## СОДЕРЖАНИЕ МЕТАНА В ОЗЕРАХ КЕРЖЕНСКОГО ЗАПОВЕДНИКА

М. Г. Гречушникова<sup>1,2</sup>, Л. Е. Ефимова<sup>1</sup>, Д. В. Ломова<sup>2</sup>,  
А. С. Саввичев<sup>3</sup>

<sup>1</sup>*Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова*

<sup>2</sup>*Институт водных проблем РАН*

<sup>3</sup>*Институт микробиологии им. С. Н. Виноградского ФИЦ Биотехнологии  
РАН*

В работе приведены сведения о содержании метана в поверхностном и придонном слоях некоторых разнотипных озер на территории Керженского заповедника. Показан масштаб и характер различий его концентрации, связанный с морфометрическими особенностями озер, их первичной продукцией и особенностями притока воды.

Коллектив географического факультета МГУ и ИВП РАН изучает разнотипные озера Керженского заповедника на протяжении нескольких лет. Водные объекты на территории заповедника могут характеризоваться условно-фоновым гидроэкологическим состоянием, поэтому изучение внутриводоемных процессов актуально для сравнения с экосистемами, испытывающими антропогенное влияние.

Метан входит в число важнейших парниковых газов по вкладу в радиационный форсинг, поэтому исследования образования метана и масштабов его эмиссии в различных природно-географических условиях представляют практический интерес. Этот вопрос освещен во многих трудах отечественных и зарубежных коллег, например [Дзюбан, 2010; Федоров и др., 2005; Tremblay et al., 2005], но вопрос параметризации эмиссии по-прежнему остается актуальным из-за уникальных особенностей каждой озерной котловины. При параметризации эмиссии и изучении внутригодового изменения содержания метана важно учитывать гидроэкологическое состояние водоема, его проточность, глубину, определяющие стратификацию и характер донных отложений.

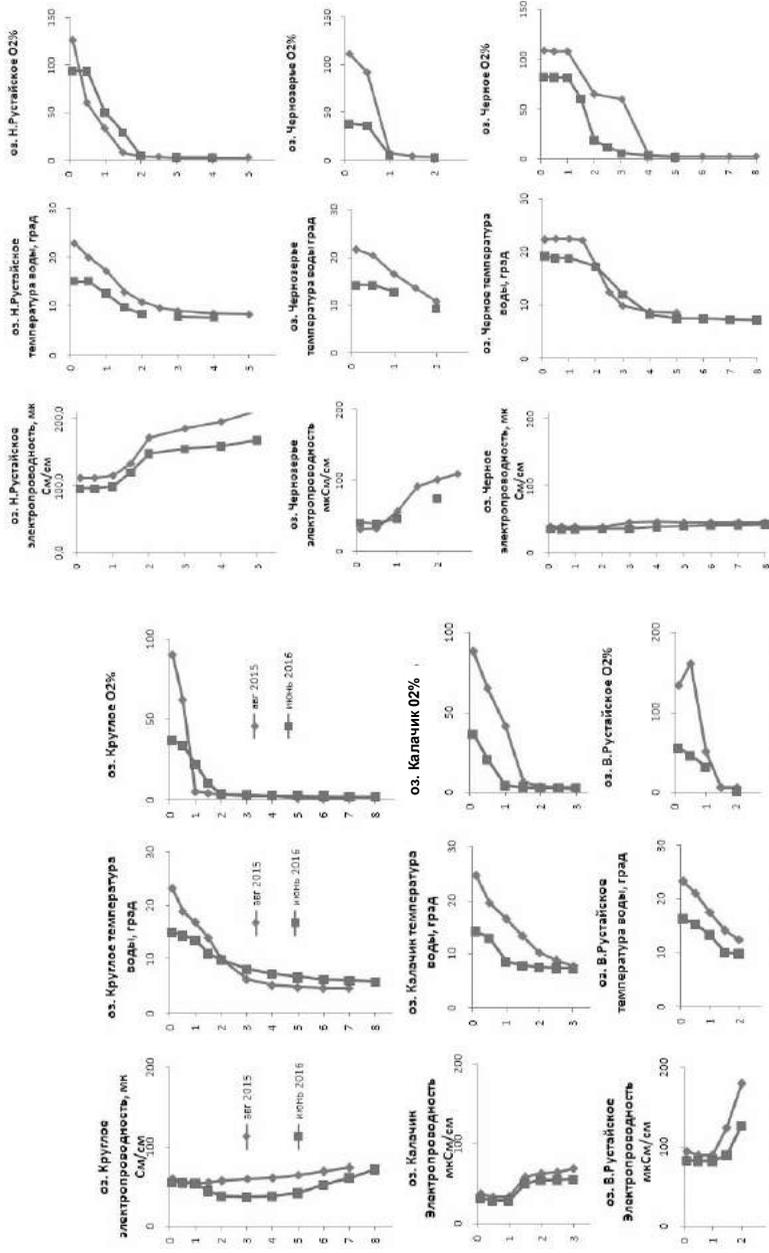
Отбор проб в исследуемых озерах производился по время гидролого-гидрохимических съемок озер в первой декаде августа 2015 г. и в первой декаде июня 2016 г. Первая съемка проводилась в антициклоническую погоду, к этому времени поверхностные слои воды озер прогрелись до 22–24 °С. Наибольшая разность температуры поверхностного и придонного горизонта была характерна для оз. Круглого (18,6 °С), наименьшая – у оз. В. Рустайское (11 °С). В июне съемка проходила в циклоническую погоду в дождь, температура поверхности озер составляла 14,3–19,2 °С.

Разность поверхностной и придонной температуры в мелководных пойменных озерах (глубиной около 3 м) не превышала 8 °С, в глубоководных (6–8 м) достигала 12 °С.

Результаты съемок показали существенные различия в гидрологическом режиме озер, который связан с типом питания, глубиной, залесенностью и заболоченностью берегов. Общей чертой (несмотря на различную глубину) для озер является выраженная летняя стратификация (придонные слои воды плохо прогреваются, особенно в относительно глубоких озерах), которая приводит к формированию аноксидной зоны, способствующей накоплению метана.

Озеро Черное расположено на водоразделе, питается талыми водами, атмосферными осадками и водами р. Черной, имеет крайне низкую минерализацию (до 50 мкСм/см) без выраженного увеличения ко дну. При благоприятных условиях содержание  $O_2$  может превышать 100 % насыщения. В противоположность оз. Черному озера В. Рустайское и Н. Рустайское имеют хорошую гидравлическую связь с рекой. При пополнении речными водами в половодье и подземными водами в межень озера характеризуются наиболее высокой минерализацией воды среди исследованной группы водоемов (80–100 мкСм/см у поверхности и 130–210 мкСм/см у дна). Озера находятся на открытой пойме, в антициклоническую погоду (август 2015 г.) содержание  $O_2$  у поверхности достигает 120–130 %, в июне 2016 г. оно не превышало 55 и 94 %, соответственно.

Промежуточное положение имеют озера Круглое и Калачик: электропроводность воды в них увеличивается ко дну на 10–20 мкСм/см, но не превышает 80 мкСм/см, что свидетельствует о преобладании питания атмосферными осадками и диффузионным стоком с окружающей водосборной территории. Отметим низкую интенсивность продукционных процессов в этих озерах, что выражается в недосыщении воды кислородом даже в антициклоническую погоду (до 90 %). Во многом это связано с расположением озер в лесу и их значительным затенением. В июне 2016 г. насыщение кислородом поверхностного слоя воды в оз. Калачик не превышало 40 %, в нем наблюдалось наиболее выраженное расслоение водной толщи по сравнению с другими мелководными озерами (В. Рустайское и Чернозерье). Озеро Чернозерье расположено в притеррасной части поймы Керженца и имеет очень непродолжительную гидравлическую связь с рекой. Как и оз. Черное, имеет заболоченный водосбор. В отношении продукционных процессов озеро ближе к предыдущей группе водных объектов: в антициклоническую погоду насыщение поверхностного слоя воды кислородом достигло 111 %, а в июне 2016 г. не превысило 40 % (рис.).



Вертикальное распределение гидрологических характеристик в исследуемых озерах 8–9 августа 2015 г. и 9 июня 2016 г.

Содержание метана в придонном слое озер по результатам отбора проб в первой декаде августа 2015 г. изменялось от 5 до 1230 мкл/л (табл. 1). Наименьшее содержание  $\text{CH}_4$  характерно для перешейка оз. Черного, что связано с небольшой глубиной (2 м) и активным перемешиванием воды. При этом в мелководных озерах В. Рустайское и Чернозерье в придонном слое содержалось порядка 1000 мкл/л  $\text{CH}_4$ . Для первого озера это может быть связано с поступлением подземных вод, о чем свидетельствуют повышенные значения электропроводности в придонных горизонтах, для оз. Чернозерье – с заболачиванием при отсутствии перемешивания. В оз. Калачик содержание метана в придонном слое было почти вполонину меньше, вероятно, из-за особенностей грунта (песчанистый ил) при неактивном образовании автохтонной органики, поскольку оно расположено на густо залесенной территории в пределах поймы. Несколько больше содержание метана в оз. Круглом, но, несмотря на черный ил и аноксидные условия у дна, при низкой температуре процесс метаногенеза был менее активен, чем в других пойменных озерах. В озерах Круглое и Калачик наблюдалось самое низкое содержание  $\text{O}_2$  в поверхностном слое, что говорит о малой активности продукционных процессов и пополнении верхнего слоя донных отложений разлагающейся органикой. Относительно большое содержание метана (950 мкл/л) было характерно для глубокого плеса оз. Черного, расположенного на заболоченной водораздельной территории.

**Таблица 1. Некоторые характеристики исследуемых озер в первой декаде августа 2015 г.**

Озеро	H, м	SD, м	T <sub>дно</sub> , °C	O <sub>2</sub> пов., мг/л	CH <sub>4</sub> пов., мкл/л	CH <sub>4</sub> дно., мкл/л
Черное	8	0,6	8,3	9,5	5	950
Черное (перешеек)	2,5	0,6	19,6	9,9	5	5,36
Н. Рустайское	5,8	1,6	8	10,8	5	1230
Круглое	7	0,6	4,6	7,1	13	790
В. Рустайское	2	0,6	12,4	11,3	26	1010
Чернозерье	2,5	0,4	9,1	9,8	34	1061
Калачик	3	1,2	7,7	7,4	18	435

Наибольшее содержание метана в поверхностном слое характерно для мелководных озер (Чернозерье и В. Рустайское), а также для озер с наименьшим содержанием кислорода в поверхностном горизонте из-за неактивного развития водорослей (Круглое и Калачик).

По результатам съемки в июне 2016 г. наблюдается принципиально иное распределение метана в толще озер. В первую очередь обращает внимание существенно большее содержание метана в придонном горизонте в четырех из пяти исследованных озер, несмотря на начало

периода прямой стратификации (оз. Черное не исследовалось). Наибольшее содержание метана выявлено в оз. Чернозерье, также значительные концентрации отмечены в придонных слоях озер Круглое и Калачик. Причем в мелководных озерах Чернозерье и Калачик в поверхностных пробах содержание метана составило 209 и 338 мкл/л при содержании  $O_2$  не более 4 мг/л, а в оз. Круглое – 15 мкл/л при содержании  $O_2$  8,3 мкг/л (табл. 2). При этом низкая продуктивность не лимитирована содержанием биогенных веществ, во всех поверхностных пробах концентрация минерального фосфора превышает 10 мкг/л. Вероятно, низкое содержание кислорода в этих мелководных озерах связано, помимо малого уровня продуктивности, с окислением избытка метана и органических веществ, поступающих с водосбора. В качестве причины большого содержания метана в придонных горизонтах исследованных озер можно выдвинуть версию о незначительном вертикальном перемешивании воды при пополнении озер талыми водами и отсутствии ветрового перемешивания, которое могло бы способствовать обмену между слоями в период с неустойчивым плотностным расслоением. Можно также предположить, что поступление свежего детрита, образовавшегося после отмирания весеннего фитопланктона, могло способствовать активному метаногенезу в анакисидных условиях, сформировавшихся практически сразу при установлении прямой стратификации. Жаркая погода весной 2016 г. (по данным сайта [tr5.ru](http://tr5.ru) на метеостанции Нижний Новгород наблюдались два периода жаркой погоды с максимумами температуры воздуха 24 °С 11 мая и 27,2 °С 26 мая) способствовала раннему установлению устойчивой прямой стратификации, что привело к формированию анакисидных условий в первой декаде июня.

**Таблица 2. Некоторые характеристики исследуемых озер в первой декаде июня 2016 г.**

Озеро	H, м	SD, м	T <sub>дно</sub> , °С	O <sub>2</sub> пов, мг/л	CH <sub>4</sub> пов, мкл/л	CH <sub>4</sub> дно, мкл/л
Н. Рустайское	5,8	0,75	7,7	9,4	8,9	105
Круглое	7	0,4	5,8	8,3	15	5653
В. Рустайское	2	0,65	9,8	5,4	64	1451
Чернозерье	2,5	0,4	7,6	3,9	209	7909
Калачик	3	0,6	6,9	3,7	338	6740

Самое низкое содержание метана в июне 2016 г. выявлено в придонном горизонте оз. Н. Рустайского (105 мкл/л). Видимо, после смены воды в озере, которая ежегодно происходит в половодье (об этом свидетельствует отсутствие наилка на песчаном грунте), и формирования прямой стратификации с образованием анакисидных условий метан

накапливался в придонном горизонте медленно. К концу лета содержание метана в придонном слое этого озера может возрасти при разложении органики, поступающей в придонный слой в течение лета. Более высокое содержание метана в придонном горизонте оз. В. Рустайского в июне 2016 г. обусловлено менее продолжительной гидравлической связью с Керженцем, накоплением ила на дне. Летом озеро зарастает макрофитами, и с началом анаэробных условий метаногенез в нем происходит более активно.

Полученные данные свидетельствуют о том, что, несмотря на сравнительно небольшую глубину, перемешивание озер после периода зимней стратификации может быть неполным, а быстрое нагревание поверхности воды усиливает неоднородность и способствует скорейшему образованию анаэробных условий в придонном слое. В течение лета постепенное нагревание придонных слоев уменьшает устойчивость водного столба, что делает возможным более глубокое перемешивание и сокращает содержание метана у дна.

Полученные данные иллюстрируют значительную изменчивость внутриводоемных процессов (в том числе газового режима) в разнотипных озерах в пределах небольшой территории. Периодические экспедиционные наблюдения явно недостаточны для оценки характерных величин содержания и эмиссии метана с поверхности озер. Ввиду большого влияния на внутриводоемные процессы условий на водосборе и погодных условий перспективным методом изучения динамики характеристик водных масс может быть математическое моделирование с учетом особенностей грунта, длины разгона ветра и притока с водосбора.

Полевые работы выполнены при поддержке проекта РФФИ № 14-17-00155, лабораторные работы и обобщение материалов выполнены при поддержке проекта РГО\_а 17-05-41095.

### Литература

*Дзюбан А. Н.* Деструкция органического вещества и цикл метана в донных отложениях внутренних водоемов. Ярославль: Принтхаус, 2010. 174 с.

*Ефимова Л. Е., Терская Е. В., Повалишикова Е. С. и др.* Сезонные изменения гидрологических и гидрохимических показателей в озерах Керженского заповедника по результатам исследований в 2012–2013 гг. // Тр. ГПБЗ Керженский. Т. 6. Н. Новгород, 2014. С. 65–80.

*Ефимова Л. Е., Кораблева О. В., Терская Е. В.* Гидролого-гидрохимические особенности пойменных озер реки Керженец (Керженский заповедник, Нижегородское Заволжье) // Материалы лекций 2-й всерос. школы-конференции «Экосистемы малых рек: биоразнообразие, экология, охрана». Т. 2. Борок: Изд-во ИББВ им. И. Д. Папанина, 2014. С. 141–144.

Федоров Ю. А., Тамбиева Н. С., Гарькуша Д. Н., Хорошевская В. О. Метан в водных экосистемах. Ростов-н/Д; М.: Ростиздат, 2005. 329 с.

Tremblay A., Varfalvy L., Roehm C., Garneau M. (eds.). Greenhouse Gas Emissions: Fluxes and Processes, Hydroelectric Reservoirs and Natural Environments // Environmental Science Series. New York: Springer, 2005. 732 p.

## METHANE CONCENTRATIONS IN LAKES OF KERZHENSKY BIOSPHERE RESERVE

M. G. Grechushnikova<sup>1,2</sup>, L. E. Efimova<sup>1</sup>, D. V. Lomova<sup>2</sup>, A. S. Savvichev<sup>3</sup>

<sup>1</sup>*Lomonosov Moscow State University*

<sup>2</sup>*Institute of Water Problems of RAS*

<sup>3</sup>*Institute of Microbiology, Federal Research Centre "Fundamentals of Biotechnology", RAS*

The results on methane concentrations in near-surface and near-bottom layers of some lakes of different origin in Kerzhensky Biosphere Reserve are reported. The concentrations depended on morphometric parameters of the lakes, primary production and inflow type.

## МЕЖГОДОВАЯ И СЕЗОННАЯ ДИНАМИКА ОСНОВНЫХ ГИДРОХИМИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ В УСТЬЕ РЕКИ ВУОКСЫ

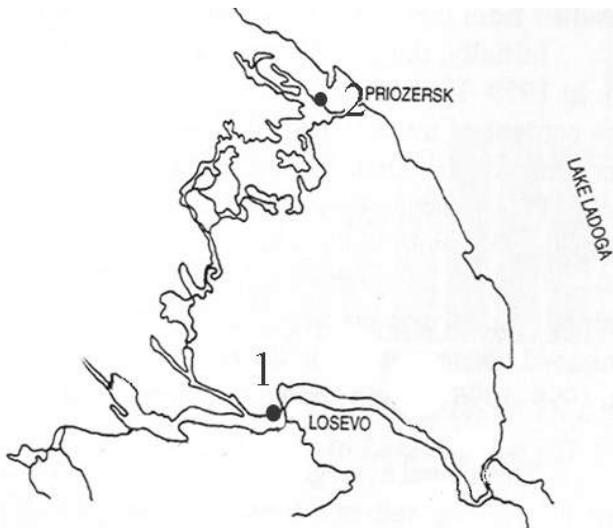
М. А. Гусева, Т. Н. Петрова

*Институт озераведения РАН*

По данным натурных исследований (2001–2016 гг.) проанализирована сезонная и межгодовая изменчивость гидрохимических показателей на двух участках озерно-речной системы Вуоксы, показана динамика основных показателей в условиях уменьшения антропогенной нагрузки.

Река Вуокса – второй по величине приток Ладожского озера, на долю которого приходится 27 % поступления речных вод в озеро. Река Вуокса (южный рукав) в Приозерском районе состоит из озера Вуокса (южное) и искусственного русла реки Бурной. Река Вуокса (северный рукав) начинается от оз. Вуокса в 47 км от устья южного рукава и впадает двумя рукавами, основным из которых является правый, в Ладожское озеро у г. Приозерска. Водный сток южного рукава составляет около 90 % всего стока Вуоксы [Оценка..., 2006].

На рис. 1 показаны две станции пробоотбора на р. Вуоксе, по которым сравнивались гидрохимические показатели, начиная с 2001 г. До этого был подробно исследован южный рукав Вуоксы: комплексные исследования проводились Институтом озераведения с 1989 г. и были обобщены в 2004 г. [Состояние..., 2004].



**Рис. 1. Станции отбора проб на р. Вуоксе:**

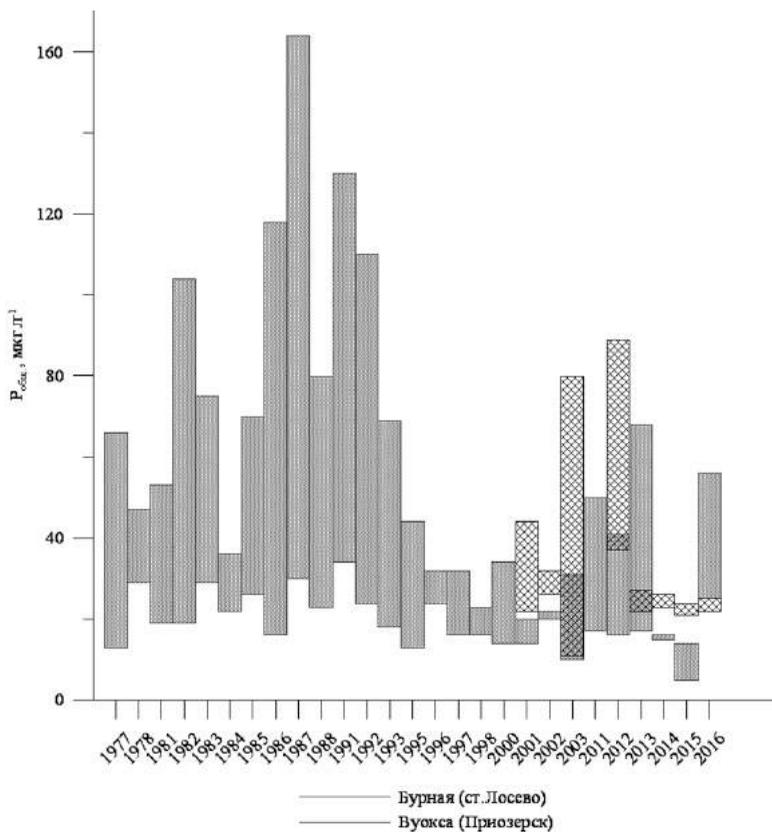
1 – ст. Loseво (пороги Loseво выше оз. Суходольского), 2 – ст. Вуокса (северный рукав Вуоксы у крепости Корела, г. Приозерск)

Ежегодно на этих двух станциях за период открытой воды проводились три сезонных отбора проб, при этом контролировались основные гидрохимические показатели: рН, удельная электропроводность, общая минерализация и ионный состав, ХПК, содержание общего и неорганического фосфора, содержание общего и неорганического азота, цветность, содержание металлов, нефтепродуктов и фенолов.

На рис. 2 показаны диапазоны изменения содержания общего фосфора в р. Вуоксе с 1977 по 2016 г. Максимальные значения общего фосфора для р. Бурной приходятся на 1985–1992 гг., с 1992 г. содержание общего фосфора начинает стремительно снижаться, так как снижается сброс сточных вод предприятий целлюлозно-бумажной (г. Светогорск, г. Каменногорск) и деревообрабатывающей промышленности (г. Приозерск), завода искусственного волокна (г. Лесогорск). Одним из основных источников антропогенного воздействия остаются хозяйственно-бытовые сточные воды городов и населенных пунктов и поверхностный смыв с сельскохозяйственных территорий.

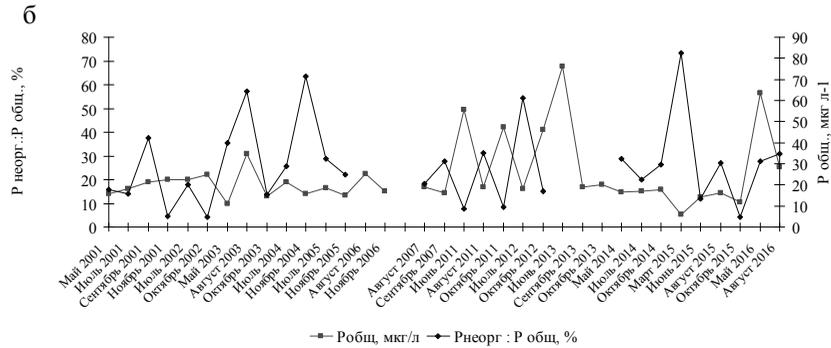
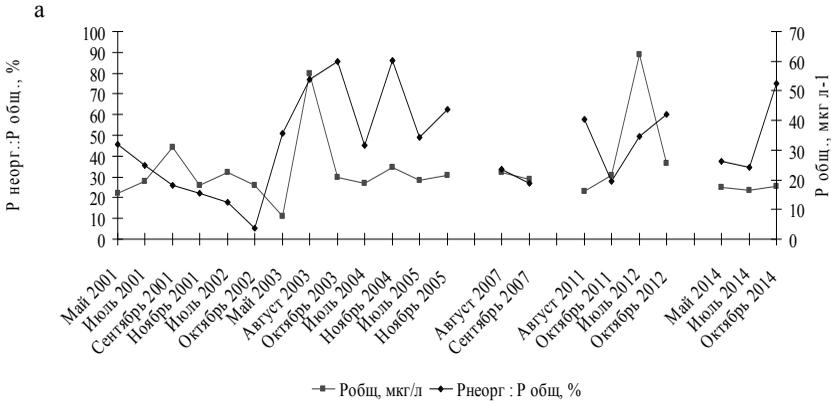
Преобладающей формой фосфора в период наблюдений 1997–2003 гг. являлась его органическая составляющая – 60–80 % от содержания общего фосфора [Состояние..., 2004]. В последующий период, с 2003 по 2016 г., доля органического фосфора составляла в среднем 68 % и

для станции Вуокса, и для станции Лосево с достаточно большим диапазоном колебаний (17–95 %) без выраженных сезонных закономерностей (рис. 3).

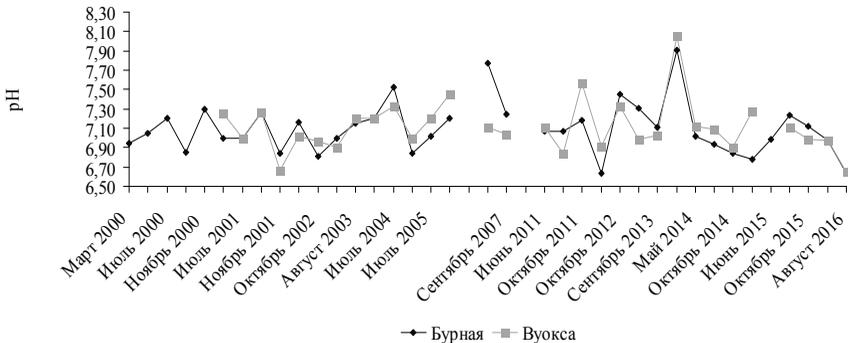


**Рис. 2.** Годовые диапазоны изменения концентрации общего фосфора на станциях Бурная (1977–2016 гг.) и Вуокса (2001–2016 гг.)

Водородный показатель в период 2000–2016 гг. варьирует в широких пределах (6,6–8,1) и, как видно на рис. 4, изменяется на двух станциях наблюдения достаточно синхронно, а аномальные отклонения могут свидетельствовать о локальном загрязнении. Так, например, пониженный показатель рН на станции Бурная в июле 2016 г. сопровождался нехарактерным повышением содержания органического вещества, взвеси, марганца, алюминия и свинца.



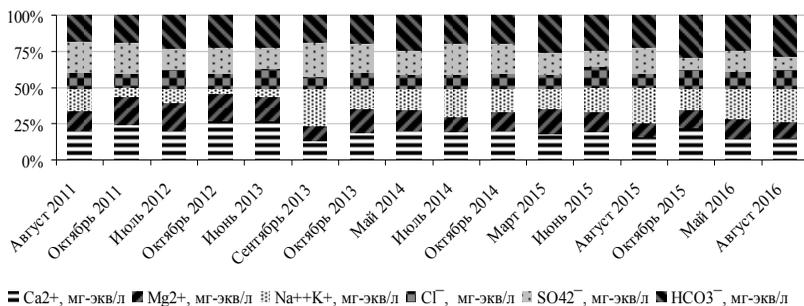
**Рис. 3. Динамика концентрации общего фосфора и доли неорганического фосфора для станции Вуокса (а) и станции Бурная (б), 2001–2014 гг.**



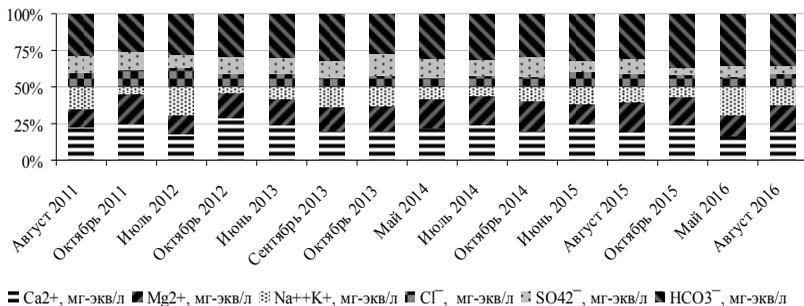
**Рис. 4. Изменение водородного показателя за период 2000–2016 гг.**

Средняя минерализация для станции Бурная за период 1981–1993 гг. составила  $43 \text{ мг}\cdot\text{л}^{-1}$  [Состояние..., 2004], за период 2011–2016 гг. –  $40 \text{ мг}\cdot\text{л}^{-1}$  (для трех гидрологических сезонов), для станции Вуокса –  $41 \text{ мг}\cdot\text{л}^{-1}$ . Общая минерализация р. Вуоксы в зависимости от сезона изменяется слабо.

По содержанию основных анионов воды р. Вуоксы относятся к переходному гидрокарбонатно-сульфатному типу, по содержанию катионов – также к смешанному типу. Отличный от большей части притоков Ладожского озера ионный состав Вуоксы обусловлен как природными (метаморфические породы водосбора, обогащенные сульфидами тяжелых металлов), так и антропогенными фактами (сульфаты поступают со сточными водами целлюлозно-бумажных предприятий, а хлориды – с хозяйственно-бытовыми стоками). На рис. 5 показана изменчивость относительного содержания основных ионов в воде р. Вуоксы.



Станция Бурная



Станция Вуокса

Рис. 5. Относительное содержание основных ионов в воде р. Вуоксы

Относительное содержание ионов  $\text{Ca}^{2+}$  и  $\text{Mg}^{2+}$  в районе г. Приозерска за период наблюдений 2011–2016 гг. всегда выше, чем в районе пос. Лосево, а содержание  $\text{Na}^+ + \text{K}^+$ , соответственно, ниже. Относительное содержание хлоридов и сульфатов в створе р. Вуоксы в районе пос. Лосево, как правило, выше, чем в районе г. Приозерска.

Средние концентрации основных ионов, как было показано ранее [Raspletina, Ulyanova, 1997], в период наблюдений 1985–1993 гг. были повышенными относительно периода 1959–1962 гг. Для сточных вод целлюлозно-бумажной промышленности с сульфатной варкой целлюлозы характерно повышенное содержание  $\text{Na}^+$  и  $\text{SO}_4^{2-}$ , для хозяйственно-бытовых –  $\text{Na}^+$  и  $\text{Cl}^-$ , соответственно, значения этих показателей увеличивались.

#### Средние концентрации основных ионов в воде р. Вуоксы, мг·л<sup>-1</sup>

Период наблюдений	$\text{HCO}_3^-$	$\text{SO}_4^{2-}$	$\text{Cl}^-$	$\text{Ca}^{2+}$	$\text{Mg}^{2+}$	$\text{Na}^+ + \text{K}^+$
1959–1962	12,8	10,2	2,7	4,4	1,1	4,6
1985–1993	11,4	12,8	5,8	4,9	1,8	6,9
2011–2016 (ст. Бурная)	15,4	9,4	4,3	4,4	2,2	4,6
2011–2016 (ст. Вуокса)	21,4	5,7	3,6	5	2,6	3,1

В табл. показано, что в период наблюдений 2011–2016 гг. абсолютное содержание хлоридов и сульфатов существенно понизилось, содержание  $\text{Na}^+ + \text{K}^+$  уменьшилось до уровня 1959–1961 гг. и ниже.

Полученные результаты полевых исследований позволяют проследить динамику изменчивости режима р. Вуоксы и свидетельствуют об относительном уменьшении антропогенного воздействия на озерно-речную систему Вуоксы.

#### Литература

- Оценка* экологического состояния рек бассейна Ладожского озера по гидрохимическим показателям и структуре гидробиоценозов / Под ред. И. С. Трифоновой. СПб.: Лема, 2006. 130 с.
- Состояние* биоценозов озерно-речной системы Вуоксы / Отв. ред. И. С. Трифонова. СПб.: Изд-во НИИ химии СПбГУ, 2004. 148 с.
- Raspletina G. F., Ulyanova D. S. Hydrochemical characteristics of River Vuoksi // Proceedings of the Second International Lake Ladoga Symposium 1996. Joensuu, 1997. P. 40–47.

## AMONG-YEAR AND SEASONAL DYNAMICS OF BASIC HYDROCHEMICAL PARAMETERS IN THE VUOKSI RIVER ESTUARY

M. A. Guseva, T. N. Petrova

*Institute of Limnology of RAS*

Relying on data from field surveys (2001–2016) the seasonal and among-year variability of hydrochemical parameters in two sections of the Vuoksi lake-river system was analyzed; the change of the main hydrochemical indices under declining human pressure was shown.

## ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЙ ТРАНСГРАНИЧНОЙ СИСТЕМЫ ОЗЕРО ИНАРИ – РЕКА ПАСВИК

В. А. Даувальтер, Н. А. Кашулин

*Институт проблем промышленной экологии Севера Кольского НЦ РАН,  
Апатиты*

Для оценки экологического состояния системы озеро Инари – река Пасвик был исследован химический состав донных отложений (ДО) в семи озерах. Озеро Куэтсьярви, принимающее стоки комбината, характеризуется максимальными концентрациями исследованных тяжелых металлов (ТМ, Ni, Cu, Co, Zn, Pb, Cd, Hg и As) в поверхностных слоях ДО. Снижение содержания ТМ в поверхностных слоях ДО отмечается вниз по течению реки Пасвик от места поступления сточных вод. В озерах, загрязняемых коммунально-бытовыми стоками и воздушными выбросами комбината, в поверхностных слоях ДО не отмечено увеличения содержания приоритетных для региона загрязняющих ТМ (Ni, Cu, Co, Zn), но обнаружено увеличение концентраций халькофильных элементов (Pb, Cd, Hg и As).

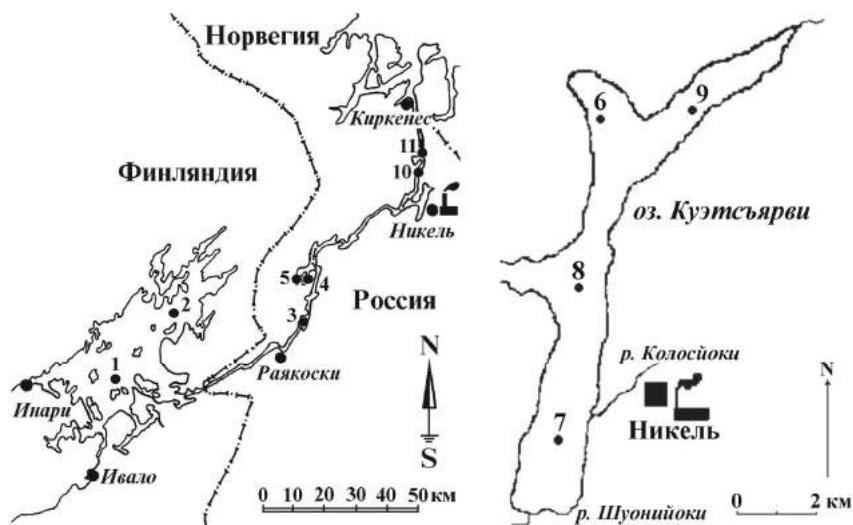
Озеро Инари – река Пасвик образуют самую большую водную систему в северной части Фенноскандии (рис. 1). Ее водосбор расположен на приграничной территории России, Норвегии и Финляндии. Озеро Инари – третье по величине озеро в Финляндии, площадь озера 1040 км<sup>2</sup>. Река Пасвик (длина 167 км) вытекает из оз. Инари и впадает в Баренцево море. Река является пограничной между Россией и Норвегией практически на всем протяжении российско-норвежской границы, за исключением крайней северной ее части. Площадь водосбора реки – 20 890 км<sup>2</sup>, из которых 69,8 % принадлежит Финляндии, 27,2 % – России, 5 % – Норвегии. Влияние приливов сказывается до 4 км выше устья реки до плотины Борисоглебской ГЭС. Река состоит из речных отрезков и озер, общая протяженность озер – 61,7 км. На реке расположены семь электростанций, пять из них принадлежат России, две – Норвегии.

Регулирование стока оз. Инари и р. Пасвик началось в 1951 г. с максимальной установленной амплитудой 2,4 м. Уровень воды оз. Инари понижается в течение зимы, а летом уровень повышается. Озеро Куэтсьярви, площадью водного зеркала озера 18 км<sup>2</sup>, расположено в 4,5 км ниже выпуска сточных вод комбината «Печенганикель» в р. Колосйоки.

Содержание тяжелых металлов (ТМ) в донных отложениях (ДО) системы оз. Инари – р. Пасвик исследовалось в рамках проекта Интеррег ША Коларктик. Колонки ДО отбирались в период 2012–2014 гг. на двух станциях оз. Инари глубиной 15 и 42 м (ст. 1 и 2), на пяти водоемах системы р. Пасвик: Хестефосс (ст. 3, глубина 10.5 м), Рускебукта (ст. 4, 15 м), Ваггатем (ст. 5, 19 м), Бьерневатн (ст. 10, 23 м) Скруккебукта (ст. 11, 37 м) и на четырех станциях оз. Куэтсьярви: ст. 6 – Гольфстрим (23 м), ст. 7 – Колосйоки (12 м), ст. 8 – Салмиярви (10 м), ст. 9 – Белый Камень (32 м) (рис. 1, табл.).

Методы отбора колонок ДО, пробоподготовки и химического анализа описаны ранее [Даувальтер, 1999, 2012]. Антропогенное влияние на экосистемы озер определяли с помощью коэффициента загрязнения ( $C_f$ ) каждого приоритетного загрязняющего ТМ (Ni, Cu, Co, Zn, Pb, Cd, Hg, As). Значения  $C_f$  находили путем деления концентраций ТМ в поверхностном 1-см слое на его фоновое содержание [Håkanson, 1980]. Степень загрязнения ( $C_d$ ) определяли суммированием всех значений  $C_f$  для восьми ТМ для данного озера. В этом подходе придерживались следующей классификации  $C_f^i$ :  $C_f^i < 1$  – низкий;  $1 \leq C_f^i < 3$  – умеренный;  $3 \leq C_f^i < 6$  – значительный;  $C_f^i \geq 6$  – высокий коэффициент загрязнения. Аналогично при характеристике  $C_d$  придерживались классификации из расчета, что суммируем значения  $C_f$  по 8 элементам:  $C_d < 8$  – низкая;  $8 \leq C_d < 16$  – умеренная;  $16 \leq C_d < 32$  – значительная;  $C_d \geq 32$  – высокая степень загрязнения.

Водоемы служат коллекторами всех видов загрязнения. Накапливая сведения о потоках элементов в биосфере, ДО являются важным источником информации о климатических, геохимических, экологических условиях, существовавших на водосборе и в самом водоеме, и позволяют оценить современное экологическое состояние воздушной и водной сред. Для оценки экологического состояния пресноводной системы исследовались концентрации ТМ в ДО в четырех аспектах: 1) фоновые содержания; 2) вертикальное распределение элементов в ДО; 3) концентрации в поверхностных слоях ДО; 4) определение степени загрязнения накопленными ТМ ДО водоемов.



**Рис. 1.** Схема отбора проб ДО в водной системе р. Пасвик. Номера станций соответствуют порядковым номерам станций в таблице

Наибольшие фоновые концентрации большей части ТМ (Ni, Zn, Co, Cd, Hg, As) в ДО отмечены в южной части оз. Куэтсъярви (табл.), что обусловлено геохимическими (наличие медно-никелевых сульфидных залежей в юго-восточной части водосбора озера) и морфометрическими особенностями водосбора и самого озера.

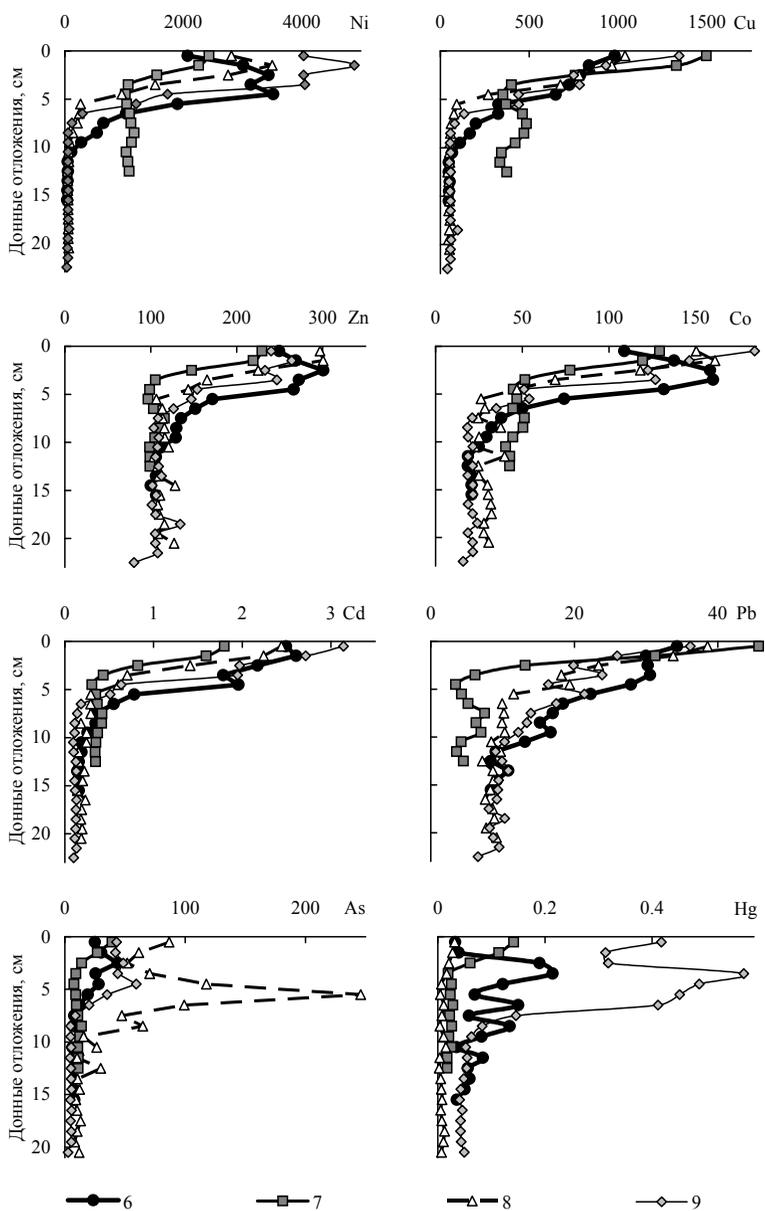
Прямые поступления сточных вод комбината «Печенганикель» обуславливают максимальные концентрации всех исследованных ТМ в поверхностных слоях ДО оз. Куэтсъярви (рис. 2). Уменьшение концентраций Ni, Co, Zn, Hg и As в верхних 1–2 см ДО оз. Куэтсъярви объясняется уменьшением сбросов комбинатом «Печенганикель» в последнее десятилетие. Другие элементы (Cu, Cd, Pb) имеют поверхностные максимумы в ДО всех станций оз. Куэтсъярви, что может быть связано с постоянством сброса этих элементов (для Cu – 0,1–0,2 т/год за последнее десятилетие).

Вниз по течению р. Пасвик от места поступления сточных вод наблюдается снижение содержания ТМ в поверхностных слоях ДО. Главными загрязняющими элементами в этих озерах являются ТМ, сбрасываемые в больших количествах в составе сточных вод комбинатом «Печенганикель» – Ni, Cu, Co, Zn, хотя халькофильные элементы (Hg, As, Cd) также в высоких концентрациях встречены в поверхностных слоях ДО оз. Бьерневатн.

В озерах вверх по течению р. Пасвик от места поступления сточных вод в поверхностных слоях ДО не отмечено увеличения содержания ТМ, выбрасываемых в атмосферу в значительных количествах комбинатом «Печенганикель» (Ni, Cu, Co, Zn). Однако в этих озерах, особенно в самом большом и наиболее удаленном от комбината «Печенганикель» оз. Инари, обнаружено значительное увеличение концентраций халькофильных элементов (Pb, Cd, Hg и As) в поверхностных слоях ДО.

**Концентрации ТМ и As (мкг/г, сух. веса) в ДО, величины коэффициента загрязнения ( $C_f$ ) и степени загрязнения ( $C_d$ ) системы озеро Инари – река Пасвик**

№	Озеро, станция, глубина, м	Слой, см	Cu	Ni	Zn	Co	Cd	Pb	As	Hg	$C_d$
1	Инари-1 Станция 1 15 м	0–1	35	48	124	22	0,62	26,1	8,0	0,084	
		22–23	46	48	117	22	0,11	4,6	1,8	0,030	
		$C_f$	0,8	1,0	1,1	1,0	5,8	5,7	4,5	2,8	22,6
2	Инари-2 Станция 2 42 м	0–1	38	53	84	23	0,31	21,2	14,7	0,097	
		3–4	48	61	91	22	0,15	4,9	1,6	0,042	
		$C_f$	0,8	0,9	0,9	1,0	2,1	4,3	9,1	2,3	21,4
3	Хестефосс  10,5 м	0–1	32	37	81	19	0,18	8,8	4,4	0,143	
		3–4	36	46	100	21	0,05	6,8	3,9	0,021	
		$C_f$	0,9	0,8	0,8	0,9	3,9	1,3	1,1	6,8	16,5
4	Рускебукта  15 м	0–1	67	70	95	21	0,15	17,2	8,5	0,161	
		14–15	62	63	112	26	0,09	12,4	4,4	0,038	
		$C_f$	1,1	1,1	0,8	0,8	1,7	1,4	2,0	4,2	13,1
5	Ваггатем  19 м	0–1	75	87	122	28	0,11	15,6	7,6	0,042	
		14–15	55	58	126	30	0,08	9,2	6,0	0,015	
		$C_f$	1,4	1,5	1,0	1,0	1,5	1,7	1,3	2,9	12,1
6	Куэтъярви-1 Гольфстрим 23 м	0–1	981	2075	249	109	2,49	34,3	25,0	0,033	
		15–16	47	39	106	21	0,16	8,4	8,0	0,035	
		$C_f$	20,8	52,9	2,3	5,2	15,8	4,1	3,1	0,9	105,3
7	Куэтъярви-2 Колосйоки 12 м	0–1	1496	2435	229	129,3	1,80	45,7	39,2	0,142	
		12–13	373	1087	99	42,8	0,35	4,5	11,1	0,017	
		$C_f$	4,0	2,2	2,3	3,0	5,2	10,1	3,5	8,1	38,5
8	Куэтъярви-3 Салмиярви 10 м	0–1	1039	2814	297	150,4	2,44	38,6	86,7	0,031	
		20–21	52	66	127	30,7	0,18	9,2	11,9	0,007	
		$C_f$	20,0	42,8	2,3	4,9	13,2	4,2	7,3	4,7	99,5
9	Куэтъярви-4 Белый Камень 32 м	0–1	1343	4032	240	184,1	3,14	36,1	43,1	0,417	
		22–23	40	32	80	15,9	0,10	6,6	2,62	0,049	
		$C_f$	33,5	125,7	3,0	11,6	32,1	5,5	16,4	8,5	236,2
10	Бьерневатн  23 м	0–1	234	397	256	54	0,35	10,3	17,3	0,039	
		15–16	42	58	100	27	0,11	11,2	3,4	0,003	
		$C_f$	5,6	6,9	2,6	2,0	3,1	0,9	5,2	12,2	38,3
11	Скруккебукта  37 м	0–1	169	280	127	39	0,27	26,8	6,9	0,017	
		9–10	58	64	123	25	0,09	14,0	3,95	0,021	
		$C_f$	2,9	4,3	1,0	1,6	3,0	1,9	1,7	0,8	17,4



**Рис. 2.** Вертикальное распределение концентраций ТМ (мкг/г) в колонках ДО оз. Кузетсыярви

Максимальные значения  $C_f$  почти для всех исследуемых ТМ отмечены в ДО оз. Куэтсьярви (табл.), что связано с прямым поступлением сточных промышленных вод комбината «Печенганикель». Оз. Куэтсьярви характеризуется высокими, по классификации Л. Хакансона [Håkanson, 1980], значениями  $C_f$  для всех ТМ, за исключением Zn, для которого выявлено умеренное загрязнение. Оз. Бьерневатн характеризуется высокими значениями  $C_f$  для Ni и Hg, значительными для Cu, As, Cd и умеренными для остальных металлов. Вниз по течению в оз. Скруккебукта также отмечено влияние поступления сточных вод комбината «Печенганикель», проявляющееся в значительном загрязнении Ni. Значения  $C_f$  для Cu и Cd находятся на границе между умеренными и значительными, для остальных металлов отмечено умеренное загрязнение. Для озер, расположенных вверх по течению от места поступления сточных вод комбината «Печенганикель», зафиксированы высокое и значительное загрязнение Hg (озера Хестефосс и Рускебукта соответственно), а также значительное загрязнение Cd в оз. Хестефосс. По остальным металлам в этих озерах зафиксированы низкие и умеренные значения  $C_f$ . В оз. Ваггатем отмечены умеренные значения  $C_f$  для всех металлов (табл.). Оз. Инари характеризуется высокими значениями  $C_f$  для As, значительными для Pb и Cd, умеренными для Hg. Другие ТМ в ДО оз. Инари имеют значения  $C_f$  на границе между низкими и умеренными (табл.). В целом по всем исследованным загрязняющим элементам максимальным загрязнением характеризуется оз. Куэтсьярви (высокое значение  $C_d$ , табл.). Высокое по классификации Хакансона значение  $C_d$  (но меньше, чем в оз. Куэтсьярви) отмечено в оз. Бьерневатн. Значительная величина  $C_d$  обнаружена в оз. Инари благодаря серьезному загрязнению ДО халькофильными элементами (Pb, Cd, Hg и As). Озера Скруккебукта и Хестефосс имеют величины  $C_d$  на границе между низкими и умеренными. Низкие значения  $C_d$  зафиксированы в озерах Рускебукта и Ваггатем.

### Литература

Даувальтер В. А. Закономерности осадконакопления в водных объектах Европейской Субарктики (природоохранные аспекты проблемы): Автореф. дис. ... докт. геогр. наук. М.: ИВП РАН, 1999. 52 с.

Даувальтер В. А. Геоэкология донных отложений озер. Мурманск: Изд-во Мурманского гос. техн. ун-та, 2012. 242 с.

Håkanson L. An ecological risk index for aquatic pollution control – a sedimentological approach // Water Res. 1980. N 14. P. 975–1001.

## **CHEMICAL COMPOSITION OF SEDIMENTS IN THE CROSS-BORDER SYSTEM LAKE INARI – THE PASVIK RIVER**

**V. A. Dauvalter, N. A. Kashulin**

*Institute of the Industrial Ecology Problems of the North, Kola Research Center, RAS*

To assess the ecological state of the system Lake Inari – the Pasvik River the chemical composition of sediments in seven lakes was investigated. Lake Kuetsjärvi, which accepts waste waters from the Pechenganickel Mining-Metallurgical Company, is characterized by the highest concentrations of the studied heavy metals (Ni, Cu, Co, Zn, Pb, Cd, Hg and As) in the top layers of sediments. Heavy metal levels in top sediment layers tend to decline in the River Pasvik downstream of the wastewater discharge point. No increase was observed in the content of the region's major heavy metals (Ni, Cu, Co, Zn) in the lakes polluted by household effluents and air-borne emissions from Pechenganickel, but concentrations of chalcophile elements (Pb, Cd, Hg and As) were found to increase.

## **ОРГАНОЛЕПТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ОБРАЗЦОВ ПОДЗЕМНЫХ ВОД г. ПЕТРОЗАВОДСКА**

**К. И. Земцова\*, Т. В. Вага**

*Петрозаводский государственный университет*

Неудовлетворительное качество поверхностных вод предполагает использование подземных вод в целях улучшения хозяйственно-питьевого водоснабжения жителей городов. В данном аспекте большое значение имеет и их количество, и качество. Органолептический анализ является обязательной начальной процедурой санитарно-химического контроля воды. Органолептический анализ – это изучение внешних показателей, доступных для определения любым наблюдателем. К таким показателям относятся: мутность, цветность, запах, вкус и привкус. В декабре 2016 г. был произведен забор образцов подземных вод в одном из районов г. Петрозаводска с целью определения их качества с помощью органолептического анализа. Исследуемые образцы соответствуют Санитарно-эпидемиологическим правилам и нормативам 2.1.4.1175-02 к органолептическим показателям и могут быть использованы для хозяйственно-бытовых нужд.

Подземные воды – это все воды земной коры, находящиеся ниже поверхности земли, независимо от фазового состояния и взаимосвязи с породой. Подземные воды являются важным природным ресурсом. Их изучение имеет важное практическое значение [Попова, 2006]. В условиях неудовлетворительного качества поверхностных вод целесообразным способом улучшения хозяйственно-питьевого водоснабжения является использование подземных вод [Минерально-сырьевая база..., 2006].

---

\* Студентка ПетрГУ.

Состояние водных объектов как компонента окружающей среды прямо влияет на здоровье человека, при этом здоровые жизненные привычки не могут полностью компенсировать воздействие загрязненной воды [Безопасность..., 2009]. Под определением здоровья автор понимает такое состояние организма, при котором он биологически полноценен, трудоспособен, отсутствуют болезненные проявления. Степень влияния окружающей среды на здоровье человека может составлять до 20 %.

В течение нескольких последних десятилетий для г. Петрозаводска существует проблема, обусловленная плохим природным качеством воды действующего источника водоснабжения – Петрозаводской губы Онежского озера. Одним из способов решения данной проблемы является возможность использования подземных вод. Их использование в качестве альтернативного источника водоснабжения Петрозаводска примерно на 70 % снизит нагрузку на существующий городской водозабор [Кто откроет кран..., 2008]. При этом важно не только количество, но и качество подземных вод. Для определения качества воды проводится ее анализ. Органолептический анализ является обязательным и предвещает процедуры санитарно-химического контроля воды.

Органолептический анализ – это исследование внешних показателей качества воды, легко определяемых любым наблюдателем. Для определения органолептических данных водных образцов используются органы чувств (зрение, обоняние, вкус) [Муравьев и др., 2012]. К органолептическим показателям относятся: мутность, цветность, запах, вкус и привкус.

Мутность воды – показатель, характеризующий изменение прозрачности воды в связи с наличием взвешенных в воде мелкодисперсных примесей – нерастворимых частиц различного происхождения – или развитием планктонных организмов. Также увеличение мутности зависит от окисления соединений железа и марганца кислородом воздуха, что приводит к образованию коллоидов. Данный показатель способствует определению такой характеристики воды, как прозрачность. Мутность питьевой воды нормируется в основном из-за того, что мутная вода защищает микроорганизмы при ультрафиолетовом обеззараживании и облегчает рост бактерий, а также из эстетических соображений.

Цветность природной воды обусловлена присутствием гуминовых веществ и соединений железа. Такие показатели, как запах, вкус и привкус, также определяются присутствием в воде различных веществ [Муравьев, 2004]. Природные воды содержат различные примеси, что обусловлено процессами взаимодействия с вмещающими породами или веществами, поступившими из внешних источников (например, промышленные стоки). В случае увеличения концентрации веществ вода начинает принимать тот или иной привкус или запах.

По происхождению запахи, вкусы и привкусы делятся:

- естественные (органические и неорганические);
- искусственные (неорганические и органические).

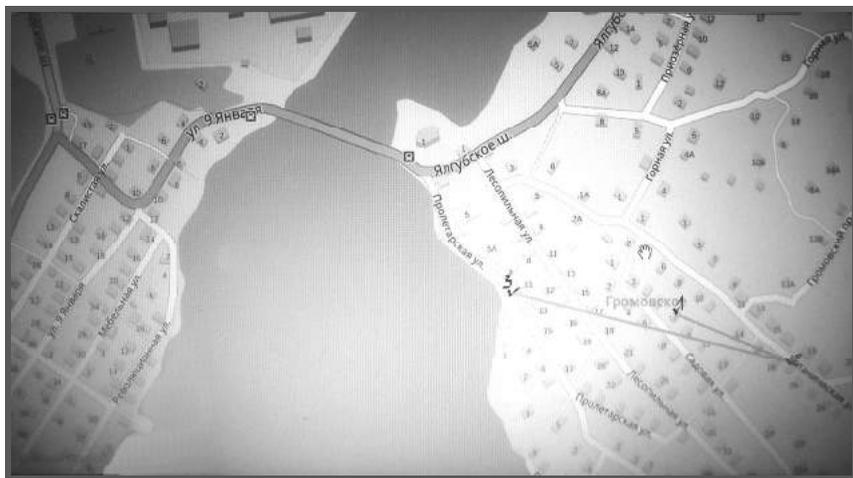
К основным факторам, которые вызывают ощущение запаха и привкуса в воде, можно отнести:

- гниющие растения;
- грибки и плесень;
- железистые и сернистые бактерии;
- соединения тяжелых металлов (металлический привкус);
- соли щелочных и щелочно-земельных металлов (солёный и горький вкус, щелочной привкус);
- различные добавки (кислый вкус придает воде большая концентрация  $\text{CO}_2$ );
- промышленные отходы (ярко выраженный «химический» запах воды).

Запах воды естественного происхождения обычно связан с наличием фитопланктона и с деятельностью бактерий, разлагающих органические вещества, в связи с чем подземные воды (родники, ключи, артезианские скважины) чаще всего не должны иметь ярко выраженного запаха. К основным причинам, по которым в подземных водах может появиться запах, относится взаимодействие с сероводородом и соединениями железа. Сероводород придает водам болотистый, затхлый запах. Наиболее часто встречающийся запах и вкус подземных вод обусловлен содержанием железа, которое при взаимодействии с кислородом воздуха переходит в трехвалентную форму, вследствие чего вода приобретает бурый цвет и железистый запах и привкус.

Территория г. Петрозаводска располагается на северо-западе России в пределах тектонической структуры Балтийского щита. Подземные воды города относятся к субартезианскому бассейну, включающему наиболее водообильный нижнекотлинский водоносный горизонт, который перекрыт мощной толщей четвертичных отложений. Среди них выделяются онегозерский межморенный водоносный горизонт и грунтовые воды ледниковых и озерно-ледниковых песчаных и супесчаных отложений [Крутских и др., 2016].

В декабре 2016 г. автором был произведен забор образцов грунтовых вод г. Петрозаводска с целью определения их качества методом органолептического анализа. Отбор проб воды осуществлялся в районе г. Петрозаводска – Соломенном, расположенном в северной части города, в нескольких водозаборных сооружениях (рис.).



**Картограмма расположения исследуемых водозаборных сооружений г. Петрозаводска [Проложить маршрут..., 2016]:**

1 – шахтный колодец на ул. Садовой (образец воды № 1); 2 – шахтный колодец на ул. Ботанической (образец воды № 2); 3 – каптаж родника на ул. Пролетарской (образец воды № 3)

Каждую пробу воды отбирали объемом не менее 500 мл в пластиковую емкость. Погодные условия на момент забора воды были следующие: температура воздуха  $-8^{\circ}\text{C}$ , облачно, без осадков.

В результате анализа образцов можно сделать следующий вывод: органолептические показатели отобранных образцов подземных вод соответствуют необходимым требованиям и нормам. Исследованные источники воды можно отнести к условно чистым. Внешние показатели данных образцов указывают на потенциальное использование воды для питьевых и хозяйственных нужд; по крайней мере, она не оказывает значительного вреда на здоровье человека.

Во время исследований также были рассмотрены и оценены водозаборные сооружения, состояние которых может оказывать влияние на качество воды. К основным рекомендациям для улучшения водозаборных сооружений можно отнести следующие:

- 1) в шахтном колодце образца воды № 1 необходимо оголовок прикрыть навесом, а для стенок колодца рекомендуются бетонные или железобетонные кольца;
- 2) в шахтном колодце образца воды № 2 необходимо также оголовок прикрыть навесом;
- 3) в каптаже родника образца воды № 3 необходимо:

– каптажную камеру оборудовать водозаборной и вентиляционной трубами;

– в целях предохранения каптажной камеры от заноса песком установить обратный фильтр со стороны потока воды;

– для защиты каптажной камеры от затопления поверхностными водами оборудовать отстойкой из бетона, а саму каптажную камеру возвысить над поверхностью земли на 0,8 м.

Применение данных рекомендаций по улучшению водозаборных сооружений защитит воду от загрязнения.

Исследуемые образцы подземных вод соответствуют Санитарно-эпидемиологическим правилам и нормативам 2.1.4.1175-02 к органолептическим показателям и могут быть использованы для хозяйственно-бытовых нужд.

### Литература

*Безопасность* жизнедеятельности: Учеб. пособие / А. Т. Смирнов, М. А. Шахраманьян, Н. А. Крючек и др. 3-е изд., перераб. М.: Дрофа; 2009 [Электронный ресурс]. Электронный учебник. – [Россия]. – URL: [http://www.plam.ru/ucebник/bezopasnost\\_zhiznedejatelnosti\\_uchebnoe\\_posobie/p4.php](http://www.plam.ru/ucebник/bezopasnost_zhiznedejatelnosti_uchebnoe_posobie/p4.php), свободный (дата обращения: 26.11.2016).

*Крутских Н. В., Бородулина Г. С., Казнина Н. М. и др.* Геоэкологические основы организации мониторинга северных урбанизированных территорий (на примере г. Петрозаводска) // Тр. КарНЦ РАН. 2016. № 12. С. 52–67.

*Кто откроет* кран подземных резервуаров или почему в Петрозаводске не используются альтернативные источники снабжения города чистой питьевой водой // Курьер Карелии. 2008. Август / Официальный интернет-портал Республики Карелия [Электронный ресурс]. Электронная статья. – [Россия]. – URL: <http://www.gov.karelia.ru/Power/Ministry/Resources/081029.html>, свободный (дата обращения: 16.12.2016).

*Минерально-сырьевая база* Республики Карелия. Кн. 2: Неметаллические полезные ископаемые. Подземные воды и лечебные грязи / Отв. ред. В. П. Михайлов, В. Н. Аминов. Петрозаводск: Карелия, 2006. 355 с.

*Муравьев А. Г.* Руководство по определению показателей качества воды полевыми методами. Изд-е 3-е. СПб.: Кримас+, 2004. 248 с. / Российский химико-аналитический портал ANCHEM.RU [Электронный ресурс]. Электронное пособие. – [Россия]. – URL: <http://anchem.ru/literature/books/muraviev/015.asp>, свободный (дата обращения: 04.12.2016).

*Муравьев А. Г., Пугал Н. А., Лаврова В. Н., Тушкин С. Н.* Экологический практикум: Учебное пособие с комплектом карт-инструкций. 2-е изд-е, исправленное. СПб.: Кримас+, 2012. 176 с.

*Попова Д. П.* Геология и гидрогеология: Учебное пособие для студентов специальности 320800(280402) Природоохранное обустройство территорий всех форм обучения. Красноярск: Сибирский гос. технол. ун-т, 2006. 132 с.

*Проложить маршрут* онлайн / Это Место [Электронный ресурс]. Электронная статья. – [Россия]. – URL: <http://www.etomesto.ru/createtrack.php>, свободный (дата обращения: 17.12.2016).

## **ORGANOLEPTIC ANALYSIS OF UNDERGROUND WATERS SAMPLES FROM PETROZAVODSK**

**K. I. Zemtsova, T. V. Vaga**

*Petrozavodsk State University*

The poor quality of surface water is a reason to use groundwater to improve the drinking water supply to urban population. In this respect, both its quantity and quality are important. Organoleptic assessment is an initial procedure required for the sanitary and chemical control of water. Organoleptic analysis is the study of external indicators that can be determined by any observer. These indicators include: turbidity (muddiness), color, odor, taste. In December 2016, the author collected samples of groundwater in one of the districts of Petrozavodsk to determine their quality by the methods of organoleptic analysis. The test samples satisfied the Sanitary and epidemiological rules and norms 2.1.4.1175-02 for organoleptic indicators and can be used for household needs.

## **БАЛАНС ОРГАНИЧЕСКОГО ВЕЩЕСТВА В ОЗЕРАХ КАРЕЛИИ**

**М. В. Зобкова, Т. А. Ефремова, П. А. Лозовик, А. В. Сабылина**

*Институт водных проблем Севера КарНЦ РАН*

Рассмотрено содержание и распределение автохтонного и аллохтонного органического вещества (ОВ) и его компонентов в озерах Карелии. Установлено, что основное отличие исследованных водоемов связано с различным содержанием в них аллохтонного ОВ, в то время как автохтонного изменяется незначительно. В составе аллохтонного ОВ преобладают гумусовые вещества (более 90 %), в состав которых входят связанные углеводы (7 % от аллохтонного ОВ). В автохтонном ОВ выявлены свободные углеводы (28 %), липиды (3–4 %) и белки (1,4 %).

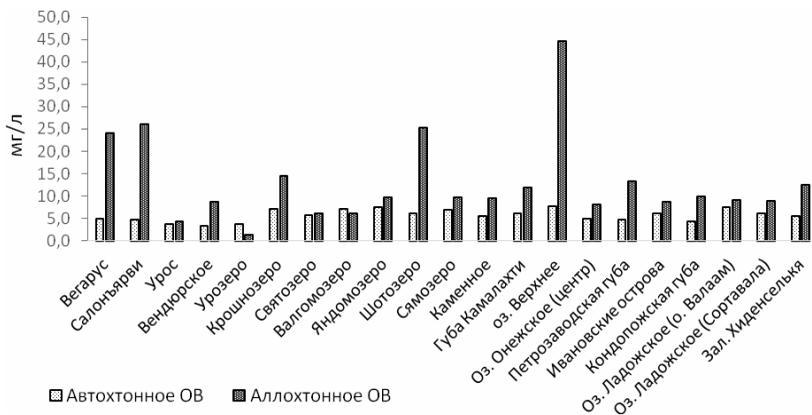
Органическое вещество (ОВ) природных вод в зависимости от источника происхождения подразделяют на автохтонное и аллохтонное ОВ. Автохтонное ОВ образуется в самом водоеме за счет протекания продукционно-деструкционных процессов и представлено биохимически лабильными соединениями (углеводами, липидами, белками, летучими органическими кислотами и др.). Аллохтонное ОВ поступает в водоем со сточными водами и с водосборной территории и представлено в основном соединениями гумусовой природы.

Содержание и распределение автохтонного и аллохтонного ОВ и его компонентов было рассмотрено в 2012–2016 гг. на разнотипных природных объектах Карелии в различные сезоны года. Работа велась на нескольких станциях Онежского и Ладожского озер и на 14 малых водоемах Карелии. Исследованные водные объекты отличаются друг от друга

по гумусности и уровню трофии, согласно классификации П. А. Лозовика [2013а, б]. Так, среди озер выделяются олигогумусные (Урозера, Урос, Вендюрское, Валгомозера, Святозеро, центральная часть и Ивановские острова Онежского озера), мезогумусные (Яндомозера, Сямозера, Крошнозеро, Ладожское, центральная часть и губа Камалахта оз. Каменного, Петрозаводская и Кондопожская губы Онежского озера), мезополигумусные (Шотозера, Вегарусъярви, Салонъярви) и полигумусные (Верхнее). В зависимости от уровня трофии исследованные объекты подразделяли на олиготрофные (Урозера, Урос, центральная часть и губа Камалахта оз. Каменного, центральная часть и Ивановские острова Онежского озера), мезотрофные (Вендюрское, Валгомозера, Яндомозера, Сямозера, Шотозера, Ладожское, Петрозаводская губа Онежского озера), эвтрофные (Святозеро, Крошнозеро), ацидотрофные (Вегарусъярви, Салонъярви, Верхнее).

Для количественной оценки содержания автохтонного и аллохтонного ОВ использовалась методика разделения ОВ природных вод на автохтонную и аллохтонную составляющие адсорбцией на диэтиламиноэтилцеллюлозе в динамическом режиме [Лозовик, Мусатова, 2013]. Выделение гумусовых веществ из аллохтонного ОВ и их разделение на фульвовые и гуминовые кислоты осуществлялось по стандартной методике [Унифицированные..., 1971]. Определение концентрации липидов и углеводов проводилось по модифицированным методикам с L-триптофановым и с фосфованилиновым реактивами соответственно [Лозовик и др., 2013], а белков – с красителем Кумасси R-250 [Руководство..., 2004]. Помимо определения общего содержания углеводов ( $Y_{\text{общ}}$ ) в исходной воде, осуществлялось и количественное определение их форм: свободные ( $Y_{\text{своб}}$ ) в составе автохтонного ОВ, связанные с гумусовыми веществами ( $Y_{\text{связ}}$ ) как компонент аллохтонного ОВ, а также растворенные ( $Y_{\text{раств}}$ ) и взвешенные углеводы ( $Y_{\text{взв}}$ ) [Ефремова и др., 2013]. Содержание автохтонного и аллохтонного ОВ принималось равным  $2C_{\text{орг}}$ . Концентрацию  $C_{\text{орг}}$  рассчитывали по величине ХПК ( $C_{\text{орг}} = 0,375\text{ХПК}$ ).

Основное отличие водных объектов гумидной зоны заключается в различном содержании в них аллохтонного ОВ при малой изменчивости количества автохтонного (рис. 1, табл.). Так, содержание общего автохтонного ОВ в исследованных объектах изменялось в пределах 3,0–19,6 мг/л (в среднем  $7,2 \pm 2,6$  мг/л), а растворенного автохтонного ОВ – 2,2–9,6 мг/л (в среднем  $6,0 \pm 1,8$  мг/л). Связано это с тем, что все исследованные водные объекты находятся в одной климатической зоне и продукционно-деструкционные процессы здесь протекают на одном уровне [Зобкова и др., 2015]. Что касается аллохтонного ОВ, то его содержание варьировало в широких пределах от 0,4 до 51,8 мг/л (в среднем  $13,6 \pm 9,8$  мг/л), и обусловлено это различной заболоченностью водосборной территории озер.



**Рис. 1. Среднее содержание растворенного автохтонного и аллохтонного ОБ в озерах Карелии в 2012–2016 гг.**

**Автохтонное и аллохтонное ОБ, углеводы, липиды и белки в больших и малых озерах Карелии, мг/л**

Компонент	Малые озера	Онежское озеро	Ладожское озеро
Содержание автохтонного и аллохтонного ОБ			
Растворенное автохтонное	1,8–9,6 (5,6)	2,8–7,6 (5,2)	5,0–8,4 (7,2)
Общее автохтонное ОБ	3,0–19,6 (7,6)	3,0–7,8 (5,6)	6,0–10,2 (7,8)
Аллохтонное ОБ	0,4–51,8 (14,2)	5,0–23,2 (9,8)	7,8–13,2 (9,4)
Углеводы			
Общие	1,2–11,0 (3,7)	0,7–5,5 (3,1)	1,2–4,5 (3,0)
Свободные	0,4–4,5 (2,2)	0,7–2,7 (1,8)	1,3–2,9 (1,7)
Связанные	0,0–3,9 (0,9)	0,0–2,4 (0,7)	0,1–0,9 (0,5)
Во взвеси	0,0–6,3 (0,7)	0,0–2,4 (0,6)	0,2–2,2 (0,7)
Липиды			
Общие	0,10–0,97 (0,31)	0,03–0,61 (0,29)	0,07–0,51 (0,23)
Белки			
Общие	0,10–0,92 (0,27)	0,05–0,55 (0,18)	0,05–0,16 (0,11)

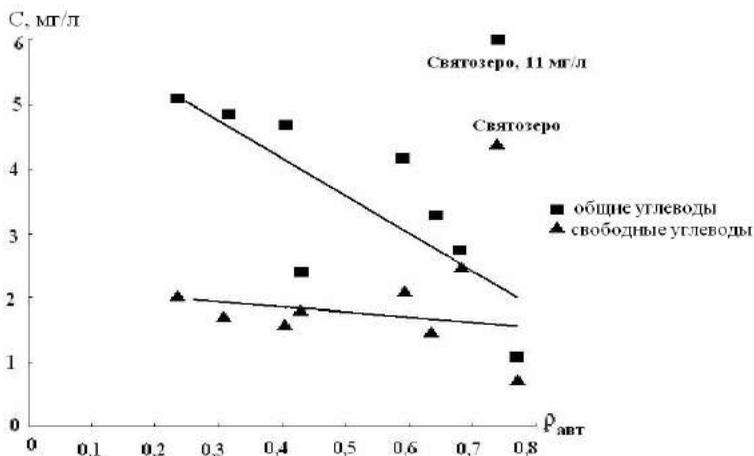
*Примечание.* В скобках – среднее значение.

Основным компонентом аллохтонного ОБ являются гумусовые вещества, в исследованных объектах они составляли 91–100 % (в среднем 94 % от аллохтонного ОБ). В центральной части Онежского озера их содержание составляло 7,8 мг/л, а в Петрозаводской губе – 17,8, что связано с влиянием на губу вод высокогумусной р. Шуи (концентрация гумусовых веществ в реке в среднем 26,2 мг/л). Аналогичная картина наблюдалась и в Ладожском озере, где в открытой части содержание гумусовых веществ меньше, чем в зал. Хиденселькя. В составе гумусовых веществ превали-

руют фульвовые кислоты, на их долю приходится 74–92 % (в среднем 85 %) от общего количества гумусовых веществ, в то время как на долю гуминовых кислот – 8–26 % (в среднем 15 %). Их соотношение друг с другом составляло в среднем 6 : 1.

В составе автохтонного и аллохтонного ОВ были изучены такие важные компоненты, как углеводы, липиды и белки.

С помощью методики разделения ОВ на автохтонное и аллохтонное ОВ удалось установить зависимость содержания различных форм углеводов от доли автохтонного ОВ (рис. 2). Проведенные исследования показали, что количество свободных углеводов практически не меняется от  $\rho_{\text{авт}}$ , тогда как содержание общих и связанных углеводов уменьшается [Ефремова и др., 2014]. Это доказывает, что в состав общих углеводов входят связанные углеводы, как компонент аллохтонного ОВ, а также свободные углеводы, как часть автохтонного ОВ. Что касается углеводов во взвеси, то наблюдается постепенное увеличение их содержания при увеличении доли автохтонного ОВ.



**Рис. 2.** Зависимость содержания различных форм углеводов от доли автохтонного ОВ

Анализируя распределение общих углеводов ( $U_{\text{общ}}$ ) в поверхностных водах в зависимости от трофности и гумусности, можно отметить следующие закономерности. Прежде всего, содержание  $U_{\text{общ}}$  одинаковое в олиго- и мезотрофных водоемах, и повышенное их количество наблюдается в эвтрофных водоемах по сравнению с первыми. В эвтрофных озерах наиболее высокие концентрации  $U_{\text{общ}}$  отмечены только при «цветении»

воды. Вторая закономерность, которая очень четко выражена в олиго- и мезотрофных водоемах, – это увеличение содержания  $Y_{\text{общ}}$  с ростом гумусности воды. Анализ сезонной динамики содержания  $Y_{\text{общ}}$  как по среднестатистическим данным, так и по отдельным водоемам не показал существенной сезонной изменчивости, за исключением эвтрофных водных объектов в период «цветения» в них воды. Связано это с тем, что содержание ОВ в водоемах, а также отношение  $\text{БПК}_{\text{полн}}/\text{ХПК}$  мало подвержены сезонным изменениям, и только при «цветении» воды наблюдается резкое увеличение содержания ОВ и отношения  $\text{БПК}_{\text{полн}}/\text{ХПК}$ .

Медианные концентрации общих углеводов в исследуемых водных объектах Карелии, включая Онежское и Ладожское озера, составили 3,3, а  $Y_{\text{своб}}$  – 1,8,  $Y_{\text{связ}}$  – 0,7 и  $Y_{\text{взв}}$  – 0,6 мг/л. В поверхностных водах преобладают растворенные углеводы, в большей части объектов их доля составила 80–96 %. Количество углеводов во взвеси достигало небольшой величины (7–17 %), в среднем 14 %, тогда как количество  $Y_{\text{своб}}$  в автохтонном ОВ было значительно больше – 17–43 %, в среднем 28 %. Доля  $Y_{\text{связ}}$  в составе аллохтонного ОВ в озерах изменялась в пределах 4–17 %, в среднем – 7 %. В Онежском озере содержание углеводов колебалось в пределах от 0,7 до 5,5 мг/л, составляя в среднем 16 % от содержания ОВ (см. табл.). Максимальные концентрации углеводов отмечены в Петрозаводской и Кондопожской губах – в среднем 3,0 и 3,1 мг/л, соответственно. Содержание общих углеводов в Ладожском озере варьировало от 1,2 до 4,5 мг/л (в среднем 3,0 мг/л). В малых разнотипных озерах Карелии концентрация углеводов изменялась в широких пределах от 1,2 до 11,0, в среднем 3,7 мг/л.

Анализ связи содержания липидов от гумусности воды показал отсутствие такой зависимости, которая имела место для углеводов. Наблюдается слабый отрицательный тренд концентрации липидов с ростом гумусности воды, что связано с более высокой концентрацией липидов в олиготрофных олигогумусных водоемах в весенний период, когда в них идет активная вегетация диатомового планктона, богатого липидами. Поэтому следует считать, что липиды в поверхностных водах находятся преимущественно в составе автохтонного ОВ и образуются в результате протекания продукционно-деструкционных процессов. Их содержание в малых озерах Карелии изменялось в пределах от 0,10 до 0,97 мг/л (в среднем 0,31). Максимальная концентрация (0,97 мг/л) отмечалась при «цветении» воды эвтрофного оз. Святозеро в летний период 2012 г. В Ладожском и Онежском озерах количество липидов оказалось довольно близким к их содержанию в малых озерах (см. табл.).

Полученные данные по количеству липидов в составе ОВ также отражают особенности функционирования фитопланктона по сезонам года. Наибольшее содержание липидов отмечалось в исследованных водоемах

в весенний и летний периоды, что связано с увеличением биомассы диатомового планктона именно в эти сезоны [Чекрыжева, 2008; Тимакова и др., 2011]. Что касается распределения липидов по объектам, то наименьшая их доля отмечается в высокогумусных водоемах, а наибольшая – в олигогумусных олиготрофных озерах с высокой долей автохтонного ОВ. При этом в составе автохтонного ОВ содержание липидов уже достигает 6,0–14 %.

Концентрация белков в малых водоемах Карелии изменялась в пределах 0,10–0,92 мг/л (в среднем 0,27). В больших стратифицированных озерах Ладожском и Онежском содержание белков изменялось от 0,06 до 0,52 мг/л (в среднем 0,32 мг/л). Их доля от общего количества ОВ (по ХПК) в озерах составляет 1,4 %, а в составе автохтонного ОВ – 3,4%. Как и в случае с липидами, не отмечается связи содержания белков с гумусностью воды, что дает основание полагать, что они в поверхностных водах находятся преимущественно в составе автохтонного ОВ.

Соотношение свободных углеводов, липидов и белков в воде исследованных объектов составляет 6 : 1 : 1, что является таким же, как и в большинстве живых организмов.

### Литература

*Ефремова Т. А., Сабылина А. В., Лозовик П. А.* Лабильные органические вещества (углеводы липиды и белки) в Онежском озере // Тр. КарНЦ РАН. 2013. № 6. С. 96–104.

*Ефремова Т. А., Сабылина А. В., Лозовик П. А.* Углеводы и липиды в поверхностных водах Карелии // Вода: химия и экология. 2014. № 1. С. 11–19.

*Зобкова М. В., Ефремова Т. А., Лозовик П. А., Сабылина А. В.* Органическое вещество и его компоненты в поверхностных водах гумидной зоны // Успехи современного естествознания. 2015. № 12. С. 115–120.

*Лозовик П. А.* Геохимическая классификация поверхностных вод гумидной зоны на основе их кислотно-основного равновесия // Водные ресурсы. 2013а. Т. 40, № 6. С. 583–593.

*Лозовик П. А.* Продукция и деструкция органического вещества в водных объектах по кинетической модели его трансформации в природных водах // Материалы Всерос. науч. конф. «Водная стихия: опасности, возможности прогнозирования, управления и предотвращения угроз». Новочеркасск, 2013б. С. 348–355.

*Лозовик П. А., Мусатова М. В.* Методика разделения органического вещества природных вод адсорбцией на диэтиламиноэтилцеллюлозе на автохтонную и аллохтонную составляющие // Вестник МГОУ, сер. Естественные науки. 2013. № 3. С. 63–68.

*Лозовик П. А., Ефремова Т. А., Сабылина А. В.* Количественное определение содержания углеводов и липидов в поверхностных водах // Вестник МГОУ. 2013. № 3. С. 57–62.

*Руководство по современным биохимическим методам исследования водных экосистем, перспективных для промысла и марикультуры. М.: ВНИРО, 2004. 123 с.*

*Тимакова Т. М., Сабьлина А. В., Полякова Т. Н. и др. Современное состояние экосистемы Онежского озера и тенденции ее изменения за последние десятилетия // Тр. КарНЦ РАН. 2011. № 4. С. 42–49.*

*Чекрыжева Т. А. Фитопланктон как компонент биоресурсной базы озера // Биоресурсы Онежского озера. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2008. С. 24–36.*

*Унифицированные методы анализа вод. М.: Химия, 1971. 376 с.*

## **ORGANIC MATTER BALANCE IN KARELIAN LAKES**

**M. V. Zobkova, T. A. Efremova, P. A. Lozovik, A. V. Sabylina**

*Northern Water Problems Institute, KarRC RAS*

The quantities and distribution of autochthonous and allochthonous organic matter (OM) in surface waters of large and small Karelian lakes are presented. The main difference between the investigated water bodies was the different content of allochthonous OM, whereas autochthonous OM was quite consistent. The dominant component of allochthonous OM was humic substances (>90 %), including bound carbohydrates, which accounted for 7 % of allochthonous OM. Free carbohydrates (28 %), lipids (3–4 %) and proteins (1,4 %) were determined in autochthonous OM.

## **ОЦЕНКА БИОГЕННОЙ НАГРУЗКИ НА ТРАНСГРАНИЧНОЕ С БЕЛОРУССИЕЙ ОЗЕРО СИНЬША ПО МОДЕЛЬНЫМ РАСЧЕТАМ**

**С. А. Кондратьев, С. Г. Каретников, В. В. Гузиватый**

*Институт озераведения РАН*

В статье представлены материалы исследований по результатам модельных расчетов биогенной нагрузки  $P_{вал}$  и  $N_{общ}$  на трансграничное с Республикой Беларусь оз. Синьша с российской территории водосбора, сформированной эмиссией биогенных веществ из почвы и атмосферными осадками. Произведена оценка критических значений фосфорной нагрузки на оз. Синьша, соответствующих смене его трофического статуса.

На территории бассейна р. Западная Двина, расположенного в Псковской области на границе с Республикой Беларусь, насчитывается большое количество малых озер. Они являются источниками питания притоков, определяющих гидрологическую и гидрохимическую специфику, а также экологическое состояние средних и крупных рек.

По Соглашению между Правительством Российской Федерации и Правительством Республики Беларусь о сотрудничестве в области

охраны и рационального использования трансграничных водных объектов стороны приняли решение о совместной оценке состояния трансграничных водных объектов, а также мерах, необходимых для сокращения трансграничного воздействия.

Целью настоящего исследования является оценка современного состояния трансграничного оз. Синьша бассейна р. Западная Двина, расположенного в Невельском районе Псковской области на границе с Республикой Беларусь.

Основные задачи исследования – оценка биогенной нагрузки, сформированной на российской части водосбора оз. Синьша, анализ и оценка современного состояния водоема, выявление источников его загрязнения. Для решения этой задачи необходимо было определить границы водосбора и распределение типов подстилающей поверхности на водосборе.

Бассейн оз. Синьша расположен на северо-западе европейской территории России на границе Псковской области (РФ) и Витебской области (Беларусь). На территории РФ расположено 90 % площади бассейна. Водосбор находится в умеренном климатическом поясе.

Озеро Синьша является истоком р. Дрисса – правого притока р. Западная Двина. Вместе с пятью другими озерами – Волоба, Глыбо, Дриссы, Островцы и Донское – оно представляет единую водную систему. Главным притоком р. Дрисса и основной рекой бассейна оз. Синьша является р. Уща. Бассейн оз. Синьша расположен в Псковском Поозерье, где преобладают озера холмисто-моренного ландшафта, представляющие собой или скопления вод в понижениях рельефа между холмами, или водоемы, возникшие в результате подпруживания речных долин ледниковыми отложениями. Рассматриваемая территория отличается большим (более 160) количеством малых озер, в основном проточных, с площадью зеркала, как правило, менее 0,1 км<sup>2</sup>.

Для определения границ водосборов исследуемых озер использованы спутниковые данные SRTM (Shuttle radar topographic mission) с разрешением модели 90 м. На рис. 1, а приведено спутниковое изображение рельефа местности с замыкающим створом в истоке р. Дрисса, на которое нанесены линии водосбора, российско-белорусская граница и основной водоток р. Уща.

Наглядное представление о распределении абсолютных отметок рельефа водосбора озера дает гистограмма распределения высот (рис. 1, б). Она свидетельствует о наличии на водосборе двух относительно однородных по высоте территорий. Одна находится на высоте от 155 до 170 м БС и занимает 40 % водосбора, а вторая, с высотами от 195 до 205 м

БС, – 4 % его территории. Средняя высота водосбора составляет 173,3 м БС. По полученным таким образом границам водоразделов площадь водосбора оз. Синьша составила 1704 км<sup>2</sup>, площадь водосбора российской территории – 1527,4 км<sup>2</sup>.

Для расчета площадей, занятых различными типами подстилающей поверхности на водосборах исследуемых озер, использованы спутниковые снимки LandSat-8 TM с разрешением 30 м. К территории водосбора, выделенной из снимка, была применена методика расчета нормализованного относительного вегетационного индекса Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) [Rouse et al., 1974] по формуле:

$$NDVI = \frac{(NIR - Red)}{(NIR + Red)}$$

где NIR – процент отраженной радиации (показание канала снимка) в ближнем инфракрасном диапазоне (Near Infra-Red): 0,76–0,90 мкм, для LandSat-8 это канал B5; Red – процент отраженной радиации (показание канала снимка) в красном диапазоне (Red): 0,63–0,69 мкм, для LandSat-8 это канал B4.

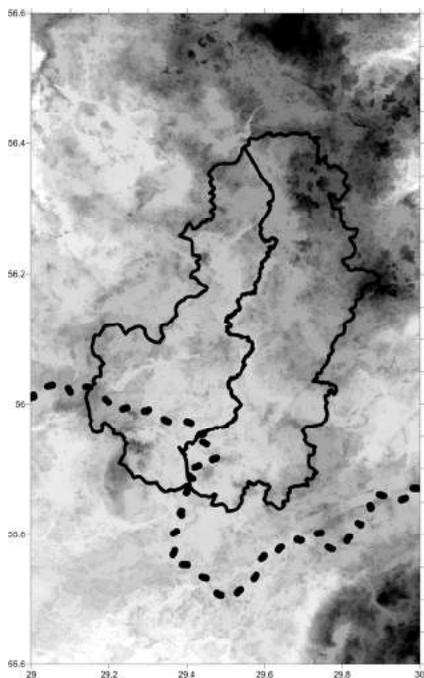
По величинам NDVI на спутниковом снимке были выделены участки, относящиеся к акваториям озер, лесу, лугам, полям и болотам в соответствии с гистограммой (рис. 1, г). Фрагмент снимка LandSat-8, на котором отмечены такие участки, приведен на рис. 1, в.

В пределах выделенной территории водосбора были подсчитаны (табл. 1) площади, занятые озерами, безлесными территориями, кустарниками или лиственным редколесьем и хвойными лесами.

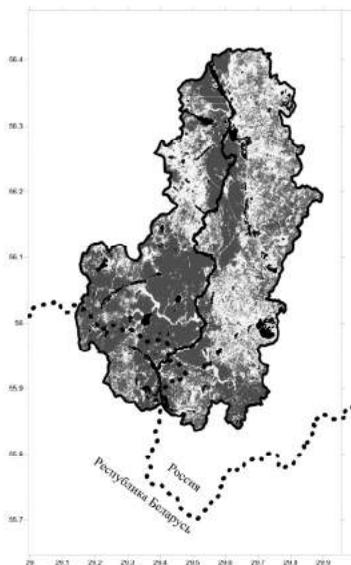
**Таблица 1. Площади различных типов подстилающей поверхности оз. Синьша**

Тип подстилающей поверхности	Площадь, км <sup>2</sup>	%
Озера	80,9	5,3
Поля, луга, болота	603,3	39,5
Леса	843,2	55,2

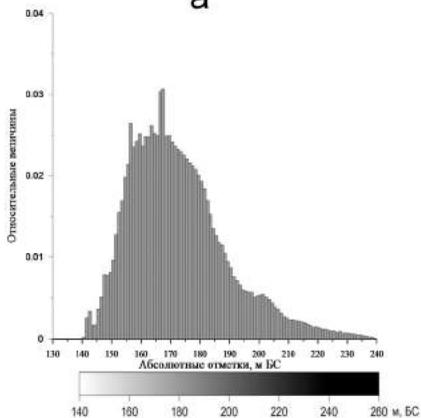
**Оценка биогенной нагрузки на оз. Синьша с российской части водосбора.** В настоящем исследовании для предварительной оценки выноса биогенных веществ с российской части водосбора оз. Синьша использована модель формирования биогенной нагрузки на водные объекты *ILLM – Institute of Limnology Load Model*. Она разработана на основе отечественного и зарубежного опыта моделирования стока, выноса биогенных веществ с водосборных территорий и формирования внешней биогенной нагрузки на водоемы [Кондратьев и др., 2010]. В модели в полной мере учитываются рекомендации ХЕЛКОМ по оценке нагрузки на водные объекты бассейна Балтийского моря [HELCOM, 2005, 2007].



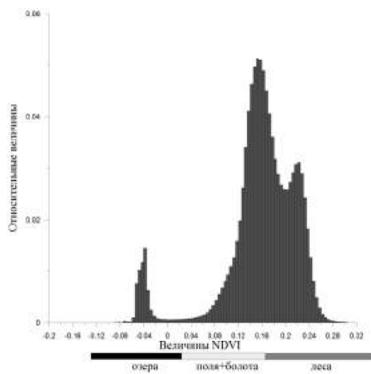
**а**



**в**



**б**



**г**

**Рис. 1.** Спутниковое (SRTM) изображение рельефа (а) с выделенным водоразделом и гистограмма распределения высот водосбора оз. Синьша (б). Распределение угодий фрагмента снимка LandSat-8 11 апреля 2015 г. 9:05 UTC (в), полученное по гистограмме NDVI (г)

Общая структура модели выноса валового фосфора ( $P_{вал}$ ) и общего азота ( $N_{общ}$ ) с водосбора и формирования биогенной нагрузки приведена на рис. 2. Модель учитывает вклад точечных и рассредоточенных источников в формирование биогенной нагрузки на водосбор, позволяет рассчитывать вынос примесей с водосбора с учетом влияния гидрологических факторов и удержания биогенных веществ водосбором и гидрографической сетью. Конечным итогом моделирования является количественная оценка биогенной нагрузки на водоем со стороны водосбора и отдельных ее составляющих.



Рис. 2. Схема модели ILLM, описывающей вынос биогенных веществ с водосбора и формирование внешней биогенной нагрузки на водоемы

Исходная информация о площадях различных типов подстилающей поверхности, формирующих нагрузку, приведена в табл. 1. Значения остальных параметров принимались в соответствии с результатами предыдущих расчетов, выполненных для Псковской области [Кондратьев и др., 2010].

На настоящий момент достоверная информация о точечных источниках загрязнения, а также о наличии на водосборе домашних животных и об объемах выращиваемых сельскохозяйственных культур отсутствует.

Поэтому полученные результаты следует рассматривать как предварительную и, скорее всего, заниженную оценку биогенной нагрузки на оз. Синьша с российской территории водосбора.

В табл. 2 приведены результаты расчетов биогенной нагрузки на российскую часть водосбора оз. Синьша, сформированной эмиссией биогенных веществ из почв и атмосферными выпадениями. Можно сделать вывод, что биогенная нагрузка, сформированная указанными источниками, близка значениям природной (фоновой) нагрузки, что вполне естественно, так как леса на водосборе занимают 67 % площади.

**Оценка критической нагрузки на оз. Синьша.** Нагрузка, как внешняя, так и внутренняя, является основной причиной

загрязнения и эвтрофирования водных объектов. В своем развитии в естественных условиях водные объекты проходят олиготрофное, мезотрофное, эвтрофное и гиперэвтрофное состояния [Россолимо, 1977]. Снятие или снижение биогенной нагрузки не означает возвращения водного объекта в исходное состояние. Однако скорость эвтрофирования может вернуться к значениям, близким к естественным. Загрязнение и эвтрофирование – процессы взаимосвязанные. Загрязнение может оказывать ингибирующее (подавляющее) воздействие на гидробиологические процессы.

Критические значения нагрузки для оз. Синьша, характерной для перехода, например, в эвтрофное (по: Хендерсон-Селлерс, 1987) состояние, составляют 929 т Р/год. При этом проточность для оз. Синьша (приток/объем озера) составляет 16,2.

**Таблица 2. Результаты оценки биогенной нагрузки на оз. Синьша с российской части водосбора, сформированной эмиссией биогенных веществ из почвы и осадками, т/год**

Составляющая нагрузки	Р <sub>вал</sub>	Н <sub>общ</sub>
Нагрузка на водосбор	27,3	534,0
Удержание	19,9	241,0
Нагрузка на озеро	7,4	293,0
Природная составляющая	6,4	145,4

### Литература

Кондратьев С. А., Голосов С. Д., Зверев И. С. и др. Моделирование абиотических процессов в системе водосбор – водоем (на примере Чудско-Псковского озера). СПб.: Нестор-История, 2010. 116 с.

Оценить экологическое состояние и перспективы совместного рационального использования трансграничных водных объектов в бассейне р. Западная Двина (поступающих со стороны Витебской области на территорию России), 2 этап – Договор № 86 (69) РУП «ЦНИИКИВР». Минск, 2010. 87 с.

Россолимо Л. Л. Изменение лимнических экосистем под воздействием антропогенного фактора. М.: Наука, 1977. 144 с.

Хендерсон-Селлерс Б. Инженерная лимнология. Л.: Гидрометеиздат, 1987. 336 с.

*Guidelines for the compilation of waterborne pollution to the Baltic Sea (PLC-water) – HELCOM Publ. Helsinki, Finland, 2005. 80 p.*

*HELCOM Baltic Sea Action Plan – HELCOM Publ. Helsinki, Finland, 2007. 103 p.*

*Rouse J. W., Haas R. H., Schell J. A. et al. Monitoring the vernal advancements and retrogradation of natural vegetation // NASA/GSFC, Final Report, Greenbelt, MD, USA. 1974. P. 1–137.*

## **ESTIMATION OF THE BIOGENIC LOAD ON A TRANSBOUNDARY (RUSSIA AND BELARUS) LAKE SIN'SHA BY MODEL CALCULATIONS**

**S. A. Kondratiev, S. G. Karetnikov, V. V. Guzivaty**

*Institute of Limnology, Russian Academy of Sciences*

The paper presents research materials on the results of model calculations of the bulk phosphorus and total nitrogen load on the Russian side of the transboundary (shared with Belarus) Sin'sha lake catchment, generated by leakage from soil and atmospheric precipitation. The critical values of phosphorus load on Lake Sin'sha were estimated, corresponding to a change in its trophic status.

## **НОРМИРОВАНИЕ ДОПУСТИМОГО АНТРОПОГЕННОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ВОДНЫЕ ОБЪЕКТЫ ПРИ ЕВТРОФИРОВАНИИ, ЗАГРЯЗНЕНИИ И ЗАКИСЛЕНИИ ВОД**

**П. А. Лозовик, Н. Е. Галахина, И. Ю. Кравченко**

*Институт водных проблем Севера КарНЦ РАН*

Рассмотрено нормирование допустимого антропогенного воздействия на водные объекты при евтрофировании, загрязнении и закислении вод. Для нормирования сброса биогенных элементов и органического вещества может быть использована ассимиляционная способность водного объекта в природном состоянии. На величину ассимиляционного потенциала в природном состоянии может быть увеличена антропогенная нагрузка на водоем. Для нормирования допустимой нагрузки токсичными веществами используется методика, учитывающая загрязненность воды и объем стока из водного объекта. Для характеристики степени закисления водного объекта в результате выпадения сильных кислот с атмосферными осадками определяют количество последних, поступающих в объект.

В водных объектах активно протекают процессы трансформации веществ, которые приводят к их удалению из водной среды, и тем самым происходит самоочищение водоемов и водотоков. Оценка ассимиляционного потенциала, или самоочистительной способности, водных объектов предоставляет большой практический интерес, поскольку на его основе может быть осуществлено нормирование поступления веществ от антропогенных источников.

Ассимиляционная способность водного объекта оценивается по истинной скорости трансформации вещества в его воде, и определяется она как произведение концентрации вещества (C) на константу скорости его трансформации (k):

$$v = kC. \quad (1)$$

Для рек ассимиляция ( $As_{рек}$ ) будет выражаться произведением скорости на среднегодовой сток реки в данном створе ( $V_{сток}$ ):  $(As)_{рек} = kC_p \cdot V_{сток}$ . Для озер необходимо учитывать ассимиляцию вещества как в озерной котловине ( $As_{оз}$ ), так и в стоке из озера ( $As_{сток}$ ):

$$(As)_{оз} = kC_{оз} \cdot V_{оз}, \quad (2)$$

$$(As)_{сток} = kC_{оз} \cdot V_{сток}, \quad (3)$$

где  $C_{оз}$  – концентрация вещества в озере. Суммарная ассимиляция вещества в озерных системах будет равна:

$$As = kC_{оз} \cdot (V_{оз} + V_{сток}) = kC_{оз} V_{сток} \cdot (\tau + 1). \quad (4)$$

Последнее уравнение является общим как для озер, так и для рек, только для последних  $\tau = 0$ .

При увеличении нагрузки на величину ассимиляции концентрация вещества в водном объекте составит ( $C_{доп}$ ):

$$C_{доп} = \left[ \frac{C_0}{1-R} + kC_0(\tau+1)(1-R) \right] \quad (5)$$

$$\text{А отношение } \frac{C_{доп}}{C_0} = 1 + k(\tau+1)(1-R) \quad (6)$$

где  $C_0$  – природная концентрация вещества в водном объекте,  $C_{доп}$  – допустимая. Уравнения (5) и (6) являются общими для озер и рек. Только для последних  $R = 0$ ,  $\tau = 0$ . Отношение  $C_{доп}/C_0$  колеблется в очень узких пределах (1,4–1,8) и составляет в среднем 1,58. Полученный коэффициент в точности совпадает с коэффициентом при нормировании антропогенного воздействия по принципу сохранения геохимического класса вод: «допустимая антропогенная нагрузка на водоем не должна приводить к  $\sqrt{2,5}$ -кратному увеличению концентрации вещества по сравнению с его природным содержанием» [Лозовик, 2006].

Указанные выше методические подходы были использованы для установления допустимой фосфорной, органической нагрузок на Ладожское и Онежское озера, Петрозаводскую и Кондопожскую губы, а также на озера Крошозеро и Исо-Пюхярви. Расчеты показали, что допустимые фосфорные нагрузки для Ладожского и Онежского озер составляют 3688 и 802 т/год, соответственно (табл. 1), и они близки к результатам математического моделирования допустимой фосфорной нагрузки [Руховец, Филатов, 2011]. Для остальных объектов, за исключением Кондопожской

губы, современные фосфорные нагрузки близки к допустимым. В Кондопожской губе современная превышает допустимую в 2,5 раза, и для этого объекта требуется снижение фосфорной нагрузки.

**Таблица 1. Фосфорные нагрузки на водные объекты и концентрации  $P_{\text{общ}}$  в них**

Водный объект	$L_{\text{прир}}$	$L_{\text{антр}}$	$L_{\text{доп}}$	$L_{\text{совр}}$	$C_{\text{доп}}$	$C_{\text{набл}}$	$C_{\text{фон}}$	$C_{\text{доп}}/C_{\text{фон}}$
	т/год				мкг/л			
Оз. Онежское	397	405	802	921	10	9	6	1,67
Оз. Ладожское	2098	1590	3688	4507	16	18	10	1,30
Петрозаводская губа	153	71	224	200	20	18	13	1,54
Кондопожская губа	28,1	37,0	65,1	165	12	20	7,5	1,60
Оз. Крошнозеро	3,3	2,1	5,4	5,8	50	53	31	1,61
Оз. Исо-Пюхярви	0,5	0,3	0,8	0,7	17	17	10	1,70

Во всех объектах современные органические нагрузки намного меньше, чем допустимые (табл. 2), и только в оз. Исо-Пюхярви они близки, что связано с проведением мелиорации в бассейне этого озера в 60-е годы прошлого столетия.

**Таблица 2. Органические нагрузки на водные объекты и концентрации  $OB$  в них**

Водный объект	$L_{\text{прир}}$	$L_{\text{антр}}$	$L_{\text{доп}}$	$L_{\text{совр}}$	$C_{\text{доп}}$	$C_{\text{набл}}$	$C_{\text{фон}}$	$C_{\text{доп}}/C_{\text{фон}}$
	т/год				мкг/л			
Оз. Онежское	557 171	404 905	962 076	586 560	12,6	7,5	7,5	1,68
Оз. Ладожское	2 349 000	1 604 416	3 953 410	2 439 780	14,2	8,6	8,6	1,65
Петрозаводская губа	151 040	80 271	23 131	150 656	19,6	12,6	12,7	1,54
Кондопожская губа	53 703	25 730	79 433	83 997	17,2	19,7	11,7	1,47
Оз. Крошнозеро	1382	726	2108	1498	23,1	15,8	15,0	1,54
Оз. Исо-Пюхярви	488	256	744	659	19,1	18,0	13,0	1,47

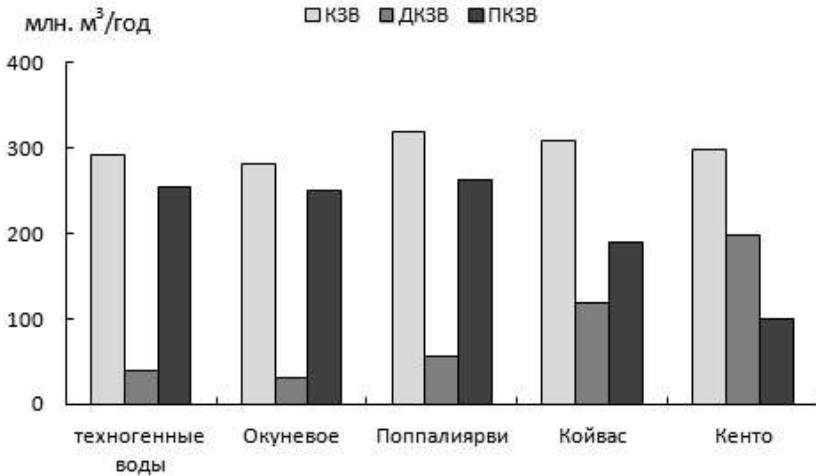
Для нормирования допустимой нагрузки токсичными веществами разработана новая методология, учитывающая загрязненность воды по  $ИЗВ_{\text{рег}}$  и объем стока из водного объекта [Лозовик, Галахина, 2016]. Она может быть применена как для водных объектов, так и для самих сточных вод. Для этих целей используется расчет количества загрязненных вод (КЗВ) в водном объекте или в источнике загрязнения. КЗВ рассчитывается как произведение объема стока на  $ИЗВ_{\text{рег}}$ :

$$КЗВ = ИЗВ_{\text{рег}} \cdot V_{\text{сток}} \quad (7)$$

За допустимое количество загрязненных вод (ДКЗВ) следует принять такой их объем, когда  $ИЗВ_{\text{рег}} = 1,0$ . Фактически ДКЗВ равно водному стоку из объекта. За превышение допустимого количества сброса загрязненных вод (ПКЗВ) принимается разность между КЗВ и ДКЗВ:

$$\text{ПКЗВ} = \text{КЗВ} - \text{ДКЗВ}. \quad (8)$$

Расчеты КЗВ, выполненные для водоемов системы р. Кенти, показали близкие их значения независимо от месторасположения озер (вблизи выпусков техногенных вод или вдали) (рис. 1). В среднем по системе КЗВ составляет 302 млн м<sup>3</sup>/год. Общий объем техногенных вод Костомукшского ГОКа составляет 38,6 млн м<sup>3</sup>/год, а отвечающее им  $\text{ИЗВ}_{\text{рег}} = 7,6$ , тогда КЗВ, рассчитанное для этих вод, будет достигать 293 млн м<sup>3</sup>/год. Это значение близко к КЗВ, рассчитанному для озер системы. Во всех озерах системы р. Кенти наблюдается превышение КЗВ.



**Рис. 1. Количество загрязненных вод, поступающих в систему р. Кенти**

КЗВ для отдельных плесов оз. Имандра (для Большой и Иокостовской Имандры) в среднем составило 3510 млн м<sup>3</sup>/год, а для Бабинской – 990 млн м<sup>3</sup>/год. Превышение КЗВ наблюдается в Большой и Иокостровской Имандрах, тогда как в Бабинской Имандре оно не превышает допустимое благодаря большому разбавляющему эффекту в этой части озера. Следует отметить, что количество загрязненных вод, поступающих в оз. Имандра, на порядок больше, чем поступает в систему р. Кенти.

В чем преимущества предлагаемой системы нормирования сброса загрязняющих веществ? В том, что в ней учитывается как качественная сторона (уровень загрязненности воды), так и количественная (объем стока). При этом не имеет принципиального значения, сбрасывает предприятие сточные воды в малопроточный или в высокопроточный водоток.

Везде количество загрязненных вод будет одинаковым. Только в первом случае будет высоким  $ИЗВ_{пер}$ , но низким расход, а во втором – низкий  $ИЗВ_{пер}$ , но высокий расход. Преимущество данного подхода еще и в том, что плата будет устанавливаться за единицу объема загрязненных вод, а не по каждому веществу в отдельности, как это имеет место в настоящее время.

Одним из факторов антропогенного воздействия на водные объекты является закисление их вод в результате выпадения кислотных атмосферных осадков, а также вследствие поступления кислых вод с отвалов вскрышных пород или с рудников угольных шахт. Закисляющее воздействие может оказывать и вулканическая деятельность.

Для характеристики степени закисления водного объекта (изменения концентрации  $НСО_3^-$ , анионов органических кислот и величины рН) в результате выпадения сильных кислот с атмосферными осадками необходимо определить количество последних, поступающих в объект. Наибольшее влияние на закисление водного объекта могут оказывать талые воды в период весеннего половодья, а также осадки, выпадающие на поверхность озера.

Исходя из гидрологических представлений, за концентрацию сильных кислот в водном объекте ( $b$ ) можно принять произведение их концентрации в атмосферных осадках ( $C_{\text{сильн. к.}}$ ) на долю закисляющих вод весеннего половодья  $Q_{\text{весна}}$  и осадков  $Q_{\text{осадки}}$ , выпадающих на поверхность озера в течение всего года ( $\rho$ ):

$$\rho = (Q_{\text{весна}} + Q_{\text{осадки}})/Q_{\text{сток}}; b = C_{\text{сильн. к.}} \cdot \rho, \quad (9)$$

где  $Q_{\text{сток}}$  – среднегодовой объем стока из озера. В качестве  $C_{\text{сильн. к.}}$  следует принимать концентрацию сильных кислот в зимних осадках в период максимального снегонакопления. Поступление сильных кислот для озер за счет как талых вод весеннего половодья, так и осадков, выпадающих на поверхность озера, будет равно:

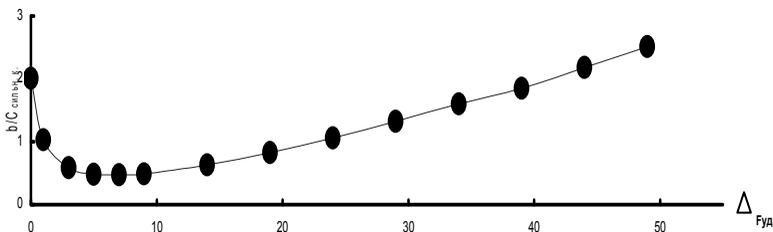
$$b = C_{\text{сильн. к.}} \times (Q_{\text{снег}}/V_{\text{оз}} + Q_{\text{осадки}}/Q_{\text{сток}}), \quad (10)$$

где  $Q_{\text{снег}}$  – объем снегового питания,  $V_{\text{оз}}$  – объем воды в озере,  $Q_{\text{осадки}}$  – количество осадков, выпадающих на поверхность озера в течение года.

Для Карельского гидрографического района с учетом элементов водного баланса озер [Сало, 1991] уравнение (10) преобразуется:

$$b = C_{\text{сильн. к.}} (0,0124\Delta F_{\text{уд}}^{1,34} + 2\Delta F_{\text{уд}}^{-1}), \quad (11)$$

где  $\Delta F_{\text{уд}}$  – удельный водосбор (отношение площади водосбора к площади озера). Уравнение наглядно показывает, что закисляющее действие весеннего половодья пропорционально удельному водосбору, а атмосферных осадков, выпадающих на зеркало озера, обратно пропорционально  $\Delta F_{\text{уд}}$  (рис. 2).



**Рис. 2.** Зависимость максимального поступления сильных кислот в озера от их удельного водосбора в период весеннего половодья и за счет осадков, выпадающих на поверхность озера

В качестве примера рассмотрены три озера, расположенные в Карелии и отличающиеся между собой по гидрологическим показателям и буферной емкости ( $\beta$ ). Расчет изменения содержания гидрокарбонатов и pH воды выполнен для двух случаев: первый отвечает современному уровню содержания сильных кислот в осадках ( $\text{pH}_{\text{осадков}} = 4,82$ ), второй – гипотетическому, когда pH осадков равняется 4,5 (табл. 3).

**Таблица 3.** Изменение щелочности и pH воды для различного уровня поступления сильных кислот

Озеро	$\beta$ , ммоль-экв/л	$\text{pH}_{\text{осадков}} = 4,82$			$\text{pH}_{\text{осадков}} = 4,50$		
		$b$ , ммоль-экв/л	$\Delta\text{Alk}$ , мг $\text{HCO}_3^-$ /л	$\Delta\text{pH}$	$b$ , ммоль-экв/л	$\Delta\text{Alk}$ , мг $\text{HCO}_3^-$ /л	$\Delta\text{pH}$
Салонъярви	0,07	0,026	1,6	0,37	0,055	3,4	0,78
Лижменское	0,06	0,007	0,4	0,09	0,014	0,9	0,62
Укшезеро	0,18	0,005	0,3	<0,01	0,009	0,5	0,01

Как видно из представленных данных, наибольшему закислению в современный период подвержено высокопроточное оз. Салонъярви за счет поступления кислых талых вод с водосбора. Наиболее устойчивым к закислению является оз. Укшезеро, имеющее наибольшую буферную емкость воды. В случае увеличения кислотной нагрузки ( $\text{pH}_{\text{осадков}} = 4,50$ ) закисленными уже будут озера Салонъярви и Лижменское, тогда как оз. Укшезеро по-прежнему будет устойчиво к закислению в связи с высокой буферной емкостью его воды.

### Литература

Лозовик П. А. Гидрогеохимические критерии состояния поверхностных вод гумидной зоны и их устойчивости к антропогенному воздействию: Автореф. дис. ... докт. хим. наук. М., 2006. 56 с.

Лозовик П. А. Оценка ассимиляционной способности к фосфорной и органической нагрузкам и нормирование допустимого антропогенного воздействия на водные объекты по кинетической и гидрогеохимической моделям // Крупнейшие озера-водохранилища Северо-Запада европейской территории России: современное состояние и изменения экосистем при климатических и антропогенных воздействиях. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2015. С. 88–95.

Лозовик П. А., Галахина Н. Е. Последствия антропогенного влияния на водные объекты района Костомукши // Роль науки в решении проблем региона и страны: фундаментальные и прикладные исследования. Материалы Всерос. науч. конф. с междунар. участием, посвящ. 70-летию КарНЦ РАН. Петрозаводск, 2016. С. 25–27.

Руховец Л. А., Филатов Н. Н. Использование математических моделей для решения задач сохранения водных ресурсов Онежского озера // Тр. КарНЦ РАН. 2011. № 4. С. 77–87.

Сало Ю. А. Гидрология водоемов. Структура многолетнего водного баланса // Поверхностные воды озерно-речной системы Шуи в условиях антропогенного воздействия. Петрозаводск: Карелия, 1991. С. 33–36.

## THE RATIONING OF PERMISSIBLE HUMAN IMPACT ON WATER OBJECTS BY EUTROPHICATION, POLLUTION AND ACIDIFICATION OF WATERS

P. A. Lozovik, N. E. Galakhina, I. Yu. Kravchenko

*Northern Water Problems Institute, KarRC RAS*

The rationing of permissible human impact on water objects by eutrophication, pollution and acidification of waters was considered. The assimilative capacity of a water body in its natural state can be used for setting the limits of nutrient and organic matter discharges. Anthropogenic load on the water body can be increased by the value of the assimilative capacity in a natural state. The technique taking into account the impurity of water and runoff from the water body can be used to set the permissible levels of toxic loading. The amounts of strong acids from atmospheric fallout are determined to characterize the degree of acidification of the water body.

## ФОРМИРОВАНИЕ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА ВОДЫ ОЗЕР ГУМИДНОЙ ЗОНЫ

П. А. Лозовик, И. Ю. Кравченко, Н. Е. Галахина, А. В. Рыжаков

*Институт водных проблем Севера КарНЦ РАН*

Рассмотрены процессы формирования химического состава воды озер гумидной зоны. Установлено, что атмосферные осадки являются источником хлоридов, сульфатов и биогенных элементов в поверхностных водах. Сульфатное выщелачивание стало причиной изменения ионного состава воды озер и рек района Костомукши. Рассчитаны константа скорости и скорость трансформации лабильных

веществ в природных водах. Получены константы скоростей превращения форм азота, определена щелочная фосфатазная активность в воде озер Карелии. По новой кинетической модели проведена оценка продукции и деструкции ОВ в водных объектах.

Химический состав озер формируется в результате поступления в озеро речных вод, атмосферных осадков, выпадающих на поверхность озера, а также под влиянием точечных и рассеянных источников загрязнения. Немаловажная роль принадлежит и внутриводоемным процессам.

Атмосферные осадки, выпадающие на водосборную территорию, вносят существенный вклад в формирование химического состава озерных вод. В результате выщелачивания компонентов происходит обогащение осадков литофильными элементами (Fe, Si, Al, Mn), органическим веществом (ОВ), биогенными элементами (БЭ) и солями. При сравнении химических выпадений и удельного химического выноса с водосборной территории Карелии оказалось, что удельный химический сток минеральных и органических веществ практически одинаковый, но превышает атмосферное поступление этих веществ на сушу в 8–9 раз (табл. 1). Кремний и железо в речные воды поступают, главным образом, с водосборного бассейна, и их атмосферная составляющая незначительна. По фосфору общему 70 % приходится на атмосферное поступление и 30 % – терригенное. Из минеральных компонентов с атмосферными осадками поступает 80 % хлоридов и 60 % сульфатов.

**Таблица 1. Химические выпадения и удельный вынос веществ с территории Карелии**

Показатель	$\Sigma_{и}$	ОВ	Fe	Si	N-NO <sub>3</sub>	N <sub>орг</sub>	N-NH <sub>4</sub>	N <sub>общ</sub>	P <sub>общ</sub> , мг/м <sup>2</sup> в год
	г/м <sup>2</sup> -год								
Средний удельный вынос	7,8	8,5	0,18	0,51	0,015	0,14	0,025	0,18	0,007
Средние выпадения	1,2	1,1	0,02	0,008	0,12	0,05	0,04	0,24	0,006
Средние поступления	6,6	7,4	0,16	0,50	-0,11	0,09	-0,015	-0,06	0,001

Вынос азота общего с водосборной территории несколько меньше, чем его поступление с атмосферными осадками. В то же время нитратов и аммония выносятся в меньших количествах, чем приносятся с атмосферными осадками, тогда как азота органического – наоборот. Связано это с тем, что аммоний и нитраты потребляются на суше наземной растительностью, переходят в органические формы, которые затем, после частичного разложения ОВ, выносятся с суши в океан.

К техногенно-природным факторам формирования вод можно отнести сульфатное выщелачивание, сопровождающееся образованием кислой среды, способствующей активному поступлению в воду тяжелых металлов и Al, и быстрое осаждение их гидроксидов в результате нейтрализации этих вод при выходе на дневную поверхность. Такая картина наблюдается в водных объектах района Костомукши, подверженных влиянию Костомукшского горно-обогатительного комбината (ГОК), деятельность которого связана с производством железных окатышей из руды Костомукшского и Корпангского месторождений. В кислой фильтрационной воде из отвалов комбината (рН 4,5) отмечается очень высокое содержание Ni (3910 мкг/л), Li (137 мкг/л), Mn (24,4 мг/л) и Al (29,2 мг/л), тогда как уже в поверхностном источнике вблизи отвалов (рН 6,9) концентрации Ni и Al резко падают до 465 и 18 мкг/л, соответственно.

Кроме того, сульфатное выщелачивание стало причиной изменения ионного состава водных объектов района Костомукши. Так, если в природном состоянии водоемы системы р. Кенти являлись гидрокарбонатными кальциево-магниевыми, то в результате функционирования комбината по всей системе сформировался сульфатно-калийевый тип вод [Кулакова, Лозовик, 2012].

В озерных системах активно протекают внутриводоемные процессы, которые способствуют изменению состава поступающих в них приточных вод. К таким процессам следует отнести трансформацию лабильных веществ, круговорот БЭ и продукционно-деструкционные процессы.

Для озерных систем получено кинетическое уравнение, позволяющее установить константу скорости трансформации лабильных веществ ( $k$ ) с учетом удерживающей способности озер ( $R$ ) и периода их водообмена ( $\tau$ ) [Лозовик и др., 2011]:

$$k = \frac{R}{(1 - R\tau^{-1})\tau} \quad (1)$$

Если рассмотреть изменчивость констант скорости трансформации, то в большинстве случаев отмечаются более низкие их значения в больших озерах с замедленным водообменом (0,10–0,41 год<sup>-1</sup>), чем в малых (0,21–0,97 год<sup>-1</sup>).

Необходимо обратить внимание еще на одну особенность констант: близкие их значения для  $R_{\text{общ}}$ ,  $OB$ ,  $N_{\text{орг}}$  (для больших в среднем 0,16, для малых – 0,43 год<sup>-1</sup>). По-видимому, для этих компонентов имеет место близкий механизм их трансформации. Для Fe константы более высокие, чем для указанных выше компонентов, а для Si – они занимают промежуточное положение между Fe и остальными компонентами. Имеющиеся данные по константам трансформации, концентрациям веществ в озерной воде позволяют вычислить скорости трансформации лабильных веществ

(табл. 2). Как видно из табл. 2, с увеличением периода водообмена озер скорости трансформации всех компонентов уменьшаются. Полученные данные по скорости трансформации лабильных веществ позволяют сгруппировать озера в зависимости от их водообмена в три группы:

1) большие озера с замедленным водообменом (Онежское, Ладожское, Сегозеро,  $\tau_{cp} = 12,4$  года);

2) озера со средним водообменом (Сямозеро, Вендюрское,  $\tau_{cp} = 2,71$  года);

3) озера с водообменом около года (Исо-Пюхьярви, Остер, Селецкое, Крошнозеро, Пряжинское, Водлозеро,  $\tau_{cp} = 0,92$  года).

**Таблица 2. Константы скорости ( $k$ , год<sup>-1</sup>) и скорости ( $v$ , мг/л в год) трансформации лабильных веществ в озерных системах**

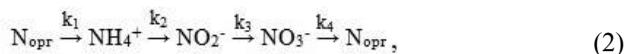
Озеро	ОВ		N <sub>орг</sub>		Fe <sub>общ</sub>		Si		P <sub>общ</sub>	
	k	v	k	v	k	v	k	v	k	v, мкг/л в год
Онежское	0,14	0,87	0,10	0,016	0,41	0,029	0,27	0,068	0,14	1,26
Ладожское	0,17	1,46	0,16	0,027	0,21	0,025	0,20	0,108	0,13	2,34
Сегозеро	0,18	1,15	0,19	0,027	0,43	0,039	0,05	0,060	0,18	1,08
<b>Большие озера</b>	<b>0,16</b>	<b>1,16</b>	<b>0,15</b>	<b>0,023</b>	<b>0,35</b>	<b>0,031</b>	<b>0,17</b>	<b>0,079</b>	<b>0,15</b>	<b>1,56</b>
Сямозеро	0,27	3,24	0,21	0,065	0,43	0,095	0,32	0,320	0,24	3,84
Вендюрское	0,42	3,02	0,26	0,075	0,76	0,114	–	–	0,16	3,04
<b>Средние озера</b>	<b>0,35</b>	<b>3,13</b>	<b>0,24</b>	<b>0,070</b>	<b>0,60</b>	<b>0,105</b>	<b>0,32</b>	<b>0,320</b>	<b>0,20</b>	<b>3,44</b>
Исо-Пюхьярви	0,33	5,94	0,25	0,140	0,40	0,232	0,37	0,888	0,38	6,46
Остер	0,42	5,38	0,31	0,112	0,82	0,164	0,06	0,096*	0,38	5,32
Селецкое	0,55	6,77	0,52	0,166	0,85	0,255	0,04	0,068*	0,52	5,72
Крошнозеро	0,51	8,06	0,49	0,240	0,85	0,298	0,80	1,040	0,63	33,39**
Пряжинское	0,70	11,06	0,17	0,058	0,45	0,216	1,17	1,053	0,44	20,24**
Водлозеро	0,74	15,32	0,97	0,281	1,30	0,663	1,23	0,603	0,57	18,24**
<b>Малые озера</b>	<b>0,54</b>	<b>8,76</b>	<b>0,45</b>	<b>0,166</b>	<b>0,78</b>	<b>0,304</b>	<b>0,61</b>	<b>0,896*</b>	<b>0,49</b>	<b>5,83**</b>

*Примечание.* \* – без учета озер Остер, Селецкое, \*\* – без учета эвтрофных озер Крошнозеро, Пряжинское и Водлозеро.

Установленные значения скоростей трансформации по группам озер были сопоставлены со средней величиной коэффициента их условного водообмена, который является обратным периоду водообмена озер ( $1/\tau$ ). Наблюдается очень высокая степень линейной корреляции между скоростью трансформации и коэффициентом условного водообмена (коэффициент корреляции более 0,99). Этот факт позволяет констатировать, что скорость трансформации лабильных веществ зависит в первую очередь от периода водообмена озер: чем он меньше, тем выше скорость. Основная причина уменьшения  $v$  с ростом  $\tau$  заключается в том, что, чем выше  $\tau$  озера, тем более трансформированы в нем вещества и тем медленнее протекает процесс их превращения.

Полученные линейные зависимости позволяют установить предельные минимальные скорости трансформации веществ при  $\tau \rightarrow \infty$ . При  $\tau \rightarrow \infty$  получены следующие значения скоростей трансформации (мкг/л в год):  $v_{OB} = 460$ ,  $v_{P_{общ}} = 1,3$ ,  $v_{Fe} = 7$ ,  $v_{N_{орг}} = 15$ ,  $v_{Si} = 29$ . Как видно, эти скорости, за исключением OB, очень низкие, на уровне единиц мкг и десятков мкг в литре воды в год. По-видимому, это предельные скорости, и они будут наблюдаться в объектах с очень большим периодом водообмена. В то же время следует отметить, что процесс трансформации веществ в объектах гидросферы никогда не прекращается, и он является закономерным явлением в природе.

Круговорот БЭ имеет огромное значение в озерных экосистемах для обеспечения потребностей живых организмов в их минеральных формах. Динамика изменения состава и соотношения различных соединений азота определяется интенсивностью их биохимической (бактериальной) трансформации в результате протекания внутриводоемного круговорота, представляющего собой циклическую цепь последовательных реакций первого порядка:



где  $k_1, k_2, k_3, k_4$  – константы скоростей аммонификации, первой и второй стадии нитрификации и потребления нитратов водными организмами, которые равны 0,04, 0,34, 2,35 и 1,8 сутки<sup>-1</sup>, соответственно. Эти величины были получены методом лабораторного моделирования и анализа натуральных данных с использованием кинетической модели Эмануэля-Кнорре последовательных реакций первого порядка на примере разнотипных озер Карелии.

Сравнивая между собой значения  $k$  для различных процессов, можно сказать, что они находятся в обратной зависимости от концентраций соединений азота, которые являются исходными для соответствующих стадий цикла. Так, наименьшей константой скорости является  $k_1$ , а наибольшей –  $k_3$ . Поэтому для большинства водных объектов Карелии содержание  $N_{орг}$  значительно превалирует над другими, а ионы  $NO_2^-$  не успевают накапливаться, и их концентрация всегда остается на очень низком уровне.

Что касается фосфора, то его трансформация связана с превращением органической формы в минеральную. Проведенные исследования щелочной фосфатазной активности (ЩФА) и скорости оборота фосфора в воде Онежского и Ладожского озер позволили выявить сезонную и температурную зависимость ЩФА. Наименьшая активность ЩФА наблюдается в зимний подледный период и равна всего 0,013 мкМ Р л<sup>-1</sup> ч<sup>-1</sup>.

В этих условиях скорость оборота фосфора составляет 17,4 часа. Максимальных значений ЩФА достигает осенью (0,19 мкМ Р л<sup>-1</sup> ч<sup>-1</sup>) в период наибольшего накопления лабильного ОВ в озерах. При повышении температуры наблюдается лишь небольшое увеличение активности щелочной фосфатазы в воде – от 0,018 при 2 °С до 0,026 мкМ Р л<sup>-1</sup> ч<sup>-1</sup> при 22 °С. В придонных слоях Ладожского и Онежского озер как ЩФА, так и КФА в несколько раз ниже, чем в поверхностном, что является проявлением фотосинтетической активности планктона и замедленности продукционно-деструкционных процессов на глубине.

Для оценки продукции и деструкции ОВ в водных объектах предложен новый кинетический метод, основанный на кинетике БПК и показателях содержания и трансформации автохтонного ОВ [Лозовик, 2013]. Этот метод базируется на том, что результатом протекания продукционно-деструкционных процессов является образование автохтонного ОВ.

Общая деструкция ОВ вычисляется по БПК<sub>полн</sub> и константе скорости потребления О<sub>2</sub> (K):

$$D_{\text{общ}} = \text{БПК}_{\text{полн}} (1 - e^{-Kt}) \quad (3)$$

Продукция (P) и деструкция автохтонного ОВ (D<sub>авт</sub>) рассчитывается по уравнениям:

$$P = \rho_{\text{авт}} \text{ХПК} (e^{k_{\text{авт}}t} - 1) \quad (4), \quad D_{\text{авт}} = \rho_{\text{авт}} \text{ХПК} (1 - e^{-k_{\text{авт}}t}), \quad (5)$$

где  $\rho_{\text{авт}}$  – доля автохтонного ОВ, ХПК – химическое потребление кислорода,  $k_{\text{авт}}$  – константа скорости окисления автохтонного ОВ.

Деструкцию аллохтонного ОВ (D<sub>алл</sub>) можно определить по разности общей деструкции и деструкции автохтонного ОВ:

$$D_{\text{алл}} = D_{\text{общ}} - D_{\text{авт}} \quad (6)$$

Новообразование ОВ и выделение О<sub>2</sub> в водную среду в результате протекания продукционно-деструкционных процессов можно установить по разности продукции и деструкции автохтонного ОВ:

$$\text{Новообр. ОВ} + \text{O}_2 = P - D_{\text{авт}} = \rho_{\text{авт}} \text{ХПК} (e^{k_{\text{авт}}t} + e^{-k_{\text{авт}}t} - 2) \quad (7)$$

На основании опытов по кинетике БПК удается получить БПК<sub>полн</sub> и K. Эти опыты проводятся при двух температурах (10 и 20 °С), что позволяет получить температурный коэффициент скорости потребления О<sub>2</sub>:

$$\gamma = \frac{(V_{\text{O}_2})_{20}}{(V_{\text{O}_2})_{10}} \quad (8)$$

Далее с использованием этого коэффициента и среднесезонной температуры воды в водном объекте можно найти продукционно-деструкционные параметры для каждого из сезонов года:

$$(D_{\text{общ}})_г = (D_{\text{общ}})_{20} / \gamma^{\frac{20-t}{10}} \quad (9)$$

$$P_t = (P)_{20} / \gamma^{\frac{20-t}{10}} \quad (10)$$

$$(D_{\text{авт}})_г = (D_{\text{авт}})_{20} / \gamma^{\frac{20-t}{10}} \quad (11)$$

Проинтегрировав сезонные значения продукционно-деструкционных характеристик, можно получить их годовые величины.

Исследование продукции и деструкции ОВ было проведено на 23 водных объектах Карелии по различным сезонам года в 2012–2015 гг., для которых получены продукционно-деструкционные характеристики (табл. 3). Как видно из табл. 3,  $D_{\text{авт}}$  всегда несколько меньше, чем годовая продукция, а в общую деструкцию основной вклад вносит автохтонное ОВ, тогда как доля аллохтонного ОВ меньше в связи с низкой скоростью его трансформации. Продукция составляет 80–90 % от общей деструкции. Меньший процент характерен для высокогумусных озер, больший – для низкогумусных.

**Таблица 3. Среднегодовые продукционно-деструкционные характеристики водных объектов Карелии, исследованных в 2012–2015 гг.**

Год	$(P)_{\text{год}}$	$(D_{\text{авт}})_{\text{год}}$	$(D_{\text{общ}})_{\text{год}}$	$(D_{\text{алл}})_{\text{год}}$	$(\text{OB}+\text{O}_2)_{\text{год}} \cdot 10^3$	$P_{\text{г}}/D_{\text{общ}}$	$D_{\text{алл}}/D_{\text{авт}}$
	Мг $\text{O}_2/\text{л}$ в год					%	
2012	25,6	24,7	26,8	2,2	929	91	14
2013	12,7	12,4	15,4	4,5	373	79	22
2014	9,9	6,9	13,4	3,0	102	78	23
2015	8,2	8,1	9,5	1,8	96	87	13
Среднее за 4 года	14,1	13,0	16,3	2,9	375	84	18

Полученные кинетические параметры по круговороту и трансформации веществ, а также по продукционно-деструкционным процессам позволяют сравнить их интенсивность протекания в водной среде, на примере Онежского озера. Самые низкие константы скорости характерны для трансформации лабильных веществ (время их полупревращения составляет годы). Круговорот веществ протекает на порядки быстрее, а время их полупревращения – в течение суток – двух недель. Продукционно-деструкционные процессы, судя по константе скорости потребления  $\text{O}_2$ , по своей интенсивности занимают промежуточное положение (время половинного потребления кислорода составляет около месяца).

### Литература

Кулакова Н. Е., Лозовик П. А. Анализ влияния Костомукшского горно-обогатительного комбината на окружающую среду с учетом природно-техногенных факторов формирования и трансформации вод // Вода: химия и экология. 2012. № 2. С. 18–25.

Лозовик П. А. Продукция и деструкция органического вещества в водных объектах по кинетической модели его трансформации в природных водах // Материалы Всерос. науч. конф. «Водная стихия: опасности, возможности прогнозирования, управления и предотвращения угроз». Новочеркасск, 2013. С. 348–355.

Лозовик П. А., Рыжаков А. В., Сабылина А. В. Процессы трансформации, круговорота и образования веществ в природных водах // Труды КарНЦ РАН. 2011. № 4. С. 21–28.

## **FORMATION OF THE CHEMICAL COMPOSITION OF LAKE WATERS IN THE HUMID ZONE**

**P. A. Lozovik, I. Yu. Kravchenko, N. E. Galakhina, A. V. Ryzhakov**

*Northern Water Problem Institute, KarRC RAS*

The formation processes of the chemical composition of water in lakes of the humid zone are considered. It was established that atmospheric precipitation is a source of chlorides, sulfates and nutrients in surface waters. Sulfate leaching has modified the water ionic composition of lakes and rivers in the Kostomuksha area. The rate constant and the rate of labile substances transformation in natural waters were calculated. The rate constants of nitrogen forms transformation and alkaline phosphatase activity in lakes of Karelia were determined. Organic matter production and destruction in water bodies were estimated by a new kinetic model.

## **СОДЕРЖАНИЕ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ И НЕФТЯНЫХ УГЛЕВОДОРОДОВ В ВОДЕ ЛАДОЖСКОГО ОЗЕРА**

**О. А. Ляшенко, Е. С. Светашова, С. Б. Екимова, А. М. Пономаренко**

*Государственный научно-исследовательский институт озерного  
и речного рыбного хозяйства им. Л. С. Берга*

Результаты исследований содержания тяжелых металлов и нефтяных углеводородов в воде Ладожского озера показали, что за период наблюдений 2005–2016 гг. концентрация кадмия изменялась от 0 до 21 мкг/л, свинца – от 0 до 66 мкг/л, меди – от 0 до 45 мкг/л; марганца – от 1 до 62 мкг/л, цинка – от 1 до 98 мкг/л, нефтяных углеводородов – от 30 до 290 мкг/л. Наибольшие концентрации металлов и нефтяных углеводородов отмечены в южном прибрежном и южном деklinальном участках. Межгодовые вариации средних концентраций тяжелых металлов и нефтяных углеводородов в воде озера не выявили определенной тенденции их изменения.

Исследовали содержание тяжелых металлов и нефтяных углеводородов в воде Ладожского озера в 2005–2016 гг. В южном прибрежном районе озера располагалось 8 станций: 3 – в южном деklinальном районе, 3 – в северном деklinальном, 2 – в северном прибрежном, по одной – в профундальном и ультрапрофундальном районе [Ладожское..., 1992; Рязанова, 2000].

Пробы воды отбирали батометром Паталаса из поверхностного слоя. Выбор перечня тяжелых металлов для анализа обусловливался их высокой токсичностью для водных организмов и значительными концентрациями в воде водоемов Северо-Запада.

Определяли содержание цинка (2005–2012 гг.), кадмия, свинца, меди (2005–2016 гг.) и марганца (2013–2016 гг.). Анализ проб для определения содержания тяжелых металлов осуществлялся методом инверсионной вольтамперометрии и атомно-абсорбционным методом по утвержденным методикам [Методика..., 2000, 2003, 2008].

Содержание нефтяных углеводородов определяли методом ИК-спектрофотометрии по утвержденной методике [Методика..., 1995]. Уровень загрязнения проб воды тяжелыми металлами и нефтепродуктами оценивали сравнением их концентраций с нормативом – предельно допустимой концентрацией (ПДК) в воде рыбохозяйственных водоемов [Приказ..., 2010].

Концентрации металлов и нефтяных углеводородов (НУ) в воде озера в период исследований существенно варьировали в пространственном отношении. Наибольшие концентрации металлов и нефтяных углеводородов отмечались в южном прибрежном участке (табл.), где расположены Волховская и Свирская губы, принимающие воды наиболее крупных притоков – рек Волхов и Свирь, и где наблюдались превышения ПДК всех проанализированных металлов, в том числе максимальные из отмеченных для меди – до 45 ПДК, цинка – до 9,7 ПДК, кадмия – до 4,2 ПДК, марганца – до 6,1 ПДК.

#### **Пределы изменения концентраций тяжелых металлов и нефтяных углеводородов в различных районах Ладожского озера в 2005–2016 гг., мкг/л**

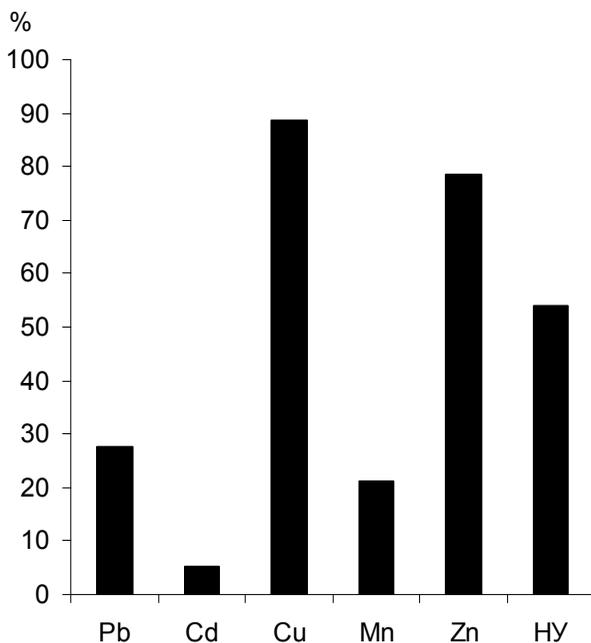
Район	Металлы					НУ
	Cd	Pb	Cu	Mn	Zn	
Южный прибрежный	0–21,0	0–47,0	0,3–45,0	2–61,0	2,0–97,0	30–290
Южная деклиналь	0–0,4	0–66,0	0,9–9,0	0,7–25,0	8,0–98,0	40–120
Северная деклиналь	0–2,0	0–4,0	0,8–3,0	1,0–33,0	8,0–50,0	50–120
Северное прибрежье	0–0,1	0, 2–1,4	0,2–2,3	1,7–3,0	–	40–70
Профундаль	0–0,2,0	0–15,0	0,6–6,0	1,4–6,1	11–91	40–100
Ультрапрофундаль	0–0,2	1,4–7,0	0,1–2,0	0,9–2,0	–	40

Повышенные концентрации металлов отмечены также в южной деклинальной зоне, куда выносятся из заливов поступающие в них загрязняющие вещества. Здесь отмечены превышения ПДК всех металлов, за

исключением кадмия, причем концентрация свинца достигала максимальной величины – 11 ПДК.

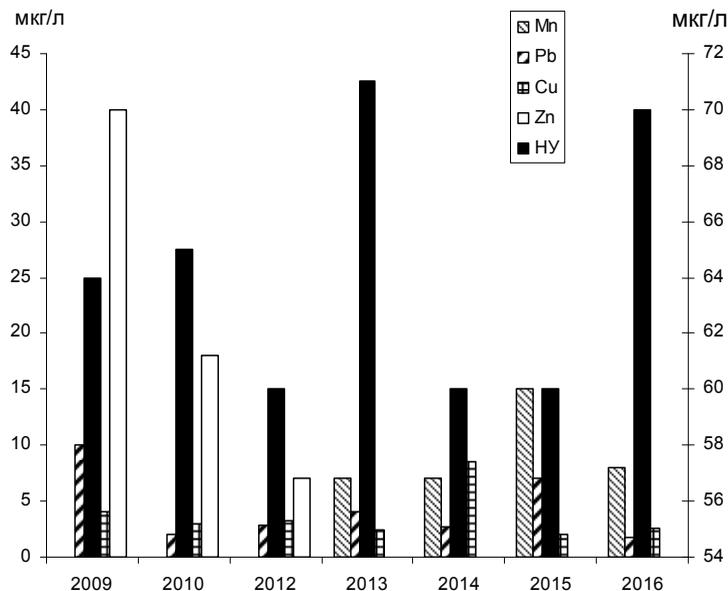
Превышения ПДК свинца отмечены также в профундальной зоне, марганца – в северной деклинальной, цинка – в профундальной и северной деклинальной. Превышения ПДК меди отмечены на всей исследованной акватории озера (табл.). Максимальные концентрации НУ (до 5,8 ПДК) отмечены в южном прибрежном районе, минимальные – в профундали и северном побережье, где они не превышали ПДК (табл.).

Наибольшая доля проб с превышением ПДК содержания металла была отмечена для меди, а наименьшая – для кадмия (рис. 1). Превышения ПДК этого металла были отмечены только в 2005 г., а в последние годы наблюдений его концентрации преимущественно были ниже предела обнаружения. Концентрации нефтяных углеводородов были выше ПДК более чем в 50 % проб, однако абсолютное большинство среди них (85 %) составляли пробы, концентрация НУ в которых не превышала 2 ПДК.



**Рис. 1.** Доля проб воды Ладожского озера с превышением ПДК содержания тяжелых металлов и нефтяных углеводородов за период наблюдений 2005–2016 гг.

Межгодовые вариации средних концентраций тяжелых металлов и НУ не выявили определенной тенденции их изменения (рис. 2). Тенденция к снижению концентраций от 2009 к 2012 г. отмечена только для концентрации цинка.



**Рис. 2.** Средние по годам концентрации тяжелых металлов (ось ординат слева) и нефтяных углеводородов (ось ординат справа)

Таким образом, за период наблюдений 2005–2016 гг. концентрация кадмия в воде Ладожского озера изменялась от 0 до 21 мкг/л и в среднем составила  $1 \pm 0$  мкг/л; свинца – от 0 до 66 мкг/л, в среднем –  $7 \pm 1$  мкг/л; меди – от 0 до 45 мкг/л, в среднем –  $4 \pm 1$  мкг/л; марганца – от 1 до 62 мкг/л, в среднем –  $9 \pm 2$  мкг/л; цинка – от 1 до 98 мкг/л, в среднем –  $31 \pm 3$  мкг/л, нефтяных углеводородов – от 30 до 290 мкг/л, в среднем –  $66 \pm 4$  мкг/л.

Концентрации металлов и НУ распределены неравномерно, что связано как с наличием близости источников поступления в озеро, так и с гидрологическими условиями на определенной акватории в период отбора проб. Наибольшие концентрации металлов и нефтяных углеводородов отмечены в южном прибрежном и южном деklinальном участках. Приуроченность повышенных концентраций загрязняющих веществ к районам впадения крупных притоков, особенно – Волховской губе, принимающей загрязненные воды р. Волхов, известна по литературным данным [Ладога, 2013].

Различия концентрации металлов и НУ в воде озера по годам, отмеченные по данным наших исследований, вероятно, в первую очередь обусловлены различием водности лет и массы загрязняющих веществ, поступающих с водосбора и с осадками. Наблюдавшееся с 2009 по 2012 г. снижение концентрации цинка в воде озера не позволяет сделать определенные выводы о динамике содержания этого металла ввиду отсутствия наблюдений в последующие годы.

По результатам наблюдений 1991–2011 гг. была отмечена тенденция к увеличению концентрации (в среднем до 0,1 мг/л) нефтяных углеводородов в поверхностном слое воды озера [Ладога, 2013]. По нашим данным подобной тенденции не отмечается, максимальные средние концентрации – 71–70 мкг/л – наблюдались в 2013 и 2016 гг.

### Литература

- Ладога.* СПб., 2013. 568 с.
- Ладожское озеро – критерии состояния экосистемы.* СПб.: Наука, 1992. 328 с.
- Методика* выполнения измерений массовой концентрации нефтепродуктов в природных и сточных водах методом ИКС. М., 1995. 9 с.
- Методика* выполнения измерений содержания кадмия, свинца, меди в природных и очищенных сточных водах методом инверсионной вольтамперометрии. ПНД.Ф.14.1:2.174-2000. М., 2000. 32 с.
- Методика* выполнения измерений массовой концентрации цинка в природных, питьевых и очищенных сточных водах методом инверсионной вольтамперометрии. ПНД Ф 14.1:2:4.198-03. М., 2003. 29 с.
- Методика* количественного химического анализа М 03-505-119-08. Определение металлов в питьевой, минеральной, природной, сточной воде и в атмосферных осадках атомно-абсорбционным методом. 2008. 24 с.
- Приказ* Федерального агентства по рыболовству «Об утверждении нормативов качества воды водных объектов рыбохозяйственного значения, в том числе нормативов предельно допустимых концентраций вредных веществ в водах водных объектов рыбохозяйственного значения» от 18 января 2010 г. М., 2010. 204 с.
- Рязанова Н. Е.* Оценка состояния геосистемы Ладожского озера // Проблемы региональной экологии. 2000. № 3. С. 32–42.

### THE LEVELS OF HEAVY METALS AND PETROLEUM HYDROCARBONS IN LAKE LADOGA WATER

**O. A. Lyashenko, E. A. Svetashova, S. B. Yekimova, A. M. Ponomarenko**

*Berg State Research Institute on Lake and River Fisheries*

Heavy metals and petroleum hydrocarbons content in Lake Ladoga water was studied in 2005–2016. According to these studies, the concentrations varied as follows: 0 to 21 µg/l for cadmium, 0 to 66 µg/l for lead, 0 to 45 µg/l for copper, 1 to 62 µg/l for

manganese, 1 to 98 µg/l for zinc, 30 to 290 µg/l for petroleum hydrocarbons. Maximum concentrations of the metals and petroleum hydrocarbons were recorded in the southern littoral and southern declining zones. No definite trend was found in among-year variations of their average concentrations.

## **ТЕХНОГЕННЫЙ СЛЕД В ГЕОХИМИИ СОВРЕМЕННЫХ ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЙ МАЛЫХ УРБАНИЗИРОВАННЫХ ОЗЕР КАРЕЛИИ**

**А. С. Медведев, З. И. Слуковский, Д. Г. Новицкий**

*Институт геологии КарНЦ РАН*

В работе представлены данные геохимических исследований колонок донных отложений, отобранных в озерах Плотичье (Медвежьегорск) и Четырехверстное (Петрозаводск), которые расположены непосредственно в городской черте. Отобрана изменчивость микроэлементного состава озерных осадков по глубине колонок. Также были выявлены основные источники поступления тяжелых металлов в водные объекты.

Водоемы, расположенные вблизи городов, а также непосредственно на урбанизированных территориях, подвергаются существенной антропогенной нагрузке, степень которой определяется при исследовании химического состава воды и донных отложений [Мур, Рамамурти, 1987]. Поскольку озера, как правило, являются конечной составляющей каскадных систем [Перельман, Касимов, 1999], они способны аккумулировать большое количество материала. Сформированные в течение длительного времени донные отложения озер, испытывающих длительную антропогенную нагрузку, в свою очередь, являются хранилищами многих тяжелых металлов [Даувальтер, 2012; Белкина, Потапова, 2006].

Медвежьегорск – город, расположенный в центральной части Республики Карелия. Население – около 15 тыс. человек. Озеро Плотичье (Мыльное) – небольшой водоем, находящийся в западной части города Медвежьегорска. Данный водный объект активно используется местными жителями в хозяйственных и рекреационных целях (купание, рыбалка).

Озеро Четырехверстное расположено в южной части города, в микрорайоне Ключевая. Площадь водоема – 0,118 км<sup>2</sup>, высота над уровнем моря – 102,2 м, длина береговой линии – 1,5 км, длина озера – 0,6 км, максимальная глубина – 4,6 м [Потахин, 2011].

Отбор проб донных отложений производился со льда озер в конце марта 2016 г. При помощи пробоотборника Limnos была получена 28-см

колонка донных осадков из оз. Плотичьего и 26-см колонка из оз. Четырехверстного. Каждый двухсантиметровый слой был упакован в отдельный пластиковый контейнер и помещен в переносную сумку-холодильник для транспортировки образцов в лабораторию. Далее пробы были высушены при комнатной температуре и истерты до порошкообразного состояния.

Определение содержания тяжелых металлов было выполнено масс-спектральным методом на приборе XSeries-2 ICP-MS (ThermoScientific, США). Разложение образцов донных отложений и организмов проводили путем кислотного вскрытия в открытой системе. Для анализа использовались навески образцов массой 0,1 г. Вместе с анализируемыми образцами проводилось разложение контрольных образцов (холостых проб) и одного стандартного образца. Для проверки правильности анализа образца использовали стандартный образец химического состава донного ила оз. Байкал БИЛ-1 (ГСО 7126-94).

Согласно полученным результатам, в оз. Плотичьем (табл.) **свинец** достигает своей максимальной концентрации 154,7 мг/кг в слое 6–8 см. Минимальное значение данного элемента – 2,60 мг/кг – обнаружено в слое 24–26 см. Средняя концентрация свинца в колонке донных отложений равна 107,08 мг/кг. Наибольшее содержание этого элемента приурочено к первым 12 см. В нижележащих слоях наблюдается значительное сокращение концентрации элемента.

Максимальная концентрация **кадмия** – 2,03 мг/кг – приурочена к слою 6–8 см. Наименьшее содержание элемента – 0,34 мг/кг – обнаружено в нижнем слое 24–26 см.

**Цинк** своей максимальной концентрации (624,0 мг/кг) достигает в слое 4–6 см. В целом во всем приповерхностном слое (до 10 см) были обнаружены довольно высокие концентрации данного элемента относительно его среднего значения. Далее концентрация цинка плавно уменьшается с глубиной колонки донных отложений и достигает своего минимума – 63,20 мг/кг – в слое 22–24 см. Однако в последнем двухсантиметровом слое наблюдается некоторое повышение концентрации цинка до 97,55 мг/кг. Среднее значение этого элемента по изученной колонке озерных отложений равно 270,85 мг/кг.

Наибольшее содержание **хрома** – 73,09 мг/кг – отмечено в слое 12–14 см. Наименьшее значение данного элемента – 19,30 мг/кг – обнаружено в слое 18–20 см. Среднее значение равно 39,08 мг/кг. В верхнем четырехсантиметровом слое отмечается невысокая концентрация хрома. В нижележащем слое (4–8 см) наблюдается повышение концентрации данного элемента в полтора раза.

Максимальная концентрация *никеля* – 60,63 мг/кг – обнаружена в слое 12–14 см. Минимальное значение данного элемента – 18,10 мг/кг – отмечено в слое 24–26 см. Средняя концентрация никеля равна 34,28 мг/кг.

Наибольшее содержание *меди* – 790,10 мг/кг – отмечено в самом верхнем слое 0–2 см колонки озерных осадков изучаемого водоема. Наименьшее значение данного элемента – 17,13 мг/кг – обнаружено в слое 22–24 см. Среднее значение меди равно 102,86 мг/кг.

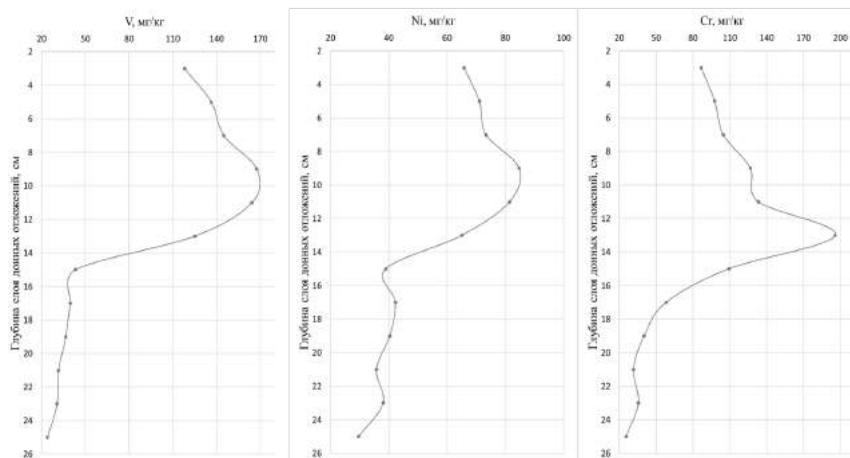
Максимальная концентрация *марганца* – 370,60 мг/кг – приходится на слой 8–10 см.

Концентрация *ванадия* во всех слоях колонки донных отложений примерно одинакова. Исключение составляют слой 8–12 см, где наблюдается незначительное понижение концентрации элемента, и слой 24–26 см, где обнаружено максимальное значение – 159,90 мг/кг. Минимальная концентрация – 76,43 мг/кг – отмечена в слое 10–12 см. Среднее значение содержания ванадия по всем исследованным образцам равно 107,08 мг/кг.

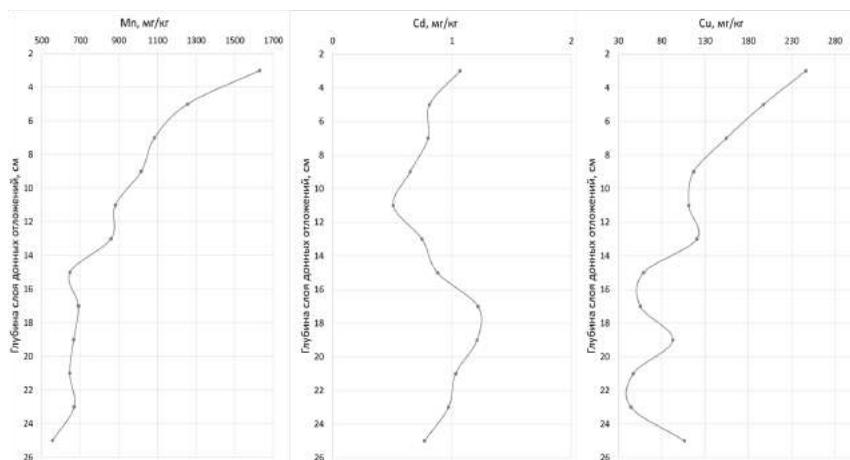
#### Концентрация тяжелых металлов в донных отложениях оз. Плотычего, мг/кг

	PB (I)	CD (I)	ZN (II)	CR (II)	NI (II)	CU (II)	MN (III)	V (III)
0–2	79,43	1,24	576,80	41,66	40,76	<b>790,10</b>	363,30	100,90
2–4	89,62	1,53	562,60	42,78	41,54	104,50	305,80	96,61
4–6	113,30	1,81	<b>624,00</b>	53,61	45,38	70,51	330,20	105,60
6–8	<b>154,77</b>	<b>2,03</b>	570,70	60,15	45,44	90,89	353,00	95,42
8–10	104,30	1,62	338,60	60,68	43,62	61,93	<b>370,60</b>	78,91
10–12	77,83	1,28	190,70	45,31	34,64	46,98	337,80	76,43
12–14	55,65	1,38	122,90	<b>73,09</b>	<b>60,63</b>	54,72	301,30	102,70
14–16	32,63	0,80	113,30	23,46	24,25	21,33	227,50	121,40
16–18	30,71	0,58	122,50	25,78	25,68	23,57	240,30	127,50
18–20	23,99	0,46	67,66	19,30	21,08	16,88	204,90	108,90
20–22	26,21	0,52	70,52	20,80	22,63	18,93	215,40	108,70
22–24	24,64	0,46	63,20	20,09	21,94	17,13	213,30	109,10
24–26	2,60	0,34	97,55	21,33	18,10	19,76	164,30	<b>159,90</b>
XCP	107,08	1,08	270,85	39,08	34,28	102,86	279,05	107,08

В оз. Четырехверстном (рис. 1–3) Mn и Cu имеют наибольшую концентрацию в первом пятисантиметровом слое. Накопление ванадия и никеля достигает своего максимума в слое 8–12 см. Максимальная концентрация хрома и свинца обнаружена в слое 12–14 см. Концентрация кадмия в первых 12 см колонки плавно уменьшается, однако после данного слоя отмечено ее повышение с пиком в слое 16–20 см, после которого содержание элемента вновь уменьшается. Максимальная концентрация цинка приходится на слой 14–16 см.

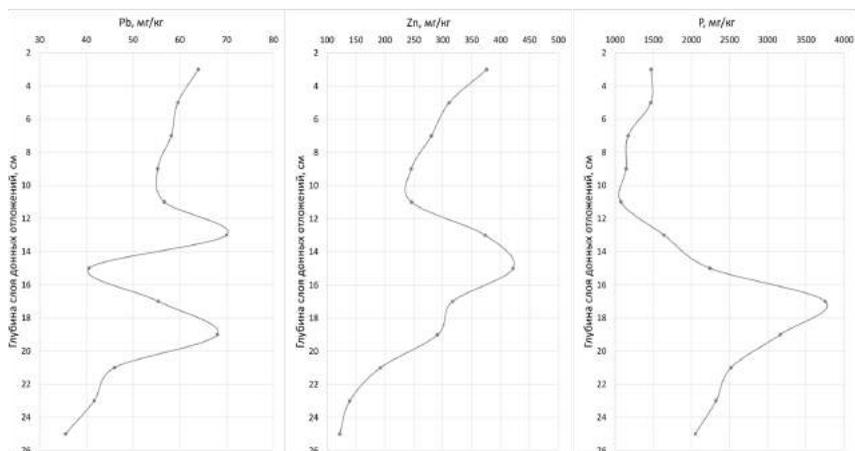


**Рис. 1.** Распределение ванадия, никеля и хрома по глубине колонки донных отложений оз. Плотичьего



**Рис. 2.** Распределение марганца, кадмия и меди по глубине колонки донных отложений оз. Плотичьего

Таким образом, по химическим данным колонок донных отложений можно заключить, что оба водоема испытывают существенную антропогенную нагрузку, которая проявляется, в основном, в первом 20-сантиметровом слое. Для оз. Плотичьего основными источниками загрязнения служат



**Рис. 3. Распределение свинца, цинка и фосфора по глубине колонки донных отложений оз. Плотичьего**

городской железнодорожный и автомобильный транспорт, щебеночный завод, молокозавод, хлебозавод, ряд деревообрабатывающих предприятий и предприятие легкой промышленности – «Заонежская вышивка». Озеро Четырехверстное, располагаясь в непосредственной близости с Октябрьской железной дорогой и автомобильной трассой, также загрязняется тяжелыми металлами. Помимо этого, к озеру прилегает гражданская застройка. До 90-х гг. XX века на северо-восточном берегу находилась фабрика валяльно-войлочного производства.

### Литература

*Белкина Н. А., Потапова И. Ю.* Донные отложения озера Пряжинское // Материалы II республ. школы-конф. молодых ученых «Водная среда Карелии: исследование, использование, охрана» (Петрозаводск, 20–21 февр. 2006 г.). Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2006. С. 67–70.

*Даувальтер В. А.* Геоэкология донных отложений озер. Мурманск: МГТУ, 2012. 242 с.

*Мур Дж. В., Рамамурти С.* Тяжелые металлы в природных водах: Контроль и оценка влияния: Пер. с англ. М.: Мир, 1987. 288 с.

*Перельман А. И., Касимов Н. С.* Геохимия: Учебник. М.: МГУ, 1999. 610 с.

*Потахин М. С.* Морфологические особенности водоемов г. Петрозаводска // Водная среда и природно-территориальные комплексы: исследование, использование, охрана: Материалы IV Школы-конф. молодых ученых с междунар. участием (26–28 авг. 2011 г.). Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2011. С. 180–183.

## THE FOOTPRINTS OF TECHNOGENESIS IN SEDIMENTS OF KARELIAN LAKES

S. Medvedev, Z. I. Slukovsky, D. G. Novitsky

*Institute of Geology, KarRC RAS*

The report represents data of the geochemical investigations of columns of lake sediments, which were retrieved from two urban lakes: Plotich'e (Medvez'egorsk) and Chetyrehverstnoe (Petrozavodsk). The variability of microelemental composition of lake sediments down the columns is depicted. The main sources of heavy metals supplied into the water bodies were revealed.

## WHAT GROUP OF HUMIC SUBSTANCES (HUMIC OR FULVIC ACIDS) DETERMINES COLOUR OF WATER IN UNPOLLUTED WATER BODIES?

A. L. Rizhinashvili

*St. Petersburg Branch of S. I. Vavilov Institute for the History of Science and  
Technology, Russian Academy of Sciences*

There is no clear answer to the question as to what kind of humic substances (fulvic acids FAs or humic acids HAs) is primarily responsible for the colour of water in water bodies. To resolve this problem we compared the optical properties of river water samples with solutions containing HAs and FAs. It was revealed that the absorption curve and some indices for river water are similar to those of FAs. Thus, we have concluded that river waters are coloured by FAs. Our results outline a more direct approach to decision-making support in the sphere of ecological monitoring of water quality.

The primary goal of our study was to establish which group of humic substances HSs (humic acids HAs or fulvic acids FAs) defines the colour and optical properties of river water. This will enable a more objective assessment of the origin of chromophoric organic matter in the water in future studies. Such an assessment is a crucial aspect of examination of the "catchment – water body" system and, consequently, essential for water quality management. The water of most rivers and lakes in the temperate zone (provided there are no specific anthropogenic contaminants) has a brown colour of various shades and intensity [Molot, 2009]. We think that the impact of terrigenous humus must be more significant in rivers due to their allochthonous regime.

Methodologically, the study was based on the comparison of absorption curves and optical characteristics between natural (river) water and solutions (chosen as standards) containing different types of humic substances (HAs or

FAs) with a known concentration. The selected standards of HSs are rather distant from one another in their physicochemical properties; they are the most obvious representatives of respective groups of HSs, HAs and FAs. We roughly consider river water as an extract of HSs.

Selecting optical parameters for sample comparison is a difficult task, because of the lack of a unifying system. For instance, the selection of wavelengths for measuring absorption appears arbitrary. Consequently, an additional purpose of the study was to develop a system of optical indices allowing a comparison of preparations, solutions and samples of HSs of different origin. This system is necessary for fast and simple decision-making in the sphere of water quality assessment.

Water was sampled from two rivers (V'yun and Kivioja) that flow across the Lembolovskaya upland in the Karelian Isthmus of the Leningrad Region (North-Western Russia) and belong to the Baltic drainage basin. The territory around the study rivers (between 60°23'55" N; 30°23'26" E and 60°22'15" N; 30°28'0" E) belongs administratively to the Vsevolozhsky District of the Leningrad Region. The village closest to these rivers is Vaskelovo (60°22'11" N; 30°21'35"E; with a railway station of the same name).

The studied rivers are typical in their physicochemical characteristics for North-Western Russia, and are not affected by any specific anthropogenic contaminants. The rivers are markedly different in the intensity of their water colour. The V'yun River is a 44-km-long mesohumic watercourse with light brown water. The Kivioja River is a tributary of the V'yun River; it is a 3-km-long polyhumic watercourse with dark brown water (colour of strong tea).

A sulphuric acid extract from soil horizon A1 collected from the catchment of the V'yun River in the study area was used as a standard FAs solution. The extract was prepared using a standard procedure [Orlov, 1995]. This procedure recovers the most labile fraction of the soil fulvic acids called 1a [Orlov, 1995]. Humic acids are not recovered in the extract, as they are insoluble in acids. The FAs carbon content in the extracted fraction 1a was determined using a standard Tjurin's method [Orlov, 1995]. An aqueous solution of a ready-made sodium humate preparation "Sakhalinsky" (Palisad R&D Company, Saint Petersburg, Russia) was used as an HAs standard. The preparation can be adequately adopted as a HA-containing standard. HAs carbon was measured in a sample of this preparation according to Tjurin method. Three consecutive independent dilutions were prepared for each standard by diluting the initial standard several times. By this procedure the standardisation of organic carbon concentration for our comparisons was made.

Light absorbance (D) of the water samples and standard HSs solutions was measured using a KFK-2 photocolorimeter in 2-cm quartz cuvettes against distilled water; the measurements were performed over the wavelength range

( $\lambda = 315\text{--}750$  nm) covered by the optical filters of the instrument. Prior to photometric measurements, the natural water was filtered through a blue band filter (2  $\mu\text{m}$ ) to remove suspended particles. The same river-water samples were tested for permanganate oxidation (PeO) according to standard and widely used method [Golterman, 1969].

The concentration of organic carbon ( $C_{\text{org}}$ ) in all samples and specimens was calculated from the D values at 315 nm using an empirical formula proposed by Lewis and Tyburczy [1974] and adjusted for 2-cm cuvettes (these authors used 10-cm cuvettes):

$$C_{\text{org}} = 28.7D_{315} + 1.685. \quad (1)$$

This wavelength was selected because in the near-UV region of the spectrum there is no confounding effect from the other components of the sample [Lewis, Tyburczy, 1974; Bikbulatov et al., 2002]. In addition, the concentration of organic carbon for river water samples was determined on the basis of PeO values. PeO was converted to  $C_{\text{org}}$  using the empirical formula [Gashkina, 2011]

$$C_{\text{org}} = 1.9 + 0.67 \cdot \text{PeO}. \quad (2)$$

The absorption curves of the solutions were approximated by the equation [Orlov, 1995]

$$\ln D = a - (b \cdot \lambda), \quad (3)$$

where  $a$ ,  $b$  are coefficients. The curves were compared by their slope angles expressed as the value of  $b$ . Extinction coefficients (absorption coefficients) and several absorbance ratios were used as optical indices. The  $E_{465}^{\text{HS}}$ ,  $E_{465}^{\text{C}}$ , and  $E_{540}^{\text{HS}}$  indices (extinction coefficients) were produced by dividing the absorbance at the corresponding wavelength (465 nm or 540 nm) by the product of multiplication of the cuvette length (in cm) and concentration of HSs or HSs carbon (in mg per 100 ml of solution) [Visser, 1984; Orlov, 1995]. The  $a_{364}^*$  and  $a_{440}^*$  indices (absorption coefficients) were calculated by multiplying D by 2.303, with the D value normalized for the cuvette length (in m) and concentration C (in mg l<sup>-1</sup>) [Jacobi et al., 2003; Anderson, Stedmon, 2007]. These variables were selected because they are the most commonly used in the literature ( $a_{364}^*$  and  $a_{440}^*$ ) or allow a comparison with the soil samples ( $E_{465}^{\text{HS}}$ ,  $E_{465}^{\text{C}}$ ,  $E_{540}^{\text{HS}}$ ). All the solutions studied were grouped by optical characteristics (absorbance ratios and extinction coefficients, except  $a_{364}^*$ ) by constructing a dendrogram that showed a relationship between the standard and study samples.

All standard solutions had a brown colour with various shades which is visually similar to the colour of our river water samples. The concentrations of organic carbon in the HS-containing solutions calculated from equation (1), i.e. using D at 315 nm, are in good agreement with those expected given the composition of the humic matter and our independent measurements.

The values of  $b$  for FAs and HAs calculated from equation (3) differ by a factor of 2 (almost by one order of magnitude), and the estimation intervals do not overlap. FAs have a higher value of  $b$ . This is consistent with the shapes of the absorption curves for FAs and HAs: FAs have steep curves, while HAs produce curves with flatter slopes. The values of  $b$  are independent of the concentration of the solution, and thus the slope of the absorption curve can be regarded as a typological index for HAs and FAs. The  $D_{4/6}$  ratios for FAs are on average 3.5-fold higher than those for HAs, which again is an indicator of a steeper slope of the absorption curves for FAs. The values of  $D_{UV/440}$ , the other ratio we used, are also 3.5-fold higher for FAs compared to HAs. Extinction coefficient  $E_{465}$  in both variants of calculation (HS- and carbon-based) provides a reliable method to differentiate HAs and FAs, because its values for these groups of HSs differ by a factor of about 4 to 5, and the intervals of variance do not overlap. The  $E_{540}^{HS}$  values for HAs are seven times as high as those for FAs, and the FAs again show a higher stability of extinction coefficients. Absorption coefficients  $a_{364}^*$  and  $a_{440}^*$  show distinctly different patterns of their variation. The values of the former show no evidence of group specificity, while those of  $a_{440}^*$  for HAs and FAs differ on average by a factor of 3.6.

The concentration of organic carbon measured in the water samples using permanganate oxidation PeO method proved to be a good approximation for that obtained from equation (1) using  $D_{315}$ .

The comparison of the absorption curves of the water samples with those of standard HAs and FAs solutions of corresponding concentrations showed that the samples from both rivers were close to FAs. It can be observed visually from the shapes of the curves and can be proven statistically (the values of slope coefficient  $b$  for the river water are statistically indistinguishable from those of FAs, and the values of  $b$  for the samples and FAs overlap over their entire range). The variation of  $D_{4/6}$  is relatively small, whereas the values of  $D_{UV/440}$  clearly place the river water between HAs and FAs. The extinction coefficients show that water from the V'yun River is close to FAs. At the same time, water from the Kivioja River, although it is close to FAs, has an extinction 1.75 (at 465 nm) and 1.76 (at 540 nm) times as high as that of FAs of corresponding concentrations. Based on the  $a_{440}^*$  coefficient, the V'yun River can again be unequivocally classified as FAs, while the Kivioja River has values exceeding FAs by a factor of 1.77. The values of the absorption coefficient  $a_{364}^*$  for river water are in good agreement with the values range for HAs and FAs. The cluster analysis of all standard and study samples performed using a combination of all optical properties firmly places both river water samples in the same cluster as FAs preparations.

How well do the main optical characteristics that we measured for the HSs standard solutions reflect the actual group identity (HAs or FAs) of the coloured substances from these solutions and differences in their chemical properties (for instance, in molecular weight)? This question is especially important because the properties of different groups of HSs are often studied on pure preparations of these substances extracted from naturally-occurring materials. In general, the values of extinction coefficients  $E_{465}^C$  and  $E_{540}^{HS}$  and ratios  $D_{4/6}$  and  $D_{UV/440}$  of our HAs and FAs solutions give enough reason to consider the optical characteristics of these standard HSs solutions as indicators of the group-specific properties of HAs and FAs (regardless of their origin) and to compare them with unidentified naturally-occurring mixtures, that is to say, with river water. The same indices may serve as typological for distinguishing FAs and HAs. In a somewhat simplified manner, the optical ratios indicate (for the purposes of the comparative analysis) that the distinguishing group-specific characteristics of different HSs classes rely on differences in molecular weight, which agrees with the existing concept that HAs have higher molecular weights than FAs [Andreux, 1996; Linnik et al., 2004].

So which group of HSs (HAs or FAs) plays a more important role in determining the colour of river water? The shapes of the absorption curves clearly show that the HSs from both rivers are fulvic acids. The same conclusion can be drawn from extinction coefficient  $E_{540}^{HS}$ . On the other hand, extinction coefficient  $E_{465}^C$ , absorption coefficient  $a_{440}^*$  and ratio  $D_{4/6}$ , whose values unmistakably identify the water from the V'yun River as FAs, also reveal some of the more specific colour properties of water from the Kivioja River. These specific properties (expressed in the deeper coloration), are probably determined by potentially higher molecular weights of the HSs in the water from this river. We can even be a little more precise by stating that the HSs from the Kivioja River are 1.75 times as "heavy" as the FAs of the soils (based on the value of  $E_{465}^C$ ). Despite the differences in some of the indices, the multivariate analysis of the complete set of these indices classifies both samples of river water as FAs.

We can conclude that water colour in both rivers is determined by FAs, but the FAs of the Kivioja and V'yun rivers probably differ not only in concentration, but also in origin, because the Kivioja River has swampy headwaters, while the V'yun River receives only the FAs washed from the soils of the catchment. These assumptions need further study; in particular, it will be important to evaluate the elemental composition of the HSs extracted from river water and separate them by molecular weight.

As regards a set of indices able to identify the group of substances imparting colour to the river water, we recommend to use extinction

coefficient  $E_{540}^{HS}$ , which has almost never been applied in the hydrooptical experiments (with the exception of Visser [1984], who proposed this index), and a well-known absorption coefficient  $a_{440}^*$ . Another useful index is extinction coefficient  $E_{465}^C$  recommended by soil scientists. Absorption coefficient  $a_{364}^*$  should not be used to differentiate HAs and FAs, because it does not exhibit group specificity. The optical ratio  $D_{4/6}$  must be used with caution, because it shows great variability for the natural waters. On the other hand, as we showed above, both  $D_{4/6}$  and  $D_{UV/440}$  probably reflect the differences in the molecular weights of HAs and FAs.

The results presented in this study outline, for the first time, a specific unified approach to the comparison of optical characteristics of natural water samples from different sources dominated by terrigenous humus. The analysis of these indices also allows certain preliminary conclusions to be drawn regarding some of the chemical properties of the HSs molecules, for instance, their molecular weight.

### References

*Anderson N. J., Stedmon C. A.* The effect of evapoconcentration on dissolved organic carbon concentration and quality in lakes of SW Greenland // *Freshwater Biology*. 2007. Vol. 52. P. 280–289.

*Andreux F.* Humus in World Soils // Piccolo A. (ed.). *Humic substances in Terrestrial Ecosystems*. Amsterdam: Elsevier, 1996. P. 45–100.

*Bikbulatov E. S., Dzyuban A. N., Bikbulatova E. M.* Specific features of humic substances oxidation in surface waters in the presence of glucose // *Water Resources*. 2002. Vol. 29. P. 422–428.

*Gashkina N. A.* Zonal features of the distribution of biogenic elements and organic matter in small lakes // *Water Resources*. 2011. Vol. 38. P. 352–371.

*Golterman H. L.* *Methods for Chemical Analysis of Fresh Waters*. Oxford and Edinburgh: Blackwell Scientific Publications, 1969. 175 p.

*Jacobi Y. Z., Alberts J. J., Takacz M., McElvaine M.* Absorption spectroscopy of colored dissolved organic carbon in Georgia (USA) rivers: the impact of molecular size distribution // *Journal of Limnology*. 2003. Vol. 62. P. 41–46.

*Lewis W. M., Tyburczy J. A.* Amount and spectral properties of dissolved organic compounds from some freshwaters of the Southeastern U.S. // *Archiv fur Hydrobiologie*. 1974. Vol. 74. P. 8–17.

*Linnik P. N., Vasilchuk T. A., Linnik R. P.* Humic substances of natural waters and their importance for aquatic ecosystems: a review // *Hydrobiological Journal*. 2004. Vol. 40. P. 79–101.

*Molot L. A.* *Color of aquatic ecosystems // Light and heat in aquatic ecosystems*. Amsterdam: Elsevier, 2009. P. 657–663.

*Orlov D. S.* *Humic Substances of Soils and General Theory of Humification*. New Delhi: Oxford & IBH Publishing Co. Pvt. Ltd., 1995. 323 p.

*Visser S. A.* Seasonal changes in the concentration and colour of humic substances in some aquatic environments // *Freshwater Biology*. 1984. Vol. 14. P. 79–87.

## **КАКАЯ ГРУППА ГУМУСОВЫХ ВЕЩЕСТВ (ГУМИНОВЫЕ КИСЛОТЫ ИЛИ ФУЛЬВОКИСЛОТЫ) ОПРЕДЕЛЯЕТ ЦВЕТ ВОДЫ НЕЗАГРЯЗНЕННЫХ ВОДОЕМОВ?**

**А. Л. Рижинашвили**

*Санкт-Петербургский филиал Института истории естествознания и техники  
им. С. И. Вавилова РАН*

До сих пор нет четкого ответа на вопрос о том, какая группа гумусовых веществ (гуминовые кислоты ГК или фульвокислоты ФК) преимущественно определяет цвет воды в водоемах. Поэтому суть нашей работы состояла в сравнении кривых светопоглощения и оптических индексов образцов речной воды с растворами стандартов ГК и ФК. Было выявлено, что оптические показатели речной воды сходны со стандартом ФК. Можно сделать вывод, что вода рек окрашена именно ФК. Наши результаты необходимы при принятии решений в области мониторинга качества поверхностных вод суши.

## **ГЕОХИМИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЙ СКЛОНОВЫХ И ГЛУБОКОВОДНЫХ УЧАСТКОВ ОНЕЖСКОГО ОЗЕРА**

**З. И. Слуковский<sup>1</sup>, Д. А. Складнев<sup>2</sup>, Е. М. Макарова<sup>3</sup>, Е. В. Теканова<sup>3</sup>,  
Н. М. Калинкина<sup>3</sup>, Р. В. Садовничий<sup>1</sup>**

*<sup>1</sup>Институт геологии КарНЦ РАН, г. Петрозаводск*

*<sup>2</sup>Государственный научно-исследовательский институт генетики  
и селекции промышленных микроорганизмов, г. Москва*

*<sup>3</sup>Институт водных проблем Севера КарНЦ РАН, г. Петрозаводск*

В докладе приводится анализ геохимических особенностей донных отложений склоновых и глубоководных участков Онежского озера. Приводится анализ возможных геохимических индикаторов, позволяющих дифференцировать два типа исследованных озерных отложений, имеющих различное содержание железа.

Онежское озеро – второй по величине пресный водоем Европы и европейского северо-запада России, имеющий важное хозяйственное, транспортное и рекреационное значение как для жителей Карелии и Вологодской области, так и для всей страны [Онежское озеро, 2010]. Глубоководные участки озера, главным образом, приурочены к зонам основных разломов докембрийских геологических образований Фенноскандинавского кристаллического щита [Онежская..., 2001]. Диапазон глубин профундальных (глубоководных) и ультрапрофундальных районов водного объекта составляет от 30 до 100 м, максимальная зарегистрированная глубина Онежского озера равна 120 м. Такие глубины озера распространены

в центральной и северной частях водоема. Самые крупные заливы и губы северной части Онежского озера приурочены к склоновым (деклинальным) зонам, где распространены глубины от 10 до 30 м [Зимон, 2010]. Донные отложения (ДО) указанных районов преимущественно представлены глинистым, мелко- и крупноалевритовым илом, вблизи берегов озерные осадки представлены частицами разной крупности – от песка до гальки и гравия [Семенович, 1973; Васильева, 1990]. Распределение различных компонентов химического состава, в том числе микроэлементов, в поверхностном слое, ДО Онежского озера почти полностью зависит от гранулометрического состава осадков. Кроме того, отмечаются повышенные концентрации железа и марганца в ДО, что является следствием особенностей местной геохимической провинции [Васильева, 1990; Белкина и др., 2010].

В данной работе (докладе) представлены результаты исследования лито- и геохимии современных ДО, отобранных на различных глубинах озера в ходе комплексной экспедиции сотрудников Института водных проблем Севера КарНЦ РАН в 2015 г. Все изученные отложения отбирались в летний период (июнь, август) при помощи дночерпателя ДАК. Для анализа отбирался только самый верхний слой отложений (0–2 см). Расположение станций опробования ДО представлено на рис. 1. Всего была изучена 31 проба озерных осадков. Лабораторные исследования проводились на базе аналитического центра Института геологии КарНЦ РАН. Содержание микроэлементов в пробах ДО определяли масс-спектральным методом на приборе XSeries-2 ICP-MS. Содержание макроэлементов было осуществлено при помощи рентгенофлуоресцентного спектрометра ARL ADVANT'X.

Анализ главных компонентов исследуемых ДО Онежского озера позволил разделить их на две условные группы. В первую вошли осадки с содержанием суммарного железа ( $Fe^*$ ) от 5 до 17 мас. %, а во вторую – от 34 до 51 %. При этом следует отметить, что медианное содержание железа в выборке из всех изученных образцов проб составляет 10,6 %, поэтому ДО с экстремальным содержанием этого элемента отделены от основной (первой) группы. На графике распределения редкоземельных элементов (РЗЭ) видно, что их общее содержание в высокожелезистых отложениях несколько ниже, чем в ДО с квазимедианным содержанием  $Fe^*$  (рис. 2), хотя в целом общий вид спектров распределения РЗЭ схож как между собой, так и с постархейскими глинистыми сланцами Австралии, используемыми в качестве эталонов [Bjrgai, Birgit-Gaye, 2003]. Стоит лишь отметить наличие в графике высокожелезистых ДО небольшой отрицательной цериевой аномалии в отличие от PAAS и образцов под общим названием Sed\_Fe\_3-17.

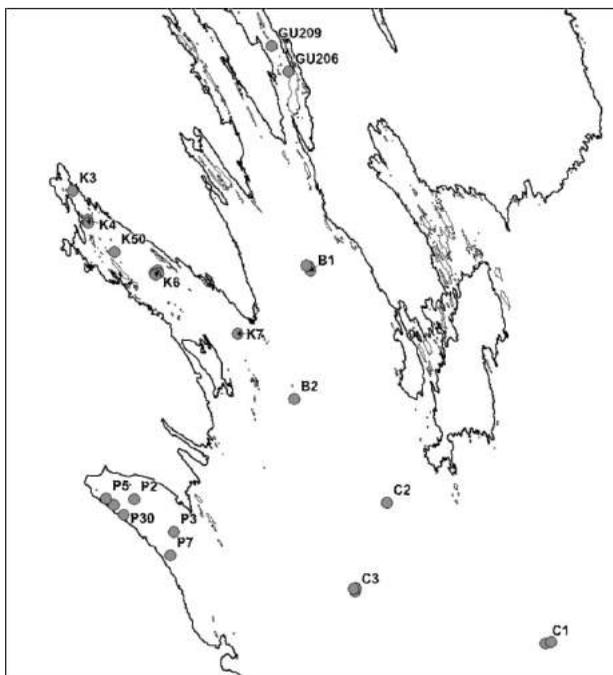


Рис. 1. Карта-схема расположения станций опробования донных отложений Онежского озера

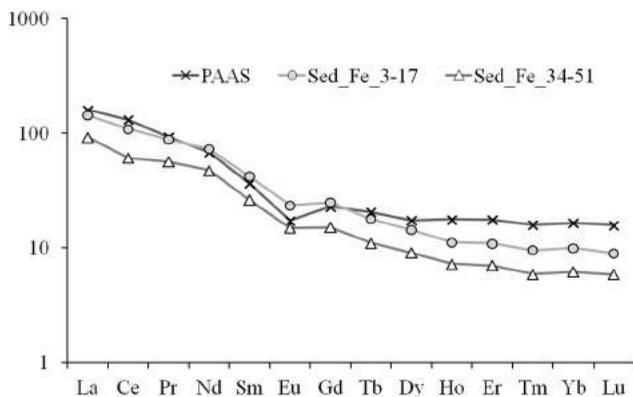
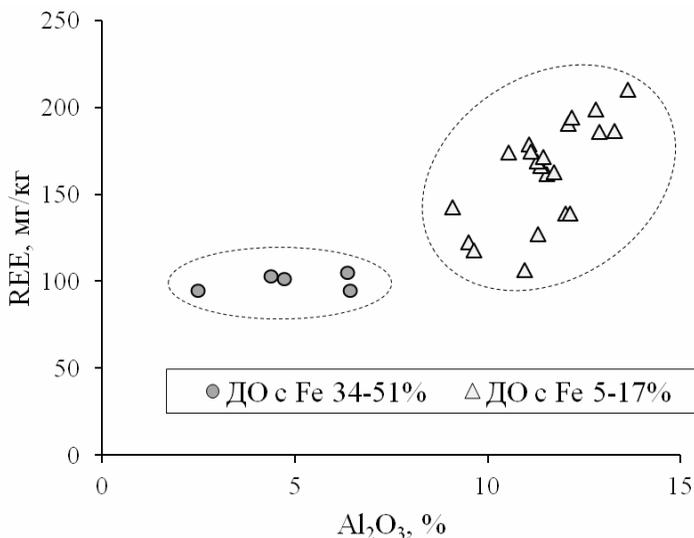
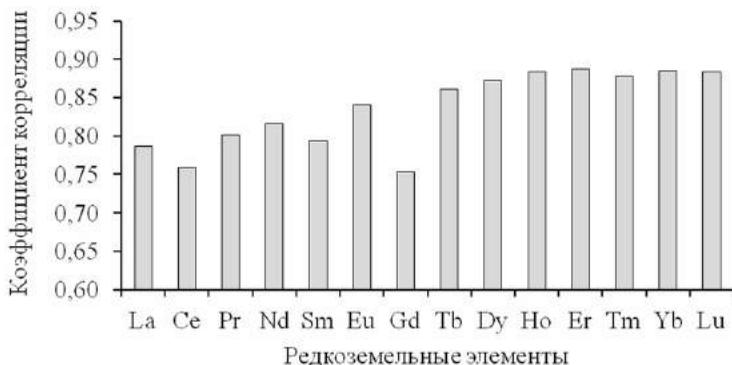


Рис. 2. Нормированные по хондриту спектры распределения концентраций редкоземельных элементов в постархейских глинистых сланцах Австралии (PAAS) и ДО Онежского озера

Установлено, что концентрации РЗЭ осадков с квазимедианным содержанием  $Fe^*$  в значительно большей степени связаны с концентрацией алюминия (рис. 3), являющегося индикатором значительного содержания терригенных компонентов в осадочных образованиях [Юдович, Кетрис, 2011]. Для высокожелезистых ДО Онежского озера такой связи REE- $Al_2O_3$  выявлено не было. При этом содержание суммы РЗЭ всех исследованных образцов ДО тесно коррелирует с концентрацией лития (рис. 4), являющегося индикатором тонких гранулометрических фракций в ДО крупных и мелких водных объектов [Loring, 1990; Гапеева и др., 1997; Aloupi, Angelidis, 2001; Слуковский, 2015]. Данные факты, с одной стороны, свидетельствуют о том, что РЗЭ связаны с самыми тонкими минеральными частицами изученных озерных отложений, а с другой стороны, что их фазы-носители в высокожелезистых ДО Онежского озера и осадках с квазимедианным содержанием  $Fe^*$  имеют различную природу. В первом случае мы имеем дело с породообразующими минеральными образованиями, принесенными в онежские осадки с речным и поверхностным стоком [Онежское озеро, 2010], а во втором, вероятно, с образованными в результате физико-химических и биологических процессов в водной среде минералами Fe.



**Рис. 3.** Диаграмма соотношения содержания оксида алюминия и суммы редкоземельных элементов в ДО Онежского озера



**Рис. 4. Уровень корреляционной связи концентраций лития с редкоземельными элементами ( $R_{кр} = 0,562$  для  $p < 0,001$ )**

Интересно отметить, что содержание  $Fe^*$  в исследованных ДО не имеет значимой корреляции с концентрацией  $MnO$ , который является типичным спутником железа в современных осадочных образованиях. И наоборот, установлена тесная корреляционная связь в паре  $Fe^* - P_2O_5$  ( $R = 0,97$  для  $p < 0,001$ ), что указывает на факт вхождения P в состав минерала вивинита  $Fe_3(PO_4)_2 \cdot 8H_2O$  (рис. 5), синей охры, чье происхождение тесно связано с изменением значения Eh-потенциала пресноводных отложений [Синькевич, Экман, 1995]. При этом на графике (рис. 6) видно, что высокожелезистые ДО глубоководных участков Онежского озера четко дифференцируются от квазимедианных по содержанию  $Fe^*$  осадков, что позволяет использовать концентрации фосфора в качестве индикатора различных процессов, повлиявших на образование обоих групп исследованных ДО. При этом отмечается, что высокожелезистые отложения значительно обеднены микроэлементами, в том числе элементами группы железа – Ni, V, Cr, Ti. Что касается взаимоотношения Fe и Mn в ДО Онежского озера, то в работе [Калинкина и др., 2016] показано, что в самых верхних слоях осадков эти элементы ведут себя по-разному вследствие значительного выноса Mn в последнее время с водосборной площади озера, особенно вблизи урбанизированных районов. Авторами [Калинкина и др., 2016] также не обнаружено никакой корреляции между этими элементами в вертикальном профиле ДО до глубины 30 см.

Таким образом, анализ геохимических особенностей ДО различных участков, в том числе глубоководных, Онежского озера позволил выявить различия между двумя типами исследованных отложений, имеющих содержание суммарного Fe от 5 до 17 % и свыше 34 %, учитывая, что формирование первой группы ДО связано с процессами переноса

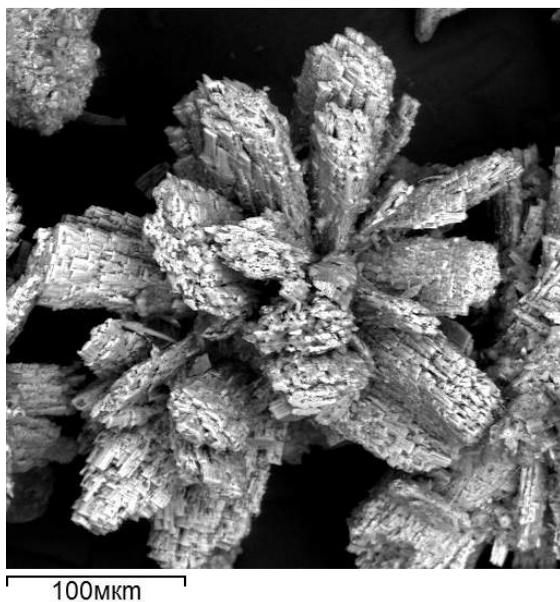


Рис. 5. Электронное изображение кристалла вивианита из ДО Онежского озера

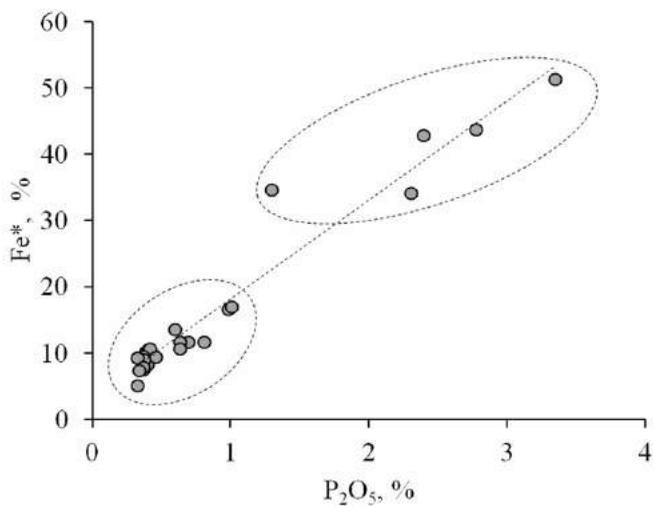


Рис. 6. Диаграмма соотношения содержания оксида фосфора и суммарного железа в ДО Онежского озера

терригенного (аллохтонного) вещества от речных и поверхностных стоков в водоем, а второй – преимущественно с внутриводоемными физико-химическими и биологическими процессами. Установлено, что индикаторами различных типов исследованных ДО могут быть концентрации фосфора, алюминия редкоземельных и некоторых других микроэлементов.

### Литература

*Белкина Н. А., Демидов И. Н., Лаврова Н. Б.* Донные отложения // Онежское озеро. Атлас / Отв. ред. Н. Н. Филатов. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2010. С. 100–103.

*Васильева Е. П.* Донные отложения // Экосистема Онежского озера и тенденции ее изменения. Л.: Наука, 1990. С. 147–174.

*Ганеева М. В., Законнов В. В., Ганеев А. А.* Локализация и распределение тяжелых металлов в донных отложениях водохранилищ Верхней Волги // Водные ресурсы. 1997. Т. 24, № 2. С. 174–180.

*Зимон О. В.* Схема глубинно-зонального районирования акватории Онежского озера // Онежское озеро. Атлас / Отв. ред. Н. Н. Филатов. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2010. С. 25–26.

*Калинкина Н. М., Сидорова А. И., Полякова Т. Н. и др.* Снижение численности глубоководного макрозообентоса Онежского озера в условиях многофакторного воздействия // Принципы экологии. 2016. № 2. С. 43–61.

*Онежская палеопротерозойская структура (геология, тектоника, глубинное строение и минерагения) / Отв. ред. Л. В. Глушанин, Н. В. Шаров, В. В. Щипцов.* Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2011. 431 с.

*Онежское озеро.* Атлас / Отв. ред. Н. Н. Филатов. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2010. 151 с.

*Семенович Н. И.* Донные отложения Онежского озера. Л., 1973. 104 с.

*Синькевич Е. И., Экман И. М.* Донные отложения озер восточной части Фенноскандинавского кристаллического щита. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 1995. 177 с.

*Слуковский З. И.* Нормирование по литию концентраций тяжелых металлов в донных отложениях озер Ладожское и Четырехверстное (Республика Карелия) // Химия в интересах устойчивого развития. 2015. Т. 23, № 4. С. 397–408.

*Юдович Я. Э., Кетпис М. П.* Геохимические индикаторы литогенеза (литологическая геохимия). Сыктывкар: Геопринт, 2011. 742 с.

*Aloupi M., Angelidis M. O.* Normalization to lithium for the assessment of metal contamination in coastal sediment cores from the Aegean Sea, Greece // Marine Environmental Research. 2001. Vol. 52. Issue 1. P. 1–12.

*Bjraj K. Das, Birgit-Gaye Haake.* Geochemistry of Rewalsar sediment, Lesser Himalaya, India: implications for source-area weathering, provenance and tectonic setting // Geosciences Journal. 2003. Vol. 7, N 4. P. 299–312.

*Loring D. H.* Lithium – a new approach for the granulometric normalization of trace metal data // Marine Chemistry. 1990. Vol. 29. P. 155–168.

## THE GEOCHEMICAL CHARACTERISTICS OF THE BOTTOM SEDIMENTS OF SLOPE AND DEEP-WATER SITES OF LAKE ONEGO

Z. I. Slukovsky<sup>1</sup>, D. A. Skladnev<sup>2</sup>, E. M. Makarova<sup>3</sup>, E. V. Tekanova<sup>3</sup>,  
N. M. Kalinkina<sup>3</sup>, R. V. Sadovnichy<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Institute of Geology, KarRC RAS*

<sup>2</sup>*State Research Institute of Genetics and Selection of Industrial Microorganisms*

<sup>3</sup>*Northern Water Problems Institute, KarRC RAS*

The geochemical characteristics of the bottom sediments of the slope and deep-water areas of Lake Onego are analyzed. The analysis of possible geochemical indicators which allow differentiation between two types of investigated lake sediments with different iron content is given.

## МИНЕРАЛОГИЯ ДОННЫХ ОСАДКОВ МАЛЫХ ОЗЕР АРИДНЫХ ЗОН БАЙКАЛЬСКОГО РЕГИОНА – ПЕРСПЕКТИВНЫЙ ПОДХОД К РЕКОНСТРУКЦИЯМ КЛИМАТА ГОЛОЦЕНА

П. А. Солотчин<sup>1</sup>, Э. П. Солотчина<sup>1</sup>, Е. В. Скляр<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*Институт геологии и минералогии им. В. С. Соболева СО РАН,  
Новосибирск*

<sup>2</sup>*Институт земной коры СО РАН, Иркутск*

Приводятся результаты минералогических исследований голоценовых осадков ряда малых бессточных озер с карбонатной седиментацией аридных зон Байкальского региона. Методы исследования – рентгеновская дифрактометрия (XRD), ИК-спектроскопия, анализ стабильных изотопов <sup>18</sup>O и <sup>13</sup>C, лазерная гранулометрия, элементный анализ (РФА СИ) и другие. Моделированием сложных XRD профилей хемогенных карбонатных минералов в озерных осадках установлены Mg-кальциты разной степени магниальности и Ca-избыточные доломиты. Получена карбонатная запись, содержащая сведения о стратиграфическом распределении хемогенных карбонатов кальцит-доломитового ряда, в которых количество и соотношение фаз различной степени магниальности определяются величиной Mg/Ca-отношения, соленостью и общей щелочностью вод озера в прошлом. Показана высокая перспективность минералого-кристаллохимических исследований аутигенных карбонатов для палеоклиматических реконструкций.

Существующая в настоящее время неопределенность климатических прогнозов, а также продолжающаяся дискуссия вокруг проблемы глобального потепления обуславливают высокую актуальность палеоклиматических исследований. Поскольку основной подход к разработке наиболее вероятных сценариев дальнейшей эволюции природной среды заключается в поисках аналогичных событий на протяжении прошлых геологических

эпох, на первый план выходит задача выявления объектов, могущих служить естественными палеоклиматическими архивами. К числу таких объектов относятся голоценовые разрезы донных осадков мелководных озер аридных и семиаридных зон, так как, во-первых, голоценовый период по своим климатическим особенностям является наиболее близким аналогом современности, и, во-вторых, малые размеры водоемов обуславливают их высокую чувствительность к короткопериодическим изменениям в окружающей среде. Долгое время эти водоемы оставались на периферии внимания специалистов, однако в последние полтора-два десятилетия наблюдается лавинообразное увеличение числа зарубежных публикаций, посвященных климатическим летописям голоцена, полученным из озерных осадков [Last, Ginn, 2005; Deocampo, 2010 и др.]. Подобные исследования проводятся и в нашей стране, в том числе на территории Сибири [Bezrukova et al., 2010; Базарова и др., 2011 и др.]. Однако они, во-первых, немногочисленны, а, во-вторых, как и работы иностранных авторов, базируются главным образом на результатах палинологического и диатомового анализов, распределении в разрезах макро- и микроэлементов, в то время как минералогический аспект остается за скобками.

Целью работы являлось исследование аутигенных минеральных ассоциаций донных осадков мелководных соленых и солонатоводных озер, нередко плайевых, располагающихся преимущественно в засушливых районах Байкальского региона. Состав и структура осаждающихся минералов непосредственным образом зависят от химизма озерных вод, который в свою очередь контролируется климатом региона. Наиболее отчетливо эта зависимость проявляется для хемогенных карбонатов, которые характеризуются широким спектром изоморфизма в их кристаллической решетке и значительными вариациями степени порядка/беспорядка в структуре [Карбонаты..., 1987]. Были изучены отложения ряда бассейнов с карбонатным типом седиментации, расположенных как на западном побережье оз. Байкал, в Приольхонье (оз. Цаган-Тырм, Холбо-Нур, Намшинур, Хара-Нур, Скалистое, Придорожное и др.), так и на восточном, в Западном Забайкалье (оз. Верхнее Белое, Большое Алгинское, Киран, Сульфатное, Долгое). Как правило, это бессточные водоемы небольших размеров (площадь водного зеркала обычно в пределах первых км<sup>2</sup>) и глубин (первые метры).

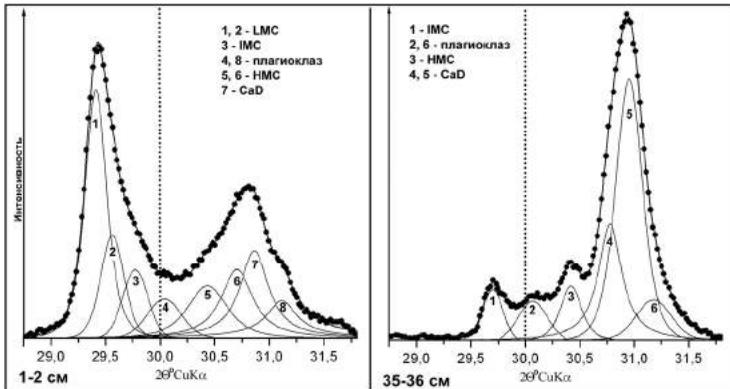
Изучение образцов проводилось методами рентгеновской дифрактометрии (XRD), ИК-спектроскопии, электронной микроскопии, лазерной гранулометрии, элементный состав определялся методами РФА СИ и ААС. Анализ стабильных изотопов <sup>18</sup>O и <sup>13</sup>C выполнен методом масс-спектрометрии. Возраст осадков определялся методами гамма-спектрометрии по <sup>210</sup>Pb и ускорительной масс-спектрометрии (AMS) по <sup>14</sup>C. Де-

тальная карбонатная минералогия была выполнена методом математического моделирования XRD профилей образцов.

Озерная фация сложена, как правило, тонкозернистым алевритовым и пелитовым материалом, значительная доля которого (в отдельных разрезах 80–90 %) представлена хомогенными карбонатами. Установлено, что в составе карбонатов преобладают Mg-кальциты разной степени магнезиальности и Ca-избыточные доломиты, могут также присутствовать арагонит, кальцит, моногидрокальцит, гидромагнезит и родохрозит. Наибольший интерес для палеоклиматических реконструкций представляют Mg-кальциты, количество магния в структуре которых является важнейшим индикатором физических и химических условий среды их образования.

Дифференциальная диагностика низкотемпературных природных карбонатов кальцит-доломитового ряда представляет определенные трудности из-за их высокой дисперсности (размеры кристаллитов менее 10 мкм). Анализ проводится по наиболее интенсивным отражениям  $hkl = 104$  в области углов  $28^{\circ}$ – $32^{\circ}$   $2\theta$   $\text{CuK}_{\alpha}$  [Солотчина, Солотчин, 2014]. По содержанию  $\text{MgCO}_3$  в структуре Mg-кальциты делятся на три группы: 1) низко-Mg кальциты ( $\text{MgCO}_3 < 4\text{--}5$  мол. %); 2) промежуточные магнезиальные кальциты (5–18 мол. %  $\text{MgCO}_3$ ); 3) высоко-Mg кальциты (18–43 мол. %  $\text{MgCO}_3$ ). Ca-избыточные доломиты характеризуются избытком  $\text{CaCO}_3$  до 7 мол. % относительно стехиометрического доломита. На дифрактограммах 104-пики Ca-Mg карбонатов образуют два широких максимума сложной формы и переменной интенсивности (рис. 1). Условная граница между ними располагается на  $30^{\circ}$   $2\theta$   $\text{CuK}_{\alpha}$ .

Для выявления всего спектра присутствующих в образцах карбонатных минералов ряда кальцит – доломит нами использовалось разложение их сложных XRD профилей на индивидуальные пики функцией Пирсона VII [Solotchina et al., 2009]. Модельный подход позволил установить положение максимума, интегральную интенсивность аналитического пика каждой карбонатной фазы и получить их количественные соотношения. В самом факте присутствия тех или иных карбонатов, последовательности их осаждения скрыты физико-химические факторы осадконакопления (Mg/Ca-отношение, соленость, карбонатная щелочность, величина pH и биологическая продуктивность палеобассейна). Все эти параметры контролируются водным балансом, зависящим, в свою очередь, от региональных климатических условий. Экспериментально показано, что господство суровых, засушливых природных обстановок, сопровождающееся падением уровня озера, повышением минерализации вод и карбонатной щелочности, ведет к образованию высокомагнезиальных кальцитов и Ca-избыточных доломитов и наоборот – теплый и влажный климат, приводящий к обводнению озерной котловины, способствует формированию низкомагнезиальных и промежуточных Mg-кальцитов.



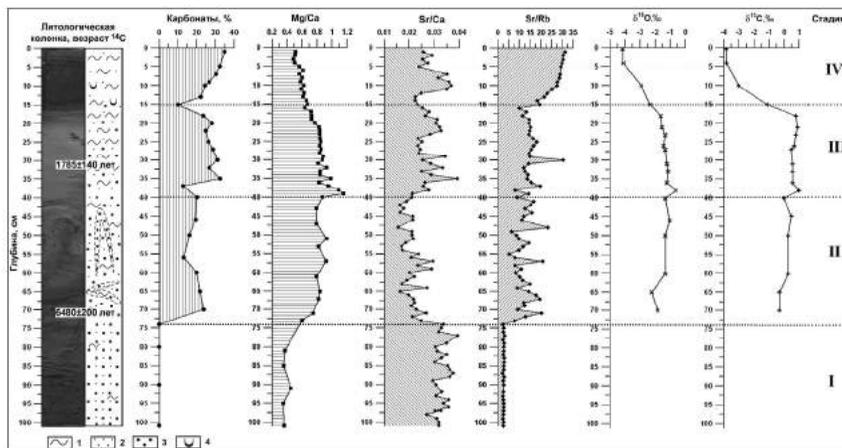
**Рис. 1. Результаты моделирования экспериментальных XRD профилей карбонатов донных осадков оз. Киран в области  $d_{104}$  пиков**

Экспериментальные профили – точки, модельные профили – сплошная линия. LMC – низко-Mg кальцит, IMC – промежуточный Mg-кальцит, НМС – высоко-Mg кальцит, CaD – Ca-доломит

В качестве примера приводится распределение карбонатов кальцит-доломитового ряда в разрезе оз. Киран, расположенного на юге Бурятии (Селенгинская Даурия); площадь водной поверхности его составляет около  $1,0 \text{ км}^2$ , средняя глубина –  $2,0 \text{ м}$ . Разрез голоценовых донных осадков вскрыт до глубины  $101,3 \text{ см}$ . Установлено, что в озерных осадках присутствуют от 4 до 7 карбонатных фаз, представленных Ca-избыточными доломитами и Mg-кальцитами разной степени магнезиальности, содержание которых, определенное методом ИК-спектроскопии, колеблется в интервале от 10 до 35 % вещественного состава осадков. Проведенные исследования позволили выделить 4 стадии эволюции оз. Киран (рис. 2).

Стадия I отвечает начальному этапу формирования озера на месте отшнурованного речного меандра, карбонаты в отложениях отсутствуют. Нижняя граница стадии II (гл. 75 см) – начало карбонатной седиментации. Исходя из даты  $6480 \pm 200 \text{ л. н. } (^{14}\text{C})$  для слоя осадков 70–71 см, озеро как бассейн с хемогенной седиментацией сформировалось в атлантический период, который в Байкальском регионе характеризуется потеплением зимних сезонов и повышением средних значений суммы атмосферных осадков. Наряду с высоко-Mg кальцитами и Ca-избыточным доломитом в этот период осаждаются низкомагнезиальный и промежуточный Mg-кальциты, что является показателем умеренной насыщенности вод по карбонатам и умеренной солености водоема. Наиболее засушливыми условиями характеризуется стадия III (конец суббореального и значитель-

ная часть субатлантического периода), в которую осаждались преимущественно Са-избыточные доломиты, что является отличительной чертой мелководных и плайевых озер (рис. 1, гл. 35–36 см). Отчетливая тенденция увлажнения климата наблюдается в стадию VI (последние 100 лет), о чем можно судить по преобладанию в верхах разреза в ансамбле карбонатных минералов низкомагнезиальных и промежуточных Mg-кальцитов (рис. 1, гл. 1–2 см). Об улучшении условий в водоеме свидетельствует поведение тяжелых изотопов  $^{18}\text{O}$  и  $^{13}\text{C}$ , Sr/Ca и Sr/Rb отношений. Несмотря на общую высокую аридность климата региона в рассматриваемый период, наблюдались его флуктуации в сторону увлажнения, в частности, в середине атлантического периода (время образования оз. Киран) и в последние десятилетия, вплоть до современности.



**Рис. 2.** Литологическая колонка голоценового осадочного разреза оз. Киран, распределение карбонатных минералов, геохимических индикаторов палеоклиматических изменений (Mg/Ca, Sr/Ca, Sr/Rb-отношения) и стабильных изотопов ( $\delta^{18}\text{O}$  и  $\delta^{13}\text{C}$ ):

1 – пелит, 2 – алевролит, 3 – песок, 4 – раковины моллюсков

Таким образом, сопоставление карбонатных записей с данными литологического анализа, результатами определения стабильных изотопов  $^{18}\text{O}$  и  $^{13}\text{C}$  и распределениями некоторых геохимических индикаторов климатических изменений позволяет воссоздать сложную историю эволюции водных бассейнов на территории Байкальского региона. Выполненные исследования показали высокую перспективность подхода, базирующегося на минералого-кристаллохимических исследова-

дованиях карбонатов малых соленых озер аридных зон, для получения палеоклиматических записей высокого разрешения.

Работа выполнена в рамках государственного задания, проекты № 0330-2016-0017, № 0330-2015-0003, и при поддержке РФФИ, проект № 16-05-00244. Основная часть аналитических работ выполнена в ЦКП Многоэлементных и изотопных исследований СО РАН.

### Литература

*Базарова В. Б., Гребенникова Т. А., Мохова Л. М., Орлова Л. А.* Особенности озерного осадконакопления в степной зоне Юго-Восточного Забайкалья в голоцене (на примере отложений оз. Зун-Соктуй) // Геология и геофизика. 2011. Т. 52 (3). С. 426–438.

*Карбонаты: минералогия и химия* / Под ред. Р. Дж. Ридера. М.: Мир, 1987. 494 с.

*Солотчина Э. П., Солотчин П. А.* Состав и структура низкотемпературных природных карбонатов кальцит-доломитового ряда // Журнал структурной химии. 2014. Т. 55, № 4. С. 814–820.

*Bezrukova E., Tarasov P., Solovieva N. et al.* Last glacial-interglacial vegetation and environmental dynamics in southern Siberia: Chronology, forcing and feedbacks // *Palaeogeogr., Palaeoclimatol., Palaeoecol.* 2010. Vol. 296. P. 185–198.

*Deocampo D. M.* The geochemistry of continental carbonates // *Developments in sedimentology.* 2010. Vol. 62. P. 1–59.

*Last W. M., Ginn F. M.* Saline systems of the Great Plains of western Canada: an overview of the limnogeology and paleolimnology // *Saline systems.* 2005. 1:10.

*Solotchina E. P., Prokopenko A. A., Kuzmin M. I. et al.* Climate signals in sediment mineralogy of Lake Baikal and Lake Hovsgol during the LGM-Holocene transition and the 1-Ma carbonate record from the HDP-04 drill core // *Quatern. Intern.* 2009. Vol. 205. P. 38–52.

## MINERALOGY OF BOTTOM SEDIMENTS FROM SHALLOW LAKES OF THE BAIKAL REGION ARID ZONES – A PROMISING APPROACH TO THE RECONSTRUCTION OF HOLOCENE CLIMATE

P. A. Solotchin<sup>1</sup>, E. P. Solotchina<sup>1</sup>, E. V. Sklyarov<sup>2</sup>

<sup>1</sup>The V. S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy, Siberian Branch RAS

<sup>2</sup>The Institute of the Earth's Crust (the Institute of Geology), Siberian Branch RAS

We present the results of mineralogical study of Holocene sediments from shallow saline lakes with carbonate sedimentation located in the Baikal region. The sediments were studied by X-ray diffraction analysis, IR spectroscopy, analysis of <sup>18</sup>O and <sup>13</sup>C isotopes, etc. Mg-calcites and excess-Ca dolomites in the sediments were detected by modeling complex XRD profiles of chemogenic carbonates. The obtained carbonate records bear information about the stratigraphic distribution of authigenic carbonates, in which the amount and proportions of phases with different Mg contents are controlled by Mg/Ca, salinity, and total alkalinity of the lake water in the past.

## ЭЛЕМЕНТЫ ПРОГНОЗА КАЧЕСТВА ВОД ШУРЭНСКОГО ВОДОХРАНИЛИЩА НА РЕКЕ СЕЛЕНГЕ (МОНГОЛИЯ)

Л. М. Сороковикова, В. Н. Синюкович, И. В. Томберг

*Лимнологический институт СО РАН*

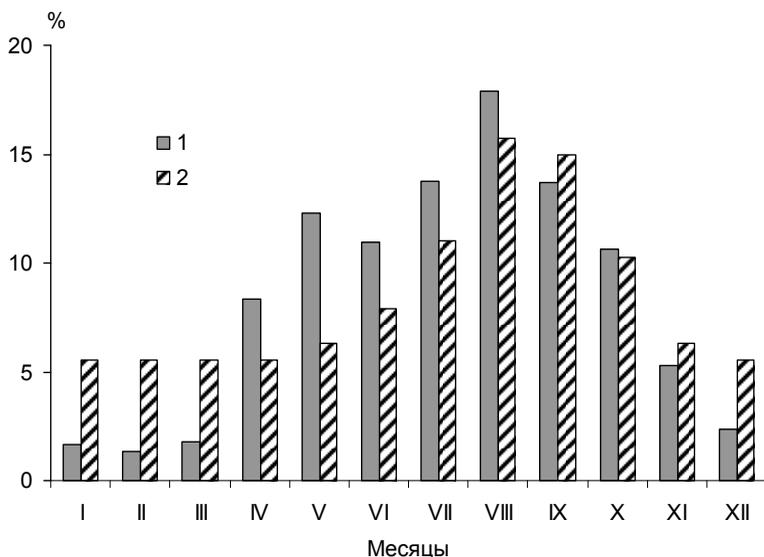
На основе сведений о гидрохимическом и водном режиме р. Селенги в районе проектируемой ГЭС представлены оценки ожидаемой трансформации качественного состава селенгинских вод в Шурэнском водохранилище. Минерализация воды изменится незначительно и составит 180–260 мг/л. В заливах ожидается рост содержания хлоридов, сульфатов и натрия. Концентрации биогенных элементов будут повышенными: аммонийного азота до 0,05, нитратного – до 0,5 мг N/л, минерального фосфора до 40 мкг P/л. Химическое потребление кислорода (ХПК) в транзитной части водоема будет изменяться от 6 до 20 мг O/л, в заливах – до 25 мг O/л. Качественный состав воды, сформировавшийся в водохранилище, будет сохраняться и ниже плотины ГЭС до впадения крупных притоков.

Река Селенга – главный приток Байкала. Длина реки составляет 1024 км, из них 615 км она протекает по территории Монголии и 409 км в пределах России. Селенга не зарегулирована, хотя первые проекты ГЭС были разработаны еще в 1970-х гг. В настоящее время в планах развития гидроэнергетики Монголии строительство ГЭС предполагается как на р. Селенге, так и на ее притоках. В главном русле р. Селенги планируется сооружение плотины Шурэнской ГЭС приблизительно в 100 км к северо-востоку от г. Эрдэнэт и в 100 км выше впадения в Селенгу р. Орхон. В отсутствие разработанного проекта сведения о местоположении и параметрах будущего водохранилища приняты нами по данным обновленного технико-экономического обоснования (ТЭО) ее строительства и некоторых публикаций [Гречушников, Эдельштейн, 2016; Техническое задание..., 2016]. Планируемая мощность станции – 245 МВт. Объем водохранилища для плотины высотой 65 м составит 4,5 км<sup>3</sup>, площадь водной поверхности – 203 км<sup>2</sup>, высота призмы регулирования – 22 м. В соответствии с данными наблюдений по ближайшему гидрометрическому створу (Зун-Бурэн), расположенному в 140 км ниже по течению от плотины будущей ГЭС, средний сток р. Селенги составляет порядка 240–250 м<sup>3</sup>/с. Однако в последние 20 лет в условиях маловодья он был ниже на 10–20 %.

Период водообмена для водохранилища составит 0,4–0,5 года, и оно будет обеспечивать сезонное регулирование стока. Режим наполнения и сработки водоема, в соответствии с внутригодовыми изменениями притока воды в него, очевидно, будет характеризоваться максимальным наполнением осенью (август – октябрь) и наибольшей сработкой – весной (ап-

рель – май). Характер трансформации стока (рис.) говорит о его значительном внутригодовом выравнивании. В зимнее время он будет выше в 2–3 раза (и более), чем до зарегулирования, а в летнее, наоборот, может быть в 2–3 раза ниже.

В условиях зарегулирования наиболее существенные преобразования коснутся экстремальных расходов воды. Так, если максимальный расход воды Селенги у Зун-Бурэна в июле 1973 г. достигал 3550 м<sup>3</sup>/с [Гармаев, Христофоров, 2010], то после строительства ГЭС он, скорее всего, не превысит 2000 м<sup>3</sup>/с, хотя пропускная способностью гидроузла предполагается значительно выше. В условиях же маловодных лет (как 2007–2010 гг.) наибольший сток из водохранилища не будет превышать 600 м<sup>3</sup>/с.



**Осредненное внутригодовое распределение стока р. Селенги в районе Шурэнского водохранилища в естественных (1) и зарегулированных (2) условиях, % от годового**

Создание водохранилища и изменение динамики водного стока приведет к изменению гидрохимического режима р. Селенги. По аналогии с другими водохранилищами [Верболова, 1973; Денисова, 1979; Лабутина, 1985; Сороковинова, 1989] уменьшится амплитуда сезонных колебаний концентраций главных ионов и минерализации воды как в водохранилище, так и в нижнем бьефе. Основой для прогноза элементов

гидрохимического режима Шурэнского водохранилища послужили данные химического состава воды и гидрохимического режима р. Селенги и ее притоков, полученные в зоне затопления советско-монгольской экспедицией в 1974–1975 гг. [Шпейзер и др., 1977], и наши данные на этом участке реки, полученные летом 2013 г. Анализ результатов показал, что за прошедшие десятилетия существенного изменения концентраций главных ионов и относительного состава воды в верхнем течении р. Селенги не произошло, возможно, ввиду отсутствия здесь промышленных предприятий и разработок золоторудных месторождений, в отличие от бассейна р. Орхон и его притока р. Туул [Stubblefield et al., 2005; Integrated..., 2009].

Рост поголовья скота и нагрузки на пастбища заметного влияния на формирование химического состава и качества воды в верхнем течении Селенги пока не оказывает. В июле 2013 г. на участке реки от места слияния рек Идер и Мурен и до впадения р. Орхон суммарное содержание ионов в воде изменялось от 199,8 мг/л до 237,4 мг/л, а в притоках – от 200 до 319 мг/л. Из анализа более ранних данных [Шпейзер и др., 1977] видно, что в июле 1975 г., например, минерализация воды была несколько ниже и изменялась в пределах 150–215 мг/л, при этом в сезонном аспекте пределы колебания минерализации в главном водотоке составляли 150–304 мг/л, а в притоках – 196–734 мг/л. Состав воды за прошедшие 40 лет не изменился и соответствует гидрокарбонатному классу, группе кальция.

Содержание минерального азота в воде исследованных водотоков низкое: концентрации аммонийного азота изменялись в пределах 0,01–0,03 мг N/л (табл.), с максимумом в верхнем течении (створ ниже слияния рек Идер и Мурен), концентрации нитратного азота как в Селенге, так и в притоках не превышали 0,13 мг N/л. Однако в сравнении с предыдущим периодом исследований его максимальные величины увеличились почти в 2 раза, что может быть следствием роста поголовья скота.

Воды р. Селенги и исследованных притоков, за исключением р. Эгийн-Гол, содержат повышенные концентрации общего фосфора (см. табл.). В 1970-х гг. определяли только минеральный фосфор и размах колебаний его содержания в реке был значительно шире, с максимумом в осенний период [Шпейзер и др., 1977]. Низкие концентрации фосфора в июле 2013 г. могут быть обусловлены развитием фитопланктона. Согласно экологической классификации водоемов [Жукинский и др., 1985] качество воды в р. Селенге по содержанию общего фосфора в 2013 г. изменялось от разряда «вполне чистая» до «слабозагрязненная».

**Динамика концентраций биогенных элементов в воде р. Селенги и ее притоков в зоне затопления водохранилища**

Место отбора, год	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	P <sub>мин.</sub>	P <sub>общ.</sub>
	мг N/л		мкг P/л	
р. Селенга, 1974–1975 гг.	Не опр.	0,03–0,07	0–66	Не опр.
р. Селенга, 2013 г.	0,01–0,03	0,04–0,13	3–12	32–172
р. Хануи (устье), 2013 г.	0,01	0,03	6	35
р. Эгийн-Гол (устье), 2013 г.	0,01	0,06	2	8

Для оценки минерализации воды Шурэнского водохранилища нами использован метод М. И. Кривенцова и М. Н. Тарасова [1976], установивших для водохранилищ с коэффициентом водообмена больше 1 наличие устойчивых соотношений между минерализацией воды в реке и водохранилище. На основе полученных ими эмпирических зависимостей, проектных данных будущего водохранилища и сведений о гидрохимическом режиме реки нами определены предельные абсолютные величины ожидаемой минерализации. Согласно расчетам, минерализация воды в Шурэнском водохранилище при коэффициенте водообмена 2,0 будет изменяться в течение года от  $180 \pm 10$  до  $260 \pm 20$  мг/л. Исходя из состава вод р. Селенги и притоков, можно полагать, что воды водохранилища по составу главных ионов также будут относиться к гидрокарбонатному классу, группе кальция. Содержание гидрокарбонатов в воде может изменяться в пределах 35–44, сульфатов – 6,5–9,0, хлоридов – 1–3, кальция – 30–35, магния – 10–15, натрия – 6–15 и калия – 1–2 % экв. В заливах при пониженной водности, как и в питающих их реках, могут преобладать ионы хлоридов, сульфатов. Поскольку сток этих рек небольшой, заметного влияния на химический состав вод в транзитной части водохранилища они не окажут. При этом, как и в других водохранилищах, в результате трансформации водных масс, поступления из затопленных почв и пород в воде водохранилища в сравнении с реками может несколько измениться соотношение концентраций ионов. Относительное содержание гидрокарбонатов и кальция может понизиться, а сульфатов и хлоридов – повыситься.

Формирование минерализации и содержания главных ионов в водохранилище в основном будут определяться составом вод р. Селенги, тогда как динамика концентраций биогенных элементов и органических веществ – многими другими факторами: залитых почв и растительности, уровнем развития планктона, температурным режимом, стратификацией водных масс и др. Отсутствие данных по температурному режиму будущего водохранилища, объемам затопленной растительности и типам почв затрудняет прогноз режима биогенных элементов и органических веществ расчетным методом. Тем не менее, исходя из имеющейся инфор-

мации о динамике их концентраций в р. Селенге и ее притоках, а также прогнозных показателей гидробиологического режима Шурэнского водохранилища [Кожова и др., 1977], можно ожидать, что содержание соединений азота, минерального и общего фосфора и органических веществ в воде, по аналогии с другими водохранилищами, расположенными в различных климатических зонах, увеличится. Содержание аммонийного азота может изменяться в транзитной части водохранилища от 0,001 до 0,050 мг N/л, нитритного азота – от 0 до 0,008 мг N/л, нитратного азота – от 0 до 0,5 мг N/л, минерального фосфора – от 0 до 40 мкг/л. Максимальные концентрации биогенных элементов будут регистрироваться в придонном слое, что связано с их поступлением из затопленных почв и растительности и низким водообменом вследствие температурной стратификации водных масс.

Качество воды в транзитной части водохранилища будет изменяться от категории «очень чистая» до «слабозагрязненная». Надо полагать, в многочисленных мелководных заливах водохранилища (гидросеть включает 17 притоков) содержание азота и фосфора в воде будет выше, а качество воды ниже, что связано с затоплением лугово-болотных почв и пастбищ, низким водообменом, повышенной температурой воды, массовым развитием высшей водной растительности и фитопланктона. Ориентировочная биомасса фитопланктона в транзитной части оценена до 10 г/м<sup>3</sup> [Кожова и др., 1977].

Содержание органических веществ в водохранилище будет обеспечиваться речным стоком, вымыванием из затопленных почв и растительности, а также за счет продуцирования легкогидролизуемых органических веществ планктоном. В воде р. Селенги и притоков в настоящее время величина ХПК изменяется от 3,0 до 38 мг О/л, максимальные значения наблюдаются в паводок, минимальные – зимой. В водохранилище диапазон колебаний ХПК сузится, так как в результате снижения скоростей течения взвешенные вещества будут оседать в зоне подпора и меньше влиять на их содержание в центральной и приплотинной частях водоема. Предполагаем, что величина ХПК будет изменяться в транзитной части от 6 до 20 мг О/л, а в заливах над затопленными болотами достигать 25 мг О/л.

Произошедшие изменения химического состава воды в Шурэнском водохранилище будут сохраняться и в р. Селенге ниже плотины ГЭС до впадения р. Орхон. После впадения Орхона, имеющего более загрязненные воды, в р. Селенге возрастет содержание сульфатов, индикаторов промышленного загрязнения, нитратного азота и фосфора. В условиях естественного стока в 2013 г. концентрации общего фосфора в р. Селенге составляли 48 мкг P/л, в р. Орхон – 212 мкг P/л, ниже впадения Орхона в

Селенге – 92 мкг Р/л. Аналогичная картина характерна для минерального фосфора и нитратного азота. Полагаем, что в условиях зарегулированного стока влияние р. Орхон на химический состав селенгинских вод может усиливаться, особенно в условиях низкой водности. Ниже по течению, включая российский участок реки, на формирование химического состава и качество вод р. Селенги, как и в естественных условиях, будут оказывать влияние притоки и поступление в русло реки промышленных и хозяйственно-бытовых стоков от локальных источников загрязнения.

### Литература

*Верболова Н. В.* Формирование гидрохимического режима Братского водохранилища // Формирование планктона и гидрохимия Братского водохранилища. Новосибирск: Наука, 1973. С. 78–118.

*Гармаев Е. Ж., Христофоров А. В.* Водные ресурсы рек бассейна озера Байкал: основы их использования и охраны. Новосибирск: ГЕО, 2010. 231 с.

*Гречушников М. Г., Эдельштейн К. К.* Экспресс-оценка последствий гидротехнического строительства в бассейне р. Селенги // Водное хозяйство России. 2016. № 1. С. 66–82.

*Денисова А. И.* Формирование гидрохимического режима водохранилищ Днепра и методы его прогнозирования. Киев: Наук. Думка, 1979. 290 с.

*Жукинский В. Н., Оксюк О. П., Олейник Г. Н., Кошелев С. И.* Принципы и опыт построения экологической классификации качества поверхностных вод суши // Гидробиол. журн. 1981. Т. 17, № 2. С. 38–49.

*Кожова О. М., Загоренко Г. Ф., Ембаева Э. А. и др.* Материалы к прогнозу гидробиологического режима Шуренского водохранилища // Природные условия и ресурсы Прихубсугуля / Ред. Н. Ф. Лосев, Н. Содном. Вып. 5. Иркутск; Улан-Батор, 1977. С. 164–174.

*Кривенцов М. И., Тарасов М. Н.* Прогнозирование минерализации и содержания главных ионов в воде водохранилищ. Л.: Гидрометеиздат, 1976. 112 с.

*Лабутина Т. М.* Формирование и прогнозирование гидрохимического режима водохранилищ Северо-Востока СССР. Якутск: изд-во Якутского филиала СО АН СССР, 1985. 115 с.

*Сорокикова Л. М.* Формирование гидрохимического режима и качество воды р. Енисея и его водохранилищ: Автореф. дис. ... канд. геогр. наук. Ростов-на-Дону, 1989. 24 с.

*Техническое задание* на проведение региональной экологической оценки и оценки воздействия на окружающую среду и социальных последствий предлагаемого проекта «Шурэнская ГЭС». 2016. [Электронный ресурс]. <http://minprirodarb.ru/files/Соп%20Документы.pdf> (дата обращения: 03.02.2017).

*Шнейзер Г. М., Жигунова Н. М., Бадрах Д. и др.* К прогнозу химического состава воды Селенги в случае ее зарегулирования плотиной Шуренской ГЭС // Природные условия и ресурсы Прихубсугуля / Ред. Н. Ф. Лосев, Н. Содном. Вып. 5. Иркутск; Улан-Батор, 1977. С. 159–163.

*Integrated Water Resources Management for Central Asia: Model Region Mongolia (MoMo)*, 2009. [Электронный ресурс]. <https://www.iwrm-momo.de> (дата обращения: 15.11.2016).

*Stubblefield A., Chandra S., Eagan S. et al. Impacts of gold mining and land use alterations on the water quality of Central Mongolian Rivers // Integrated Environmental Assessment and Management. 2005. Vol. 1, N 4. P. 365–373.*

## **FORECAST OF WATER QUALITY IN SHURENSKOYE RESERVOIR (SELENGA RIVER, MONGOLIA)**

**L. M. Sorokovikova, V. N. Sinyukovich, I. V. Tomberg**

*Limnological Institute, Siberian Branch of RAS*

Based on the data on hydrochemical and water regimes in the Selenga River near the projected hydropower plant (HPP), we assessed the expected transformation of the qualitative composition of water from the Selenga River in Shurenskoye reservoir. Water mineralization will change insignificantly to 180–260 mg/l. The content of chlorides, sulfates and sodium is expected to rise in bays. Nutrient concentrations will increase: ammonium nitrogen up to 0.050 mg N/l; nitrate nitrogen up to 0.500 mg N/l, and mineral phosphorus up to 40 µg P/l. Chemical oxygen demand will change from 6 to 20 mg O/l in the transit area of the reservoir and up to 25 mg O/l in bays. Qualitatively, the water composition formed in the reservoir will remain the same below the HPP dam down to the inflow of large tributaries.

## **МИНЕРАЛОГО-ГЕОХИМИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ПРОЦЕССА СОВРЕМЕННОГО СЕДИМЕНТОГЕНЕЗА ОНЕЖСКОГО ОЗЕРА**

**В. Д. Страховенко<sup>1</sup>, Е. А. Овдина<sup>1</sup>, И. В. Даниленко<sup>1</sup>, Д. А. Субетто<sup>2</sup>,  
Н. А. Белкина<sup>2</sup>, Н. А. Ефременко<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>*Институт геологии и минералогии СО РАН, г. Новосибирск*

<sup>2</sup>*Институт водных проблем Севера КарНЦ РАН*

На основе изучения керн донных отложений Онежского озера комплексом современных минералого-геохимических методов установлено два типа диагенеза илов. Приводятся данные о морфологических, минералогических и геохимических особенностях донных илов. Изученные колонки керн донных осадков обоих типов состоят из сходных терригенных минералов и отличаются между собой присутствием аутигенных минеральных фаз Fe и Mn разной степени восстановления и обособления этих элементов в керне донных илов озера: Fe-Si материала от Mn минерализации.

Онежское озеро – один из крупных водных бассейнов, расположенных в зоне сочленения древнего Балтийского кристаллического щита и

палеозойских осадочных пород Русской платформы. Геологическому строению и истории развития Онежского озера и его бассейна посвящены многочисленные публикации [Бискэ и др., 1971; Демидов, 2006; Субетто и др., 2016]. На водосборной территории озера в составе горных пород преобладают туфы в основном базальт-долеритового состава, алевролиты, доломиты, шунгитоносные породы. Значительная часть побережья сложена породами архейского фундамента: амфиболитами, гранито-гнейсами и др. [Онежская..., 2011].

Воды озера отличаются малой минерализацией (39–46 мг/л). Содержание кислорода близко к 100%-му насыщению. Озеро малопродуктивное, олиготрофное. Крупные заливы (Кондопожская и Петрозаводская губы), подверженные процессам антропогенного евтрофирования, имеют мезотрофный статус.

Наиболее полно исследования донных отложений и процессы рудообразования в Онежском озере опубликованы в монографиях Н. И. Семеновича [Семенович, 1973 и др.]. Им изучен гранулометрический состав донных отложений (ДО), построены карты-схемы, диаграммы пространственного распределения различных фракций осадков по акватории озера и глубине ДО. Отмечается, что глинистые фракции ДО представлены кварцем, полевыми шпатами, амфиболами, слюдами и хлоритами; встречается кальцит, шунгит, каолинит. Указывается, что железонакопление происходит в профундали, где встречаются рудные корки. В современных работах о минеральном составе ДО дополнительной информации не появилось, кроме сообщения А. С. Медведева об обнаружении вивианита в одной из проб [Медведев и др., 2015].

Цель данной работы – исследовать минералого-геохимические особенности процесса современного седиментогенеза Онежского озера.

Объект исследования – верхняя часть кернов (0–50 см) ДО, расположенных территориально по акватории озера: скв. В1, В2 – Большое Онего; скв. С1, С2 – центральное Онего; Gu-206 – Уницкая губа; К 62 – Кондопожская губа; Газ1, Газ7, РО2, Р-49 – Петрозаводская губа. ДО отобраны специальным пробоотборником на глубину до 50 см. На месте проводился визуальный осмотр, литологическое описание кернов и оперативный анализ нестабильных параметров воды: Т, рН, Eh, концентрации кислорода. Керн изучался послойно. Макро- (Al, Fe, Ca, Mg, K, Na) и микроэлементный состав (Cd, Pb, Cu, Zn, Mn, Cr, Ni, Co, V, Hg, Be, Ba, Sr, Li) озерных вод и ДО определялся методом атомной абсорбции (АА), рентгенофлуоресцентным методом (РФА). Методом масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой (ИСП-МС) выполнено определение содержаний редкоземельных элементов в современных железо-марганцевых образованиях и ДО. Минеральный состав ДО изучался методами рентге-

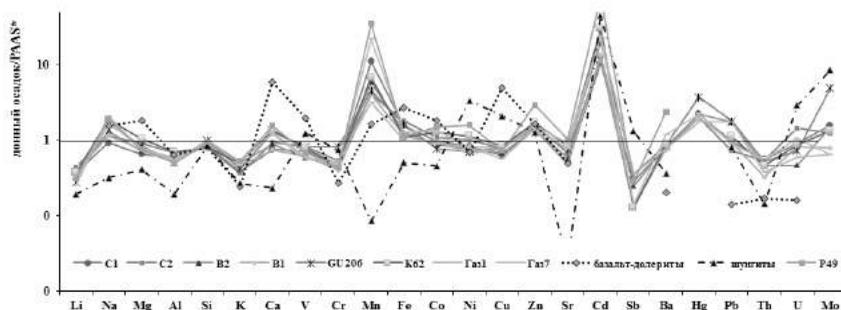
новской дифрактометрии (XRD) и ИК спектроскопии. Изучение морфологии, фазового и химического состава отдельных минералов ДО проводилось с использованием сканирующего электронного микроскопа MIRA 3 TESCAN (СЭМ).

При изучении керна ДО установлено два типа колонок. Первый тип распределен по всей акватории озера: первые несколько см жидкий охристый ил; далее корочка черного цвета (<3 мм) и ниже охристая корка, более мощная (до 1 см), корочек может быть несколько; под рудным слоем – неслоистый ил серо-зеленого цвета, постепенно уплотняющийся к низу колонки, который на глубине сменяется ленточными глинами. В серо-серозеленых илах присутствуют микрослойки черного и иногда белого цвета, их количество и последовательность имеет неравномерное пространственное и вертикальное распределение в колонках ДО. Второй тип колонки – верхний охристый слой отсутствует или присутствует в виде нескольких см темно-коричневого жидкого ила, ниже которого сразу же распространены неслоистые серо-зеленые осадки, аналогичные первому типу, т. е. отсутствует рудная корка. В микрослойках серо-зеленых илов добавляются прослои ярко-зеленого цвета. Второй тип колонок распространен на акватории Петрозаводской губы и Кондопожской.

В результате анализа проб ДО комплексом вышеперечисленных аналитических методов установлено, что основными минералами в ДО всех исследуемых скважин в верхней части кернов являются: рентгеноаморфная фаза (аморфный кремнезем диатомей), кварц, полевые шпаты (олигоклаз-андезин, калиевый полевой шпат), иллит (Fe), гетит или аморфные гидроокислы/окислы железа и марганца или их карбонаты (родохрозит, сидерит). С глубиной количество рентгеноаморфной фазы резко уменьшается и на уровне 20 см глубины исчезает, а увеличивается процент кварца.

Сопоставление концентраций элементов в кернах ДО озера с составом PAAS показало избыточное накопление в процессе современного осадкообразования в илах озера Mn, Cd, Mo, Na, Hg, Fe, Zn, Ca и значительное обеднение Sb, K, Cr, Th, Li (рис. 1). На графике приведены составы долерит-базальтов и шунгитовых пород, которые широко представлены на водосборной площади озера (взяты из литературных источников: [Онежская..., 2011]). К сожалению, данных по химическому составу осадочных пород, широко распространенных по берегам озера, найти не удалось. По средневзвешенным значениям содержания изученных элементов в ДО Онежского озера и горных породах значительно отличаются. Выявлена унаследованность содержаний элементов в ДО от горных пород водосборных площадей, если их усреднить, за исключением Mn. Среди пород водосборной площади озера в первую очередь размываются почвы и

четвертичные отложения, сформированные по более древним осадочным породам, в составе которых присутствуют алевролиты, доломиты, песчаники с карбонатным цементом и вулканогенно-осадочные породы базитового состава. В почвах, образованных по данным породам, содержание Fe и Mn достигает высоких значений (до 12 и 0,2 %, соответственно) [Белкина и др., 2016].



**Рис. 1.** Тренд содержаний элементов в донных отложениях Онежского озера, нормированных к содержанию в PAAS [Wedepohl, 1995], из разных скважин

Для обработки аналитических данных АА, РФА, ИСП-МС по ДО использовался кластерный анализ. Согласно кластер-анализу Q-типа, который разбивает выборку химических анализов проб ДО на группы и выявляет связи между ними, пробы различных скважин индивидуальны (рис. 2). В результате кластерного анализа R-типа, который выявляет корреляционные связи между химическими элементами, выделялось три группы с высокими коэффициентами корреляции внутри групп и отдельно обособленные Si и Fe. Тесные связи между элементами отдельных групп отражают совместное вхождение их в минералы, что подтвердилось данными изучения фазового состава ДО с использованием СЭМ и ИК спектроскопии. Так, обособленное положение Si и Fe определяется наличием нескольких главных минеральных фаз для них. Si сложены многочисленные панцири диатомовых, зерна кварца размерностью от микронной до нескольких см и силикаты. Fe концентрируется в железистом иллите, хлорите, гетите, а также в сидерите и вивианите  $((Fe, Mn)_xFe_{3-x}[PO_4]_2 \cdot 8H_2O)$ . Элементы первой группы отражают состав полевых шпатов, слюд, а также немногочисленных аксессуарных минералов. Ca и Sr входят в состав кальцита. Элементы третьей группы отражают состав марганцевых фаз, представленных в ДО Онежского озера в основном в виде минералов бёрнессита (Bir) с общей формулой  $[Mn^{+4}(O,OH)_2]^+[R_{0.5-1}(OH)_{1.5}] \cdot nH_2O$ ,



**Рис. 2.** Диаграмма кластерного анализа R-типа ДО различных скважин Онежского озера

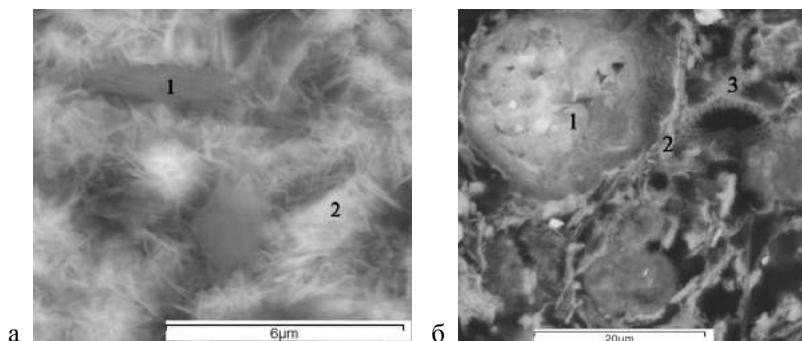
который является продуктом гидролиза серицита, широко распространенного в шунгитовых породах (рис. 3, а), но также встречаются аутигенные гидрооксидные фазы, где железо и марганец присутствуют совместно. В процессах постседиментационного изменения ДО при разложении органическое вещество окисляется с поглощением свободного  $O_2$ , а далее по мере убывания окислительной способности:  $MnO_2$   $NO_3$   $Fe_2O_3$ . В результате образуются ионы растворимого  $Mn^{2+}$ , который попадает в поровые воды и мигрирует до слоя осадка, в котором свободный  $O_2$  еще не поглощен органикой. Происходит окисление  $Mn^{2+}$  до  $Mn^{4+}$ , нерастворимого, с образованием слоя с концентрацией, в 5–6 раз превышающей его содержания выше и ниже. В Онежском озере рудный марганцевый слой сложен микроконкрециями марганца в ассоциации с кремнистыми створками диатомей, железистым иллитом, зернами кварца и других терригенных минералов (рис. 3, б).

По мере накопления осадков «ловушка» попадает в бескислородную область, где вновь происходит восстановление Mn до двухвалентного и вынос в вышележащие слои осадка. Глубина марганцевого рудного слоя определяется содержанием в придонной воде кислорода и притоком органики. Миграция восстановленного Fe устанавливается ниже уровня восстановленного Mn. Пик концентраций Fe не так ярко проявлен, потому что Fe,

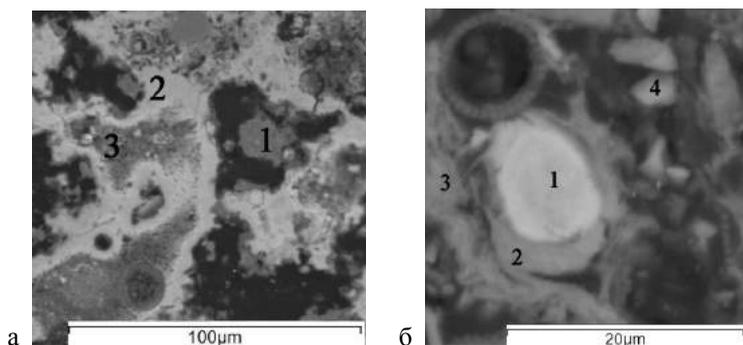
где  $R = Mn^{3+}$ , Na, Ba, Ca; пирролизита или родохрозита. Установлена тесная связь легких и средних редкоземельных элементов с минеральными фазами марганца и тяжелых РЗЭ – с акцессорными минералами.

Первый и второй типы керна ДО, описанные выше, отличаются между собой именно распределением содержаний Fe, Mn и их минеральными фазами. В кернах ДО первого типа рудные корки формируются по классической схеме, описанной в литературе и названной «марганцевой ловушкой» [Froelich et al., 1979]. В верхней части керна ДО, которая непосредственно контактирует с придонной водой, железо в основном концентрируется в железистом иллите,

кроме гидроксидных фаз, входит в состав силикатов и вивианита. В железистой рудной корочке резко преобладает гетит, железистый иллит, много створок диатомей и зерен минералов обломочной фракции (рис. 4, а). В слоеке встречаются обособленные выделения марганцевых фаз, оконтуренные гетитом (рис. 4, б). Содержание Fe и Mn ниже этого уровня довольно стабильно, так как неравномерности привноса буферуются восстановительным барьером. Если же по какой-нибудь причине этот «слоеный пирог» будет погребен под осадком, то оказавшиеся ниже основной восстановительной зоны гидроксидно-оксидные фазы Mn, Fe подвергаются восстановлению остатками органики и сохраняются в виде вивианита с примесью марганца (зеленые слойки), железистого хлорита и иногда родохрозита или сидерита (белые слойки), пиролюзита (черные слойки) (рис. 5, а).



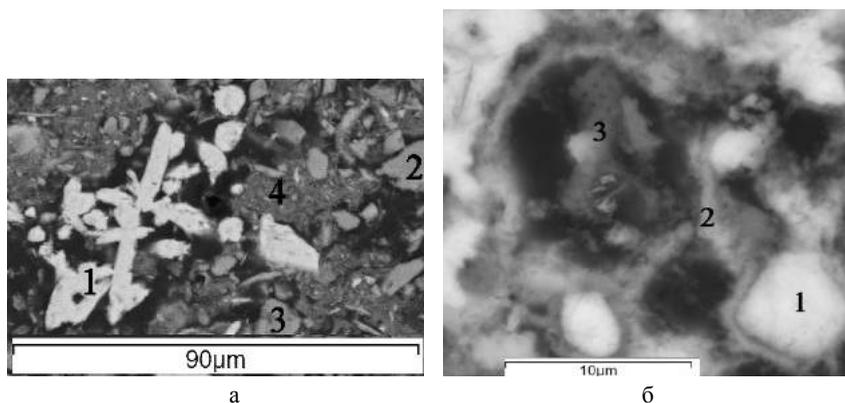
**Рис. 3:** а – железистый иллит (1), гетит с примесью марганца (2); б – бёрнессит (1), железистый иллит (2), створки диатомовых (3). Фото СЭМ



**Рис. 4:** а – рентгеноаморфный гетит (1), гётит (2), железистый иллит (3); б – марганцевая микроконкреция (1), рентгеноаморфный гетит (2), железистый иллит (3), кварц (4). Фото СЭМ

В колонках второго типа ввиду дефицита свободного  $O_2$  в наилке ионы растворимого  $Mn^{2+}$ ,  $Fe^{2+}$  мигрируют до слоя воды, и поэтому в рудном слое ловушек не образуется. Это подтверждается на порядок более высокими содержаниями Fe, Mn в придонной воде над кернами донных осадков колонок второго типа (0,0N мг/л) против (0,0N мг/л) первого типа. Во всех горизонтах колонок второго типа ДО железо и марганец представлены родохрозитом, сидеритом, вивианитом и хлоритом (рис. 5, б), начиная с первых см.

Результаты исследований показали наличие основных двух типов колонок ДО, стратификация слоев в них определяется содержанием в придонной воде кислорода и притоком органики, что приводит либо к формированию, либо к отсутствию рудных слоев на определенной глубине от границы раздела фаз «вода – донный осадок».



**Рис. 5. а – вивианит (1), кварц (2), полевой шпат (3), смесь хлорита и створок диатомовых (4); б – родохрозит (1), железистый хлорит (2), створки диатомовых (3). Фото СЭМ**

ДО Онежского озера представлены минералами обломочной фракции (кварц, полевые шпаты, биотит, амфибол, с примесью многих других силикатов, аксессуарных минералов) и аутигенными: аморфным кремнеземом (переходит в кварц), минеральными фазами Fe и Mn, с примесью кальцита, каолинита. По минеральному составу колонки отличаются между собой присутствием аутигенных минеральных фаз Fe и Mn разной степени восстановления и обособленного накопления этих элементов в керне донных илов озера: Fe-Si материала от Mn минеральных фаз.

Работа выполнена в рамках гранта РФФ № 16-17-10076.

## Литература

Белкина Н. А., Субетто Д. А., Ефременко Н. А., Кулик Н. В. Особенности распределения микроэлементов в поверхностном слое донных отложений Онежского озера // Наука и образование. 2016. № 3 (83). С. 135–139.

Бискэ Г. С., Лак Г. Ц., Лукашов А. Д. и др. Строение и история котловины Онежского озера. Петрозаводск, 1971. 74 с.

Демидов И. Н. О максимальной стадии развития Онежского приледникового озера, изменении его уровня и гляциоизостатическом поднятии побережий в позднеледниковье // Геология и полезные ископаемые Карелии. Вып. 9. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2006. С. 171–182.

Медведев А. С., Слуковский З. И., Полякова Т. Н., Калинин Н. М. О кристаллах вивианита в донных отложениях Онежского озера // Тр. IX междунар. биогеохимической школы. Т. 1. Барнаул, 2015. С. 256–258.

Онежская палеопротерозойская структура (геология, тектоника, глубинное строение и минерагения) / Отв. ред. Л. В. Глушанин и др. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2011. 431 с.

Семенович Н. И. Донные отложения Онежского озера. Л.: Наука, 1973. 104 с.

Субетто Д. А., Потахин М. С., Зобков М. Б. и др. Развитие Онежского озера в позднем плейстоцене. Цифровые карты // V Ладожский симпозиум: Сб. науч. тр. СПб.: Лема, 2016. С. 383–389.

Froelich P. N., Klinkhammer G. P. et al. Early oxidation of organic matter in Pelagic sediments of Eastern Equatorial Atlantic: Suboxic Diagenesis // Geochim. Cosmochim. Acta. 1979. Vol. 43. P. 123–155.

Wedepohl K. H. The composition of the continental crust // Ibid. 1995. Vol. 59, N 7. P. 1217–1232.

## MINERALOGICAL AND GEOCHEMICAL CHARACTERISTICS OF THE MODERN SEDIMENT FORMATION PROCESS IN LAKE ONEGO

V. D. Strakhovenko<sup>1</sup>, E. A. Ovdina<sup>1</sup>, I. V. Danilenko<sup>1</sup>, D. A. Subetto<sup>2</sup>,  
N. A. Belkina<sup>2</sup>, N. A. Efremenko<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Institute of Geology and Mineralogy, Siberian Branch of RAS, Novosibirsk

<sup>2</sup>Northern Water Problems Institute, KarRC RAS

Two types of sediment diagenesis have been distinguished by studying the bottom sediment column of Lake Onego using a set of modern mineralogical and geochemical methods. Data on morphological, mineralogical and geochemical features of bottom sediments are provided. The studied columns of bottom sediments of both types consist of similar terrigenous minerals and differ from one another in the presence of authigenic mineral phases of Fe and Mn at different stages of reduction and isolation of these elements in the lake's bottom sediment cores: Fe-Si of material from Mn's mineralization.

## ГИДРОХИМИЯ И ФИТОПЛАНКТОН ОЗЕР ЛАБЫНКЫР И ВОРОТА (РЕСПУБЛИКА САХА)

И. В. Томберг<sup>1</sup>, Л. И. Копырина<sup>2</sup>, А. Ю. Бессудова<sup>1</sup>, А. Д. Фирсова<sup>1</sup>,  
М. В. Башенхаева<sup>1</sup>, Ю. Р. Захарова<sup>1</sup>, Е. О. Горина<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Лимнологический институт СО РАН, г. Иркутск

<sup>2</sup>Институт биологических проблем криолитозоны СО РАН, г. Якутск

В работе представлены первые данные по химическому составу воды и видовому разнообразию фитопланктона уникальных озер Якутии (оз. Лабынкыр, оз. Ворота). Озера ультрапресные (сумма ионов меньше 45 мг/л), гидрокарбонатного класса, группы кальция, с низким содержанием биогенных элементов и органического вещества. В составе фитопланктона количественное преимущество составляют мелкие центрические диатомовые водоросли рода *Cyclotella*, по видовому разнообразию лидируют хризофитовые (золотистые) водоросли. По результатам исследования был обнаружен и описан новый для науки вид – *Spiniferomonas labynkyricussp. nov.* (Synurophyceae).

Лабынкыр – озеро, расположенное в верховьях р. Индигирки на высоте 1020 м над уровнем моря, на Сордонохском плато, Оймяконского района Республики Саха (Якутия). Водоем протянулся с севера на юг на 14 км, его ширина около 4 км, средняя глубина 50–60 м. Оз. Ворота расположено в 23 км к востоку от оз. Лабынкыр. Длина озера – 3,5 км, максимальная ширина (в юго-восточной части) достигает 1 км, глубина в пелагиали 40–60 м, местами до 90 м. Озера расположены среди непроходимой тайги. Ближайшее поселение Томтор находится в 105 км и отделено от Лабынкыра высокогорьями и заболоченными участками местности. Добраться до водоемов возможно только на вездеходе, лошадях или на вертолете, что создает большие трудности в их изучении. Исследование озер в зимний период осложняется экстремально низкими температурами [Шнуровозова, 2012]. Средняя температура воздуха вблизи Лабынкыра зимой равна минус 50 °С, зафиксировано ее понижение до минус 71,5 °С.

В июле 2014 г. и в подледный период (апрель и май) 2016 г. проведены комплексные исследования химического состава воды и видового разнообразия фитопланктона озер Лабынкыр и Ворота. Пробы отбирали на трех станциях в северной (станция 1, глубина воды 6 м, N 62°33'33"; E 143°36'27"), центральной (станция 3, 3 глубина 30 м, N 62°32'3"; E 143°35'44") и южной (станция 4, глубина 38 м, N 62°27'14.98"; E 143°37'26.8") частях оз. Лабынкыр и на одной станции в северной части оз. Ворота (глубина воды 30 м, N 62°25'20.5"; E 144°06'55.6"). Летом пробы отбирали батометром с лодки. Отбор подледных проб проводила группа аквалангистов подводно-исследовательского отряда Русского географического общества и Лимнологического института СО РАН.

Химический анализ выполнен общепринятыми в гидрохимии пресных вод суши методами [Руководство..., 2009], а также по методикам, разработанным и аттестованным в Лимнологическом институте СО РАН [Барам и др., 1999]. На месте отбора проб фиксировали растворенный кислород и производили измерение величины рН. Определение катионов ( $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ), анионов ( $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ), биогенных элементов ( $\text{Si}$ ,  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{NO}_2^-$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{PO}_4^{3-}$ ) и органического вещества проводили в стационарных условиях. Перед анализом пробы воды фильтровали от взвешенного вещества через мембранные поликарбонатные фильтры с диаметром пор 0,45 мкм.

Для определения численности и биомассы фитопланктона собраны интегральные (0, 5, 10, 15, 20 и 25 м) и придонные пробы воды, которые фиксировали йодным раствором Люголя. Обработку проб проводили седиментационным методом [Усачев, 1928]. Для более точного определения мелкоклеточных хризофитовых водорослей и их чешуек одновременно с батометрическими пробами осуществляли отбор образцов объемом 50 мл на фильтры Milipore с диаметром пор 1,2 мкм, высушивали при комнатной температуре, напыляли золотом и просматривали на сканирующем электронном микроскопе Philips' SEM 525-M и FEI Company Quanta 200. Также исследовали пробы с помощью трансмиссионного электронного микроскопа LEO 906E, для чего на сеточки с диаметром 0,5 мм наносили пробу и высушивали при комнатной температуре. Для проведения качественного анализа и для обнаружения малочисленных видов собраны пробы с помощью сети Джели.

Общая численность микроорганизмов (ОЧМ) была просчитана методом эпифлуоресцентной микроскопии с использованием флуорохромного красителя ДАФИ. Культивирование психрофильных органотрофных бактерий проводили при  $T\ 4\ ^\circ\text{C}$  на диатомовом агаре (ДА) и рыбо-пептонном агаре, разведенном в 10 раз (РПА 10).

**Гидрохимия.** Воды оз. Лабынкыр ультрапресные с высоким содержанием растворенного кислорода (в придонном слое не ниже 8,7 мг/л). Летом величина рН воды нейтральная – 6,8–7,6, подо льдом сдвинута в слабощелочную сторону – 7,5–8,2. Суммарное содержание главных ионов в пелагиале озера в июле не превышало 32 мг/л, в подледный период – 34 мг/л. В относительном составе преобладающий анион гидрокарбонат, преобладающий катион – кальций (рис. 1).

Воды оз. Лабынкыр хорошо перемешаны. Летом на всех исследованных станциях содержание главных ионов, концентрация растворенного кислорода и величина рН в придонной воде практически не отличались от таковых в воде поверхностного горизонта. На трех станциях, располо-

женных в разных частях озера, содержание ионов и химический состав воды были однородными (рис. 2). Похожую ситуацию наблюдали и подо льдом в апреле, когда близкие концентрации основных ионов отмечали в водной толще в разных частях пелагиали.

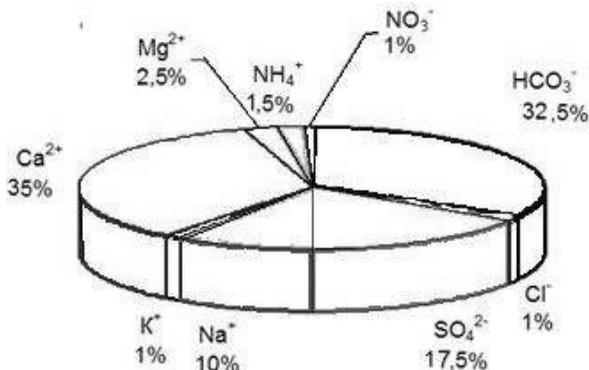


Рис. 1. Относительный состав воды оз. Лабынцыр (средний за 2014, 2016 гг.), % экв.

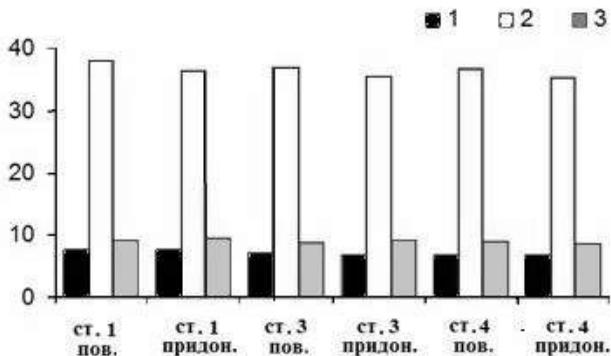


Рис. 2. Распределение величины pH (1), электропроводности,  $\mu\text{См}/\text{см}$  (2), и концентрации растворенного кислорода,  $\text{мг O}_2/\text{л}$  (3), в поверхностном и придонных слоях в северной, центральной и южной частях оз. Лабынцыр, июль 2014 г.

Содержание кремния в воде оз. Лабынцыр, как и других компонентов химического состава воды, по сезонам, по длине озера и глубине изменялось незначительно. В период наблюдений в пелагиал озера концентрации кремния варьировали от 2,2 до 2,8  $\text{мг}/\text{л}$ . Содержание

нитритного азота в поверхностном слое воды летом было выше (до 0,005 мг/л), чем в апреле (до 0,002 мг/л), что возможно связано с цветением хвойных растений и деструкцией большого количества пыльцы на поверхности озера. В придонном слое концентрации нитритов изменялись от 0,002 до 0,004 мг/л. Летом было выше и содержание фосфатов в поверхностной воде (0,005–0,007 мг/л). В апреле подо льдом и в придонном слое концентрации фосфатов в воде не превышали 0,004 мг/л. Содержание ионов аммония в толще воды в июле колебалось от 0,01 до 0,03 мг/л. В апреле в поверхностном слое концентрации  $\text{NH}_4^+$  были не больше 0,02 мг/л, повышаясь у дна до 0,06–0,07 мг/л. Концентрации нитратов в поверхностном слое в апреле колебались в пределах 0,33–0,42 мг/л, снижаясь в июле до 0,23–0,28 мг/л, что, вероятно, связано с развитием фитопланктона.

Озеро Ворота, как и оз. Лабынцы, характеризуется очень низкой минерализацией воды, сумма ионов не превышала 44 мг/л. Состав воды гидрокарбонатно-кальциевый: суммарное содержание этих ионов достигает 70 % в общем составе.

Исследования показали, что концентрации биогенных элементов и органического вещества в воде оз. Ворота невысоки и остаются близкими как в подледный период, так и в период вегетации водорослей (таб.).

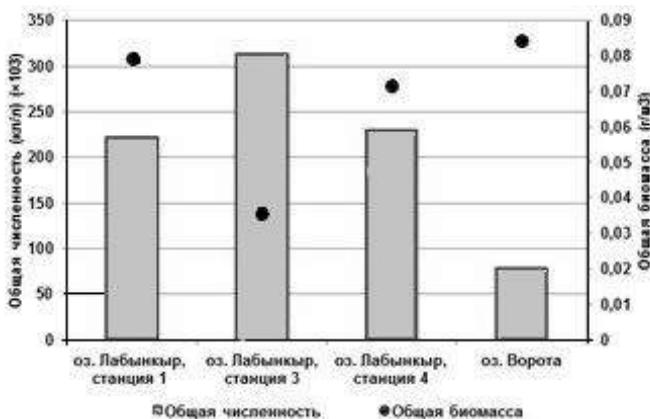
#### Содержание химических компонентов в воде оз. Ворота, мг/л

	Сумма ионов	$\text{PO}_4^{3-}$	$\text{NO}_3^-$	$\text{NO}_2^-$	$\text{NH}_4^+$	Si	ХПК
Июль 2014 г.	41–44	0,012–0,015	0–0,07	0,002	0,03	3,04–3,37	–
Май 2016 г.	42	0,012	0,08	0,000	0,04	3,29	2,3

**Фитопланктон.** По литературным данным в июне – августе 2010 г. водорослевое сообщество насчитывало 191 вид, из которых основную массу составляли бентосные диатомовые [Копырина, 2012]. По летним данным 2014 г. фитопланктон озер не так богат по разнообразию видов, но количественное преимущество также составляли мелкие центрические диатомовые водоросли рода *Cyclotella*. В летнем фитопланктоне озер встречались виды из пяти отделов Cyanoprokaryota (2), Cryptophyta (5), Chrysophyta (26), Bacillariophyta (9), Chlorophyta (7). Впервые с помощью электронной микроскопии удалось обнаружить большое разнообразие представителей хризифитовых (золотистых) водорослей рода *Spiniferomonas*, а также лорики *Kepherion* и *Pseudokepherion*, которые очень трудно различимы в световой микроскоп из-за малых размеров. Всего обнаружено 24 вида и внутривидовых таксона чешуйчатых хризифитовых водорослей, относящихся к классам Chrysophyceae и

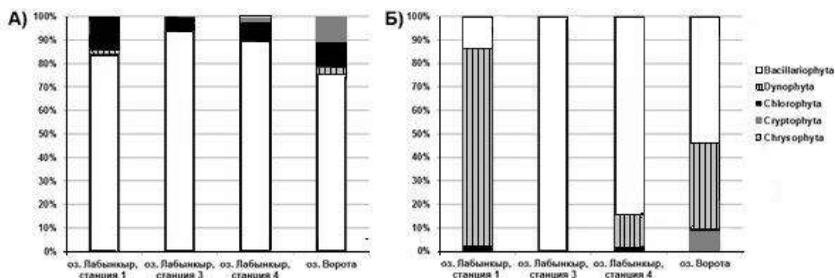
Synurophyceae. Как известно, преобладание разнообразия чешуйчатых хризофитовых водорослей свойственно олиготрофным водоемам арктических и субарктических регионов [Kristiansen, 2005]. Исследования с помощью электронной микроскопии показали, что хризофитовые лидируют по видовому разнообразию, тогда как диатомовые составляют основу численности и биомассы фитопланктона. Достаточно разнообразны были зеленые водоросли, что характерно для летнего периода. Из них чаще отмечались виды рода *Dictyosphaerium*. Из криптофитовых в основном встречался *Chroomonas nordstedtii*. Показано, что в летний период наименее разнообразно были представлены цианопрокариоты. В июле 2014 г. был обнаружен и описан новый для науки вид – *Spiniferomonas labyntyricus* sp. nov. (Synurophyceae).

Общая численность микроводорослей в оз. Лабынкыр подо льдом варьировала от  $222,23 \times 10^3$  до  $313,67 \times 10^3$  кл/л, максимальное значение отмечено в центральной части озера на станции 3 (рис. 3). Общая биомасса составляла от 0,036 до 0,079 г/м<sup>3</sup>, наибольшее значение которой было в северной части озера (станция 1). В оз. Ворота в подледный период численность микроводорослей составила  $79,55 \times 10^3$  кл/л, биомасса – 0,084 г/м<sup>3</sup>.



**Рис. 3. Общая численность и биомасса микроводорослей в подледный период в озерах Лабынкыр и Ворота**

В озерах Лабынкыр и Ворота подо льдом развивались представители пяти отделов микроводорослей: Bacillariophyta (13), Dynophyta (1), Chlorophyta (3), Struthophyta (2) и Chrysophyta (15) (рис. 4), наибольшей численности достигали представители рода *Cyclotella* (Bacillariophyta).



**Рис. 4. Процентное соотношение разных групп микроводорослей в подледный период в озерах Лабынкыр и Ворота:**

А – по численности; Б – по биомассе

**Бактериопланктон.** В подледных сообществах на границе вода – лед ОЧМ варьировала от  $0,4 \times 10^6$  кл/мл до  $1 \times 10^6$  кл/мл, а в водной толще составляла в среднем  $4 \times 10^5$  кл/мл. Максимальное количество культивируемых психрофильных бактерий выявлено в северной части оз. Лабынкыр – до 330 КОЕ/мл, в средней и южной части численность была незначительной (34 КОЕ/мл и 12 КОЕ/мл, соответственно). В оз. Ворота наибольшие значения психрофилов отмечены в верхних слоях воды (73 КОЕ/мл), с глубиной их количество снижалось.

Авторы выражают благодарность за помощь в проведении полевых исследований Председателю и члену Оймяконского отделения РГО в Республике Саха (Якутия) И. Е. Жулярову и А. А. Долженкову.

Работа выполнена в рамках бюджетной темы № 0345-2016-0001 «Исследование генетических, молекулярных, эволюционных и экологических аспектов представителей царства Chromista как основных продуцентов биогенного кремнезема и участников круговорота биогенных элементов водных экосистем» и государственного задания ИБПК СО РАН по теме «Фундаментальные и прикладные аспекты изучения разнообразия растительного мира Северной и Центральной Якутии» (AAAA-A17-117020110056-0).

### Литература

Барам Г. И., Верещагин А. Л., Голобокова Л. П. Применение микроколонной высокоэффективной жидкостной хроматографии с УФ-детектированием для определения анионов в объектах окружающей среды // Аналит. химия. 1999. Т. 54, № 9. С. 962–965.

Копырина Л. И. К изучению диатомовых водорослей озера Лабынкыр // Биологическое разнообразие и продуктивность водных экосистем Севера: Материалы Всерос. науч.-практ. конф., посвящ. 100-летию со дня рождения заслуженного

деятели науки РС(Я), д. б. н. Ф. Н. Кириллова (Якутск, 15–17 ноября 2011 г.). Якутск, 2012. 352 с.

*Руководство по химическому анализу поверхностных вод суши*. Ч. 1 / Ред. Л. В. Боева. Ростов н/Д: НОК, 2009. 1045 с.

*Шнуровозова Т. В.* Таинственные места России. ЗАО «ОЛМА Медиа Групп», 2012. 124 с.

*Усачёв П. И.* Материалы к флоре водорослей реки Енисей // Труды Сибирской научной рыбохозяйственной станции. Красноярск, 1928. Т. 3, № 2. С. 3–84.

*Kristiansen J.* Golden algae: a biology of chrysophytes. A. R. G. Gantner Verlag, distributed by Koeltz Scientific Books. Königstein, Germany, 2005. 167 p.

## **HYDROCHEMISTRY AND PHYTOPLANKTON OF LAKES LABYNKYR AND VOROTA (REPUBLIC OF SAKHA)**

**I. V. Tomberg<sup>1</sup>, L. I. Kopyrina<sup>2</sup>, A. U. Bessudova<sup>1</sup>, A. D. Firsova<sup>1</sup>,  
M. V. Bashenkhayeva<sup>1</sup>, Yu. R. Zakharova<sup>1</sup>, E. O. Gorin<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>*Limnological Institute, Siberian Branch of RAS*

<sup>2</sup>*Institute for Biological Problems of Cryolithozone, Siberian Branch of RAS*

The authors present the first data on the water chemical composition and phytoplankton species diversity in two unique lakes of Yakutia (Labynkyr and Vorota). These lakes are ultra fresh (total ions less than 45 mg/l), of the bicarbonate class, calcium group, with low content of nutrients and organic matter. Small centric diatoms of the genus *Cyclotella* prevail quantitatively in the phytoplankton, chrysophytes being the leaders in species diversity. During the study the authors found and described a species new to science, *Spiniferomonas labynkyricus* sp. nov. (Synurophyceae).

# **ЭКОСИСТЕМЫ ОЗЕР. ГИДРОБИОЛОГИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ**

## **ЧУЖЕРОДНЫЕ И АБОРИГЕННЫЕ АМФИПОДЫ В ВОДНЫХ ЭКОСИСТЕМАХ СЕВЕРА ЕВРОПЕЙСКОЙ РОССИИ**

**Н. А. Березина**

*Зоологический институт РАН*

В настоящем обзоре рассмотрены чужеродные и аборигенные виды ракообразных из отр. Amphipoda в водоемах Европейского Севера, на территории Лапландской и Балтийской провинций Палеарктики. Материал собран в 2000–2016 гг. и по литературе. Показано, что только 5 % всех зарегистрированных видов в России расширяют свой ареал в течение последних 100 лет. Всего в изученном регионе отмечено 26 видов, из них большая часть – выходцы из Понто-Каспийского и Байкальского регионов. Основные векторы расселения видов амфипод связаны с деятельностью человека.

Амфиподы – богатая видами группа бентосных животных, которые освоили разные экологические ниши, приспособившись к разным условиям пространства. Континентальные воды России особенно богаты амфиподами (всего насчитано 581 вид и подвид амфипод), 61 % состава фауны обитает в оз. Байкал. Это исследование посвящено амфиподам континентальных водоемов севера европейской части России, которые малоизучены по вопросу роли этих раков в их экосистемах. Согласно системе зоогеографического районирования континентальных водоемов, территория Европейского Севера входит в Палеарктическую область, занимая значительную часть Европейско-Сибирской подобласти. В этой работе подробно рассмотрены Лапландская и Балтийская провинции. Лапландская провинция отличается суровыми климатическими условиями и низкой продуктивностью водоемов, среди которых изобилуют олиготрофные и дистрофные озера. Балтийская провинция охватывает обширную территорию бассейнов Онежского и Ладожского озер, на западе – бассейны рек Балтийского и Северного морей, опресненный Финский залив.

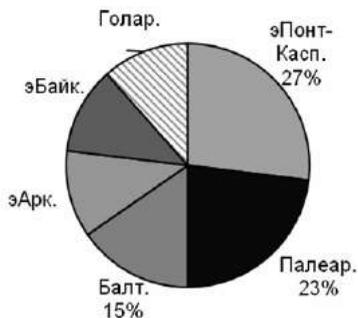
Изменения антропогенного характера и климата в регионе исследования на современном этапе развития человечества могли привести к преобразованиям структуры водных сообществ пресноводных и эстуарных экосистем, исчезновению стенобионтных видов амфипод или, наоборот, появлению новых видов амфипод в результате биоинвазий. Известно, что масштабные намеренные интродукции видов в 1950–1980-х гг., с юга на север и с востока на запад, в разные водные бассейны России способствовали широкому распространению амфипод.

Место разных видов амфипод (как аборигенных, так и вселившихся) в трофических сетях и их вклад в функционирование водных экосистем рассматриваемого региона трудно определить, прежде всего, по двум причинам: 1) вследствие эколого-физиологических особенностей раков группы Amphipoda, т. е. их способности адаптироваться к широкому спектру физико-химических условий среды обитания; и 2) очень малой изученности и фактического отсутствия работ, посвященных эколого-физиологическим характеристикам этой группы, их жизненным циклам, роли в трофической сети и т. д. Данная работа посвящена исследованию эколого-физиологических характеристик жизнедеятельности массовых видов. Среди них основное внимание уделено изучению закономерностей размножения и питания под влиянием разных факторов среды обитания. Изучены трофические связи между сосуществующими видами амфипод, представителями донных и планктонных сообществ и рыбами.

Согласно современным представлениям о распространении амфипод в континентальных водах России все виды могут быть подразделены на 11 эколого-биогеографических групп: голарктические, западно-палеарктические, балтийские эстуарные, сибирско-тихоокеанского региона (восточно-палеарктические), амфипацифические, кавказские, центрально-азиатские, байкальские, эмигранты из оз. Байкала, понто-каспийского региона и арктических морей [Takhteev et al., 2015]. В водоемах севера европейской России обитают 26 видов из разных эколого-биогеографических групп, среди них доминируют палеарктические виды, виды понто-каспийского происхождения и балтийские эстуарные, составляя вместе около 70 % видового богатства (рис.). Высокому доминированию понто-каспийских видов способствовали антропогенные интродукции для улучшения кормовой базы и повышения рыбопродуктивности северных озер и водохранилищ. Известно, что, по крайней мере, 30 видов амфипод понто-каспийского происхождения, три вида байкальского происхождения (*Micruropus possolskii*, *M. wohlii* и *Gmelinoides fasciatus*) и так называемые «ледниковые реликты» (эмигранты из арктических морей), такие как *Monoporeia affinis* и *Pallasea quadrispinosa*, использовали для преднамеренных вселений в континентальные воды на территории СССР.

### Вклад разных по происхождению видов в фауну разноногих ракообразных в континентальных водоемах севера России:

Голар. – голарктические, эПонт-Касп. – понтокаспийские, Палеар. – палеарктические, Балт. – балтийские эстуарные, эАрк. – арктические, эБайк. – байкальские, Голар. – голарктические



На примере Финского залива показательны изменения, произошедшие в течение последних 100 лет в видовом составе и представленности в донных сообществах амфипод. Фауну амфипод бассейна Балтийского моря изучали с конца XIX столетия, когда четыре вида – *Gammarus pulex*, *Gammarus lacustris*, *M. affinis* и *P. quadrispinosa* – были обычны в эстуарии р. Невы, однако исследования амфипод оставались отрывочными. А. А. Максимовым была показана важная роль монопорей в донных сообществах залива в 80–90-х гг. прошлого века, а в последние десятилетия было выявлено, что фауна пополнилась новыми видами, и в силу разных причин произошли перестройки донных сообществ [Березина, Максимов, 2016]. В 2013–2015 гг. в российской части Финского залива всего обнаружено 10 видов разноногих ракообразных отряда Amphipoda [Березина, Максимов, 2016]. Из них четыре вида – *Gammarus tigrinus*, *Chelicorophium curvispinum*, *Pontogammarus robustoides* и *G. fasciatus* – относятся к недавним видам-вселенцам. Остальные виды – это типичные обитатели эстуарных областей Балтийского моря и рассматриваемого региона.

В данной работе показано, что амфиподы – важный компонент литоральных и профундальных сообществ и других континентальных водоемов севера европейской России. Преобладание по биомассе амфипод-вселенцев выявлено в большинстве водоемов, куда они попали, особенно в первые десятилетия их акклиматизации. Это связано с характерным эксплозивным нарастанием численности в период после вселения. Такие видимые изменения в составе видов амфипод и их количественных популяционных показателях могут иметь отклик со стороны сообществ водных животных и в целом экосистем водоемов, что требует особого внимания.

Во многих озерах амфиподы – основа питания многих бентоядных рыб, составляют до 70–90 % по массе в их пищевом комке. Так, доля амфипод по массе в пищевом комке бентоядных рыб в прибрежных районах

оз. Ладожского – налим ~90 %, окунь ~95–98 %, ерш – 72–88 %. Большинство изученных амфипод по типу питания – всеядные организмы; т. е. хищничество может быть основной пищевой стратегией для них, наряду с сапрофагией и фитофагией. При этом доказана смена пищевых спектров в онтогенезе, т. е. переход с позиции первичных консументов к позиции вторичных консументов (использован метод стабильных изотопов). Трофические условия в онтогенезе определяют скорость роста и показатели плодовитости, наиболее благоприятна для здоровья и роста амфипод смешанная растительно-животная диета.

Были рассчитаны рационы при нехищном и хищном питании амфипод. Они подчинялись строгой зависимости интенсивности питания от массы консумента, которая была описана степенной функцией. В дальнейшем эти уравнения использованы для оценки влияния амфипод на разные компоненты в местообитаниях, что особенно важно при изучении видов-вселенцев. Для этого был рассчитан индекс потенциального хищничества (IPP), который есть отношение рациона популяции хищничающих амфипод (С) к суммарной продукции (Р) их потенциальных жертв за определенный период:  $IPP = C/P$ . Если  $0 < IP < 0,5$  – воздействие на беспозвоночных слабое,  $0,5 < IP < 1$  – среднее (умеренное), а при  $IP > 1$  – сильное. По данным 2013 г. показано, что в Финском заливе *P. robustoides* оказывает сильное влияние на количество сосуществующих беспозвоночных (выедая 50 % их продукции), в то время как остальные виды амфипод оказывают незначительное влияние на беспозвоночных.

Межвидовое хищничество относится к наиболее общим и типичным формам взаимодействия между амфиподами, и этот фактор рассматривается в качестве основного, объясняющего исключение одних видов другими. В результате хищничества было отмечено значительное снижение численности *G. fasciatus* в местах совместного обитания его с *P. robustoides* в эстуарии р. Невы [Berezina, Panov, 2003]. В других водоемах примеры вытеснения одного вида другим также отмечали в случае сосуществования, например, для *Gammarus lacustris* и *G. fasciatus* и *Gammarus pulex* и *G. lacustris*. В природе отношения «хищник – жертва» опосредуются структурной сложностью обитания, и многие аспекты структуры, которые способствуют этому взаимодействию, зачастую остаются неуловимыми. Понимание механизма взаимодействия между амфиподами стало возможно при использовании упрощенных экспериментальных манипуляций с количеством жертв, пространством и наличием укрытий, таким образом эффект хищника на жертву был изучен при участии двух сосуществующих видов. Получено, что, например, успех сосуществующих *G. fasciatus* или *G. lacustris* одинакового размера зависит от численной представленности и побеждает вид с большим репродуктив-

ным потенциалом. Сравнительное исследование отношения между численностью жертв и скоростью потребления их хищником, т. е. функциональных откликов амфипод, в дальнейшем может быть использовано в качестве инструмента для предсказания хищного пресса видов-вселенцев.

Формирование развернутых представлений о механизмах трофических взаимосвязей и динамике биотического круговорота в водных экосистемах неизбежно связано с представлением о круговоротах биогенных веществ, которые остаются слабоизученными, особенно в олиготрофных водоемах севера России. В таких экосистемах уровень содержания биогенных веществ зачастую является фактором, лимитирующим жизнедеятельность гидробионтов, и доля участия живых организмов в его круговороте внутри экосистемы может приобретать особое значение для поддержания ее стабильности. Ракообразные Amphipoda, составляя основу биоценозов по биомассе в оз. Кривом (Северная Карелия), питаются донными организмами и детритом и совершая вертикальные и горизонтальные миграции, вносили существенный вклад в потоки растворенных фосфатов из донных отложений в водную толщу. Как показали проведенные экспериментальные исследования, они обладают более высокой интенсивностью экскреции фосфора, чем, например, моллюски. На примере разных зон оз. Кривого показано, что скорость регенерации фосфора сообществами литорали значительно (в 7 раза) превышает скорость его экскреции животными профундали, и амфиподы *G. lacustris*, *M. affinis* и *Gammaracanthus loricatus* переносят 80 % фосфатов за счет экскреции. В опытах с амфиподами также изучена их способность влиять на активность фермента внеклеточной фосфатазы, которая оказалась в 3–8 раз выше в присутствии амфипод, по сравнению с контролем. Этот результат может свидетельствовать о появлении в среде доступного фосфора и, таким образом, стимулировании амфиподами роста первичных продуцентов. Вместе с тем механизмы воздействия требуют дальнейшего изучения.

### Литература

Березина Н. А., Максимов А. А. Количественные характеристики и пищевые предпочтения бокоплавов (Crustacea: Amphipoda) в восточной части Финского залива Балтийского моря // Журнал Сибирского федерального университета. Биология. 2016. Т. 9, № 4. С. 409–426.

Berezina N. A., Panov V. E. Establishment of new gammarid species in the eastern Gulf of Finland (Baltic Sea) and their effects on littoral communities. Proceeding of the Estonian the Estonian Academy of Sciences // Biology and Ecology. 2003. Т. 52 (3). P. 284–304.

Takhteev V. V., Berezina N. A., Sidorov D. A. Check-list of Amphipoda (Crustacea) from continental waters of Russia, with data on alien species // Arthropoda Selecta. 2015. Т. 24 (3). P. 335–370.

## ALIEN AND NATIVE SPECIES OF AMPHIPODS IN CONTINENTAL WATERS OF NORTH EUROPEAN RUSSIA

N. A. Berezina

*Zoological Institute RAS*

The historical and current distribution ranges of alien and native species of amphipods in continental waters of North European Russia (Lapland and Baltic provinces of the Palearctic region) are analyzed. The data are based on original collections of species for 2000–2016 and published sources. Only 5% of all currently registered species in continental waters of Russia have been actively expanding their range over the last 100 years. The list of amphipods in the North of European Russia includes 26 species, most of them originate from the Ponto-Caspian and Baikalian regions. Possible vectors of dispersal for these species within continental waters of Russia are human-mediated.

## АНТРОПОГЕННЫЕ СУКЦЕССИИ МЕЛКОВОДНЫХ СЕВЕРНЫХ ОЗЕРНЫХ ЭКОСИСТЕМ ПРИЛЕДНИКОВОГО ПРОИСХОЖДЕНИЯ

Н. Л. Болотова

*Вологодский государственный университет*

Предполагается, что в условиях глобального загрязнения природные сукцессии водных экосистем уже перешли в антропогенные, но разной степени выраженности. Продвинутость сукцессий зависит от приоритетности природных и антропогенных факторов. Проанализированы изменения трех мелководных озер общего ледникового происхождения, подверженных антропогенному эвтрофированию и токсификации. Исследования с 1970-х по 2000-е гг. выявили разные темпы эвтрофирования озер и нелинейный отклик экосистем на антропогенное воздействие. Установлено влияние исторических причин, природных условий и деятельности человека на расхождение путей развития озер.

**Введение.** В классической экологии представления, связанные с развитием экосистем, основываются на известных положениях об их сукцессиях в сторону устойчивых климаксных стадий. Однако в условиях антропогенного пресса естественный ход природных процессов нарушается, а высокая устойчивость экосистемы не всегда означает ее экологическое благополучие. Поэтому вопрос устойчивости является дискуссионным, что, соответственно, требует осмысления путей развития экосистем под влиянием деятельности человека. Это определило актуальность разработки понятия антропогенной сукцессии, под которой обычно подразумевают антропогенную трансформацию экосистем, завершающуюся их деградацией.

На наш взгляд, разработка концепции антропогенных сукцессий не должна механически укладываться в рамки общеизвестной теории природных сукцессий. Особенно это касается современной ситуации повсеместного загрязнения водных экосистем, учитывая значимость воздушной эмиссии в объемах поступления загрязняющих веществ. Можно считать, что в условиях глобального антропогенного воздействия, прямо или косвенно затрагивающего все экосистемы, природные сукцессии уже перешли в антропогенные, но разной степени выраженности. При этом продвинутость наблюдаемых сукцессий зависит от смены приоритетности действия природных и антропогенных факторов. Известные законы саморазвития экосистем определяют эмерджентный характер перехода природной сукцессии в антропогенную и, соответственно, неправомерность его сведения только к количественным изменениям природных процессов.

Антропогенные сукцессии наиболее выражены в мелководных экосистемах, которые быстро изменяются под влиянием хозяйственной деятельности. В этом плане особый интерес представляют уязвимые к антропогенной трансформации северные мелководные озера с обширными освоёнными водосборами.

Наша работа посвящена анализу особенностей антропогенных сукцессий мелководных экосистем на примере путей развития северных озер общего приледникового происхождения. Модельными объектами послужили крупные озера Белое (1284 км<sup>2</sup>), Кубенское (417 км<sup>2</sup>), Воже (418 км<sup>2</sup>), расположенные на территории Вологодской области. Общее приледниковое происхождение обусловило их генезис как мелководных водоемов, условия северной территории определили сходные черты развития, а разная антропогенная нагрузка повлияла на степень трансформации природных сукцессий. Для сравнительного анализа путей развития трех рассматриваемых озер послужили ранее выявленные нами тренды изменения экосистем с 1970-х по 1990-е гг. [Болотова, 1999] и имеющиеся современные материалы по состоянию этих водоемов.

**Особенности антропогенных сукцессий озер приледникового происхождения.** Отличительной чертой генезиса озер, обособившихся из крупных приледниковых бассейнов Северо-Запада, является их мелководность, ставшая аттрактором дальнейшего развития. Этот наиболее важный для сукцессий озерных экосистем морфологический параметр, характерный для районов Валдайского оледенения, связан с сокращением обводненности и интенсивной седиментацией при эрозионных процессах. Рассматриваемые водные экосистемы – Белое, Кубенское и Воже – классифицируются как реликтовые озера-разливы [Субетто, 2009]. После обособления 13–9 тыс. лет назад из единого Сухонского озера [Квасов, 1975]

общие черты лимногенеза этих озер определялись сходными климатическими и ландшафтными условиями. Наличие обширных водосборов обеспечило интенсивное осадконакопление с аккумуляцией органических веществ, а также, в свою очередь, сходный характер протекания экосистемных процессов в сторону повышения трофического статуса. Поэтому разная степень уязвимости приледниковых озер в условиях мелководности к процессам эвтрофирования, лежащих в основе естественных сукцессий сообществ, исходно сформировалась в лимногенезе.

Проведенный нами сравнительный анализ скорости осадконакопления и динамики состава седиментационного материала позволил выявить значение этих исторических причин для современных отличий процессов эвтрофирования трех рассматриваемых озер [Болотова, 1999, 2016]. Особенности лимногенеза способствовали эвтрофированию оз. Воже, в меньшей степени – оз. Кубенского и менее всего – оз. Белого. Длительность олиготрофной стадии в развитии озер была связана с температурным режимом северных водоемов и фосфорным лимитированием.

Установлено, что различия природных сукцессий озер при переходе на мезотрофную стадию определялись разветвлением путей развития на фоне их морфологических и морфометрических особенностей, а также отличий водосборов [Болотова, 2009]. Так, для меньших по площади и глубине озер Кубенское (2,5 м) и Воже (2 м) характерны более высокие темпы эвтрофирования, связанные с увеличением внутренней биогенной нагрузки при интенсивном зарастании. Вытянутая форма этих озер, изрезанность береговой линии также способствуют созданию очагов локального эвтрофирования. Кроме того, оба озера имеют обширные заболоченные водосборы. Большее в три раза по площади и более глубокое (4 м) озеро Белое овальной формы не имеет выраженной литорали, и отличается крайне низкой степенью зарастания. Фитопланктонному пути развития этого озера соответствует наименьшая внутренняя биогенная нагрузка. Меньшая величина удельного водосбора и его заболоченности определяет невысокий приток в озеро Белое аллохтонной органики. Кроме того, своеобразной динамике водных масс Белого озера сопутствуют трансседиментационные процессы, ускоряющие вынос биогенов. Следовательно, комплекс природных условий замедляет процессы эвтрофирования в Белом озере, но ускоряет его темпы в озерах Воже и Кубенском.

С одной стороны, антропогенное влияние преломляется через природные особенности озер, определяющие разную чувствительность к воздействию. С другой стороны, рассматриваемые озера четко ранжируются по степени антропогенной нагрузки Белое > Кубенское > Воже. Исходно наибольшей хозяйственной нагрузке подвергается озеро Белое, входящее в состав интенсивно эксплуатируемого Волго-Балтийского пути. Тем

более что в 1964 г. озеро стало частью Шекснинского водохранилища и подверглось коренной перестройке при зарегулировании стока, резко увеличились его площадь и глубины. Озеро Кубенское входит в состав Северо-Двинской водной системы, и частично зарегулированный сток придает водоему черты водохранилища. В оба озера поступает большой объем сточных вод при высокой степени заселения берегов и освоенности водосборов, и они находятся в зоне влияния атмосферной эмиссии крупных промышленных центров. Озеро Воже, расположенное на северной границе области вдали от центров хозяйственной деятельности, берега которого не заселены, можно отнести к условно фоновому водоему, испытывающему косвенную антропогенную нагрузку через водосбор и атмосферный перенос. Следовательно, в отличие от оз. Воже, для озер Белого и Кубенского имеются все предпосылки перехода к выраженной антропогенной сукцессии за счет непосредственного влияния деятельности человека на сами водоемы.

Однако функционирование озер как накапливающих элементов ландшафта зависит также от водосборов и их трансформации, связанной с характером, интенсивностью и длительностью антропогенного пресса. Первоначально хозяйственная деятельность на территории Вологодской области, включая вырубку лесов, распашку земель, развитие животноводства и растениеводства, повлекла за собой изменение потока биогенов и аллохтонных органических веществ с водосборов [Болотова, 2009]. Предпосылки ускорения процессов эвтрофирования были созданы в 1950–1960-е гг. за счет резкого увеличения поступления биогенов при развитии химической промышленности и интенсификации сельского хозяйства с широким применением минеральных удобрений.

Следует подчеркнуть, что приоритет природных факторов в процессах эвтрофирования всех трех озер наблюдался вплоть до 1970-х гг., несмотря на антропогенную составляющую во внешней биогенной нагрузке [Болотова, 1999]. Подобное развитие мелководных озерных экосистем можно рассматривать как аллогенную сукцессию в рамках мезотрофной стадии. Последствия антропогенного воздействия отражались в отклонениях параметров абиотической среды и в динамике количественных и качественных показателей развития трофических уровней, но в пределах гомеостаза экосистем.

Однако при неустойчивом состоянии мелководных экосистем, к которому их приближает как естественная олиготрофно-эвтрофная сукцессия, так и хроническое антропогенное воздействие, незначительное усиление влияния извне может качественно изменить ситуацию. Возможен переход к стадии, начиная с которой дальнейшее развитие экосистемы будет связано с приоритетом антропогенных факторов. В качестве примера

следует привести озеро Воже, где при слабой освоенности водосбора произошло увеличение внешней биогенной нагрузки за счет именно антропогенной составляющей. Это было связано с интенсификацией применения минеральных удобрений в 1980-е гг., и дополнительный приток минеральных форм биогенов озеро получило через реку Вожегу, к которой приурочены сельскохозяйственные угодья. Природная уязвимость озера Воже к дополнительному поступлению биогенов определила наиболее высокие темпы изменения данной экосистемы, испытывающей наименьшую хозяйственную нагрузку.

Неоднозначность изменения озерных экосистем при разной антропогенной нагрузке иллюстрирует сравнительный анализ их состояния к 1990-м гг. по сравнению с 1970-ми [Болотова, 1999]. Так, возрастание внешней биогенной нагрузки было установлено во всех трех озерах, но с наименьшими показателями для оз. Воже. Расчеты показали, что объемы внешнего поступления общего фосфора увеличились в оз. Белое на 91 т/год, в Кубенское – на 74 т/год, а в оз. Воже – на 6 т/год. При этом увеличение хозяйственной нагрузки отразилось в дополнительном поступлении минерального фосфора с водами притоков и осадками: в Кубенское озеро больше на 18 мкг г/м<sup>2</sup>/год, в оз. Белое – на 7 мкг Р/м<sup>2</sup>/год, а в оз. Воже – на 2 мкг Р/м<sup>2</sup>/год.

Однако дальнейший круговорот биогенов отразил нелинейный отклик озер на внешнее воздействие при взаимодействии природных и антропогенных факторов. Общая фосфорная нагрузка оказалась гораздо больше в озерах Воже и Кубенское, для которых характерен «макрофитный» путь сукцессий. Это связано с преобладающим усвоением биогенов макрофитами, усилением деструкционных процессов, интенсивной диффузии элементов в воду в восстановительных условиях при дефиците кислорода и интенсивной динамике водных масс. Увеличение роли внутриводоемных процессов в динамике фосфора отражают величины внутренней фосфорной нагрузки, заметное повышение которой отмечалось в наиболее зарастающем оз. Воже – на 14 мкг Р/м<sup>2</sup>/год и Кубенском – на 13 мкг Р/м<sup>2</sup>/год. В оз. Белом при «фитопланктонном» пути сукцессии внутренняя фосфорная нагрузка за этот период увеличилась всего на 4 мкг Р/м<sup>2</sup>/год. Расчет объемной фосфорной нагрузки также выявил гораздо большее ее увеличение для озер Кубенского и Воже, по сравнению с оз. Белым, соответственно на 140, 119 и 9 мг Р/м<sup>3</sup>/год. По темпам возрастания объемной азотной нагрузки данные озера располагаются в следующий ряд: Кубенское > Белое > Воже. Установленные величины соотношения минеральных форм азота и фосфора свидетельствуют об отсутствии азотного лимитирования в озерах Воже и Кубенском, что придает их сукцессиям черты гумифицирования и дистрофического.

«Макрофитный путь» эвтрофирования мелководных озер при разбалансировке продукционно-деструкционных процессов имеет более быстрые темпы. Это характерно как для оз. Воже при слабой внешней биогенной нагрузке, так и для оз. Кубенского, где этот процесс стимулируется еще дополнительным антропогенным воздействием. Устойчивость оз. Белого в отношении антропогенного эвтрофирования связана со спецификой осадконакопления и внутриводоемных процессов, а также с положительным эффектом зарегулирования стока при увеличении глубины озера. По степени повышения трофического статуса озера располагались в следующем порядке: Кубенское = Воже > Белое.

Выявленные тенденции развития рассматриваемых озер наблюдались и в 2000-е гг., хотя снижение хозяйственной нагрузки привело к некоторому уменьшению поступления биогенов через притоки. При этом увеличилась межгодовая вариабельность содержания фосфора в воде и его накопление в придонных слоях, что отражает важную роль донных отложений во внутренней биогенной нагрузке. Озера Кубенское и Воже продолжают зарастать и заиливаться, все чаще наблюдаются «цветение» воды и заморные ситуации при дефиците кислорода. Последнее характерно и для оз. Белого.

Следует также подчеркнуть нелинейный отклик трофических уровней при антропогенной сукцессии. Если по степени изменения фитопланктонного, зоопланктонного и бентосного сообществ озера ранжируются по убывающей: Кубенское > Воже > Белое, то перестройки в рыбном населении имеют иной характер. Наибольшие изменения произошли в оз. Воже, что связано с аддитивным эффектом последствий нерационального промысла и акклиматизации судака в 1987 г. При интродукции нового вида в экосистему перестройка сообщества происходит за счет изменения биотических отношений. В этом случае антропогенное воздействие является триггерным механизмом, запускающим каскад необратимых изменений в сообществе, что можно считать аутогенной сукцессией.

В Белом озере рыбная часть сообщества отличалась относительной стабильностью за счет пресса хищников при доминирующей роли судака вплоть до начала 2000-х годов. Однако в последнее десятилетие наблюдается превращение водоема из снетково-судачьего в лещовый, что связано с переловом судака и ухудшением условий обитания. Можно прогнозировать ускорение перестроек рыбной части сообщества, учитывая синергетический эффект увеличения доли фитофилов и представителей теплолюбивых рыб, в том числе за счет инвазий на фоне потепления климата при наличии магистральных водных путей.

К другой составляющей антропогенных сукцессий в мелководных озерных экосистемах следует отнести токсификацию как опасную тенденцию для качества воды и рыбной продукции. Этот процесс является

следствием промышленного развития во второй половине XX в. и в настоящее время оказывает мощное дополнительное негативное влияние на развитие водных экосистем.

Таким образом, многофакторность антропогенного воздействия, его аддитивный и синергетический эффект, пролонгированный и каскадный характер последствий определяют актуальность исследования антропогенных сукцессий. Особенно быстро изменяются мелководные озера, в которых специфичность антропогенной сукцессии определяется сочетанием процессов эвтрофирования и токсификации. Возникает эффект «бу-меранга», где человек является как причиной, так и объектом направленных на него нежелательных последствий антропогенных сукцессий.

### Литература

*Болотова Н. Л.* Изменения экосистем мелководных северных озер в антропогенных условиях (на примере водоемов Вологодской области): Автореф. дис. ... докт. биол. наук. СПб., 1999. 51 с.

*Болотова Н. Л.* Эвтрофирование крупных озер Вологодской области в условиях антропогенной трансформации их водосборов // Теоретические и прикладные аспекты современной лимнологии: Материалы V Междунар. науч. конф. Минск, 2009. С. 123–126.

*Болотова Н. Л.* Роль осадконакопления в эвтрофировании крупных озер приледникового происхождения на территории Вологодской области // Геология, геоэкология, эволюционная география: Тр. Междунар. семинара. Т. XV. СПб.: РГПУ им. А. И. Герцена, 2016. С. 326–331.

*Квасов Д. Д.* Позднечетвертичная история крупных озер и внутренних морей Восточной Европы. Л., 1975. 278 с.

*Субетто Д. А.* Донные отложения озер: Палеолимнологические реконструкции: Научная монография. СПб.: РПУ им. А. И. Герцена, 2009. 339 с.

## ANTHROPOGENIC SUCCESSIONS OF SHALLOW-WATER NORTHERN LAKE ECOSYSTEMS OF PERIGLACIAL GENESIS

**N. L. Bolotova**

*Vologda State University*

It is assumed that in the conditions of global pollution, the natural successions of aquatic ecosystems have already been transformed into anthropogenic, although to various degrees. The successions depend on the priority of natural and anthropogenic factors. Three shallow-water lakes of common glacial origin exposed to anthropogenic eutrophication and toxification were analyzed. Studies from the 1970s to the 2000s revealed different rates of eutrophication of the lakes and nonlinear response of their ecosystems to human impact. The influence of historical factors, natural conditions and human activities on the divergence of the development pathways of these lakes was determined.

# ПРОСТРАНСТВЕННАЯ НЕОДНОРОДНОСТЬ СТРУКТУРНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ФИТОПЛАНКТОНА В ПЕРИОД МАКСИМАЛЬНОГО ПРОГРЕВА ВОДЫ ЛАДОЖСКОГО ОЗЕРА В РАЙОНЕ ВАЛААМСКОГО АРХИПЕЛАГА

Е. Ю. Воякина

Санкт-Петербургский научно-исследовательский центр  
экологической безопасности РАН

В работе анализируются многолетние изменения структуры фитопланктона в районе Валаамского архипелага в период максимального прогрева воды. Для большинства станций побережья Валаамского архипелага был характерен широкий диапазон показателей обилия фитопланктона (численность варьировала от 0,08 до 56,1 млн кл/л, биомасса – от 0,1 до 29,5 мг/л). Максимальные средние значения численности и биомассы фитопланктона были отмечены для мелководных станций южного побережья, минимальные – на глубоких станциях западного побережья. В планктоне доминировали потенциально токсичные виды цианопрокариот (*Aphanizomenon flos-aquae*, виды рода *Dolichospermum*, *Microcystis* и *Planktotrix agardhii*). Максимальные средние значения биомассы фитопланктона были отмечены в 2001 г. (11,93 мг/л), минимальные – 0,97 мг/л.

Валаамский архипелаг расположен в северной ультрапрофундальной зоне Ладожского озера, наименее подверженной влиянию вод притоков. Архипелаг включает острова Валаам, Скитский, Предтеченский, Емельяновский и еще около 50 малых островов. Общая площадь архипелага – 36 км<sup>2</sup>. В соответствии с лимническим районированием Ладожского озера [Гусаков, Тержевик, 1992] район Валаамского архипелага входит в ультрапрофундальную зону, которая характеризуется максимальными глубинами (в среднем – 113 м) и представляет собой часть, наименее подверженную влиянию вод притоков.

Основные черты термического и гидрохимического режимов прибрежной зоны Валаамского архипелага сходны с процессами, идущими в глубоководной части Ладожского озера. В районе южного и западного берега прибрежная зона выражена крайне слабо, глубина у берега под отвесными скалами составляет 15–30 м. В северной и восточной части побережья прибрежная мелководная зона тянется на несколько километров. Под мелководной зоной подразумевается участок акватории с глубинами менее 15 м [Гусаков, Тержевик, 1992].

Прибрежная зона архипелага включает открытые участки, бухты и протоки между островами. Разнообразие биотопов и значительные перепады глубин – особенности исследуемой акватории. Кроме открытых участков, ладожское побережье островов включает более десяти крупных

бухт и заливов, различающихся по гидрологическим и гидрохимическим особенностям. Можно выделить два основных типа бухт. Первый – открытые, как правило, со значительными глубинами, такие как Большая Никоновская (30 м и более). Условия в них близки к существующим в открытой части побережья. Второй тип – сравнительно закрытые и более мелководные – Монастырская и Дивная бухты. В целом прибрежная зона Ладожского озера в районе Валаамского архипелага характеризуется благоприятным кислородным режимом, высокими значениями электропроводности по сравнению с малыми озерами Валаамского архипелага, максимальными значениями прозрачности. Для этой части системы характерны минимальные значения цветности (34–38° по Pt-Co шкале) и мутности (6–7 мг/л), низкое содержание железа – 0,02–0,04 мг/л [Воякина, 2007, 2009].

В исследуемый период участки акватории Валаамского архипелага характеризовались высокими концентрациями растворенного кислорода в поверхностном слое воды (95–125 %), содержание органического вещества было низким, среднемноголетнее значение было 12,0 мг О/л (9,3–24,4 мг О/л). Концентрация минерального фосфора варьировала от 0,001 до 0,014 мг/л. В период активной вегетации синезеленых водорослей значения прозрачности колебались на разных станциях от 1,8 до 3,2 м, pH – от 7,1 до 9,3. Для различных участков прибрежной зоны архипелага показано, что они не отличаются по основным гидрологическим и гидрохимическим показателям между собой [Воякина, 2009].

В то же время по температуре воды на поверхности и особенностям температурной стратификации годы исследования значительно различались. Средняя температура воды за период 2000–2015 гг. была 13,7 °С, при этом можно выделить годы более «холодные» и «теплые». Так, например, 2001 г. был относительно «холодный», здесь средняя для всех исследованных станций температура поверхности воды была 11,5 °С. 2010 г. был аномально жарким, средняя температура воды была 18,7 °С.

### **Материал и методы**

Пробы фитопланктона отбирали в период максимального прогрева воды в июле – августе 2000–2015 гг. в предельно сжатые сроки на 12–18 станциях. Параллельно проводили исследование основных лимнологических параметров. С 2011 г. проводятся исследования по содержанию в планктоне хлорофилла *a*. Интегральные пробы фитопланктона отбирали батометром через 0,5–1,0 м в зависимости от глубины станции, фиксировали раствором Люголя, концентрировали отстойным методом, просчитывали в камере Нажотта. Параллельно отбору проб проводили исследования основных лимнологических параметров. Определение гидрохими-

ческих параметров, в том числе биогенных элементов, проводили общепринятыми методами [Алекин и др., 1973; Руководство..., 1977].

## Результаты

В фитопланктоне исследованных участков был обнаружен 181 вид, разновидность и форма водорослей, принадлежащих к 9 отделам. По видовому богатству преобладали зеленые (29 % от общего числа), цианопрોકариоты (19 %) и диатомовые (18 %) водоросли. Участки побережья отличались высоким видовым сходством (значения коэффициента Сёрнсена – 0,7–0,8).

Для большинства станций прибрежья Валаамского архипелага был характерен широкий диапазон показателей обилия фитопланктона. Численность варьировала от 0,08 до 56,1 млн кл/л (среднее значение – 6,5 млн кл/л), биомасса изменялась от 0,1 до 29,5 мг/л (среднее значение – 6,2 мг/л). Максимальные средние значения численности и биомассы фитопланктона были отмечены на мелководных станциях южного побережья, минимальные – на глубоких станциях западного побережья.

По показателям обилия во все годы исследования на большинстве станций доминировали различные виды цианопрોકариот (от 50 до 90 % от общей биомассы). Наряду с ними в разные годы в состав доминант входили криптофитовые и хлорококковые водоросли.

Доминирование цианобактерий в период максимального прогрева воды типично для всей акватории Ладожского озера уже на протяжении довольно длительного периода [Петрова и др., 1992]. В последнее время в прибрежной зоне Валаамского архипелага к видам-доминантам относятся *Aphanizomenon flos-aquae* Ralfs ex Bornet & Flahault, виды рода *Dolichospermum* (Ralfs ex Bornet & Flahault) P. Wacklin, L. Hoffmann & J. Komárek, *Microcystis* Kütz. ex Lemm. и *Planktotrix agardii* (Gom.) Anagn. et Kom. Из криптофитовых активно вегетировали виды *Cryptomonas erosa* Ehr., *Chroomonas acuta* Ehr. и *Rhodomonas lacustris* Pasch. et Ruttin.

В разные годы структура фитопланктона в исследованной акватории варьировала значительно. По среднегодовым значениям биомассы фитопланктона выделяются годы 2003 – с минимальными значениями (среднее значение было 0,97 мг/л) и 2001 – с максимальными (11,93 мг/л) [Воякина, 2009].

В 2001 г. высокие показатели обилия фитопланктона были обусловлены активной вегетацией двух групп – цианопрોકариот и зеленых водорослей, причем наибольшее значение эти группы имели в закрытых хорошо прогреваемых бухтах. В 2003 г. был очень низкий уровень воды в Ладожском озере (364 см). Структура фитопланктона значительно варьировала по акватории. В планктоне в разных сочетаниях доминировали виды

динофитовых, диатомовых, криптофитовых и зеленых (хлорококковых) водорослей [Воякина, 2009].

В последние годы (2011–2015 гг.) уровень вегетации фитопланктона был невысоким (1,12–2,67 мг/л), хотя по численности все время доминировали цианопрокариоты.

При анализе среднемноголетних данных было показано, что наибольшее значение цианопрокариоты имели на южном побережье (70 %), наименьшее – на западном (40 %). Это вызвано, в основном, гидрологическими особенностями этих участков, так, именно на южном побережье находится закрытая мелководная Дивная бухта, а на западном – открытые глубоководные участки с минимальной вегетацией фитопланктона.

При анализе факторов среды, влияющих на пространственную неоднородность фитопланктона в разные годы в прибрежной зоне Ладожского озера в районе Валаамского архипелага, установлено, что наибольшее влияние оказывают уровень воды, прозрачность и температура воды.

В период 2011–2015 гг. получены данные по содержанию концентрации хлорофилла *a* во время максимального прогресса воды в прибрежной зоне Ладожского озера в районе Валаамского архипелага. В среднем за период исследования концентрация хлорофилла *a* в поверхностных водах была довольно высокая. Значения концентрации хлорофилла *a* по акватории сильно варьировали (от 0,01 до 18,12 мкг/л). Среднее за период исследования значение концентрации хлорофилла *a* было 4,5 мкг/л. Годы существенно отличались по пространственному распределению концентрации хлорофилла *a*. Так, например, в 2011 г. минимальное значение было отмечено для станции в Естественной протоке (северное побережье), максимальное – в Лещевом заливе (южное побережье). В 2012 г. ситуация была прямо противоположная: низкие значения – у о. Сухой (южное побережье); высокие – на станциях в Малой Никоновской бухте (западное побережье) и в Естественной протоке (северное побережье). В то же время в 2012 г. диапазон значений концентрации хлорофилла *a* был максимальным.

### **Заключение**

Таким образом, отмечается пространственная неоднородность распределения показателей обилия фитопланктона в разные годы. Выявлен широкий диапазон структурных показателей фитопланктона для участков прибрежной зоны Валаамского архипелага. Максимальные показатели обилия характерны для закрытых мелководных заливов, минимальные – для открытых глубоководных участков прибрежной зоны. При этом наряду со значительной пространственной вариабельностью существенную роль играла и межгодовая изменчивость показателей обилия фитопланктона.

Минимальные показатели обилия были в 2003 г., максимальные – в 2001 г. По биомассе фитопланктона преобладали цианопрокариоты и хлорококковые водоросли. Показано, что межгодовые различия в структуре планктона, прежде всего, связаны с особенностями температурной стратификации и характеристиками ветрового режима. В годы со штилевыми условиями различия между станциями были наиболее существенны. По структуре фитопланктона и концентрации хлорофилла *a* в период максимального прогрева воды данная акватория относится к мезотрофным водоемам.

### Литература

Алекин О. А., Семенов А. Д., Скопинцев Б. А. Руководство по химическому анализу вод суши. Л.: Гидрометеоиздат, 1973. 210 с.

Воякина Е. Ю. Фитопланктон Валаамского архипелага и прилегающей акватории Ладожского озера: Дис. ... канд. биол. наук. СПб., 2007. 245 с.

Воякина Е. Ю. Межгодовая динамика структурных показателей фитопланктона различных участков прибрежной зоны Ладожского озера в районе Валаамского архипелага // Рыбохозяйственное исследование больших озер Северо-Запада европейской части России: Сб. науч. тр. ФГНУ «ГосНИОРХ». Вып. 334. СПб., 2009. С. 62–74.

Гусаков Б. Л., Тержевик А. Ю. Лимническое районирование и особенности озерных процессов в лимнических зонах // Ладожское озеро – критерии состояния экосистемы. СПб., 1992. С. 21–27.

Петрова Н. А., Антонов С. Е., Протопопова Е. В. Структурные и функциональные характеристики фитопланктона // Петрова Н. А., Тержевик А. Ю. (ред.). Ладожское озеро: критерии состояния экосистемы. Л.: Наука, 1992. 326 с.

Руководство по химическому анализу вод суши. Л., 1973. 269 с.

## SPATIAL HETEROGENEITY OF THE STRUCTURAL CHARACTERISTICS OF PHYTOPLANKTON OF LAKE LADOGA AROUND THE VALAAM ARCHIPELAGO IN THE PEAK WARM-UP PERIOD

**E. Yu. Voyakina**

*Saint-Petersburg Scientific Research Center of Ecological Safety, RAS*

The paper reports the long-term changes in the phytoplankton structure in the Valaam archipelago during the peak warm-up period. Most of the coastal stations of the Valaam archipelago were characterized by a wide range of abundance and biomass of phytoplankton (abundance varied from 0.08 to 56.1 million cells/liter, biomass – from 0.1 to 29.5 mg/l). The maximum mean values of phytoplankton abundance and biomass were noted for shallow-water stations on the southern coast, the minimum for deep-water stations on the west coast. Potentially toxic species of cyanoprokaryotes (*Aphanizomenon flos-aquae*, species of the genus *Dolichospermum*, *Microcystis* and *Planktotrix agardii*) dominated the plankton. The maximum average values of phytoplankton biomass were noted in 2001 (11.93 mg/l), the minimum – 0.97 mg/l.

## ЛИЗОСОМАЛЬНЫЕ ФЕРМЕНТЫ В ТКАНЯХ ОКУНЯ *PERCA FLUVIATILIS* L. ИЗ АКВАТОРИЙ ОНЕЖСКОГО ОЗЕРА С РАЗНОЙ АНТРОПОГЕННОЙ НАГРУЗКОЙ

Р. У. Высоцкая, Е. А. Буэй, Н. В. Ильмаст

*Институт биологии КарНЦ РАН*

Проведено сравнительное изучение активности ферментов в органах окуня *Perca fluviatilis* L. из разных по степени антропогенного воздействия заливов Онежского озера. Показано, что у рыб из Петрозаводской губы, загрязняемой отходами промышленных предприятий и городскими сточными водами, отмечено адаптивное угнетение активности  $\beta$ -глюкозидазы в печени и значительное повышение активности кислых ДНКазы и РНКазы в печени и жабрах по сравнению с соответствующими показателями у обитателей сравнительно чистых вод Повенецкого залива (район Кузаранды) озера. Выявлена достоверная межгодовая изменчивость лизосомальных ферментов в органах рыб. Полученные результаты позволяют предположить, что основными загрязняющими компонентами являются вещества органической природы.

По мере роста населения на нашей планете, развития промышленности, энергетики и сельского хозяйства все более актуальной становится проблема нехватки чистой пресной воды. По прогнозам исследователей, через 20–30 лет большая часть населения земного шара вплотную столкнется с недостатком питьевой воды. Решение проблемы тесно связано с охраной и рациональным использованием имеющихся на планете запасов этого бесценного ресурса, даже в таких благополучных районах, как северо-запад России, имеющий разветвленную озерно-речную сеть, включая крупнейшие в Европе водоемы – Ладожское и Онежское озера. По данным ИВПС РАН, в последние десятилетия в результате негативного антропогенного и техногенного воздействия некоторые заливы Онежского озера переходят из олиготрофного состояния в мезотрофное, а ряд наиболее загрязняемых участков приобретают статус эвтрофных [Биоресурсы..., 2008].

Для оценки качества воды и состояния водных экосистем наряду с гидрхимическими, биологическими и другими методами все более широкое применение находят генетические и физиолого-биохимические методы [Немова, Высоцкая, 2004]. В приспособительных реакциях к неблагоприятным воздействиям среды важная роль принадлежит особым внутриклеточным органеллам – лизосомам [Köhler et al., 2002; Высоцкая, Немова, 2008; Gadekar, Baile, 2015]. Целью настоящей работы было изучение влияния антропогенного загрязнения на активность лизосомальных ферментов в органах массовых видов рыб Онежского озера.

## Материал и методы исследования

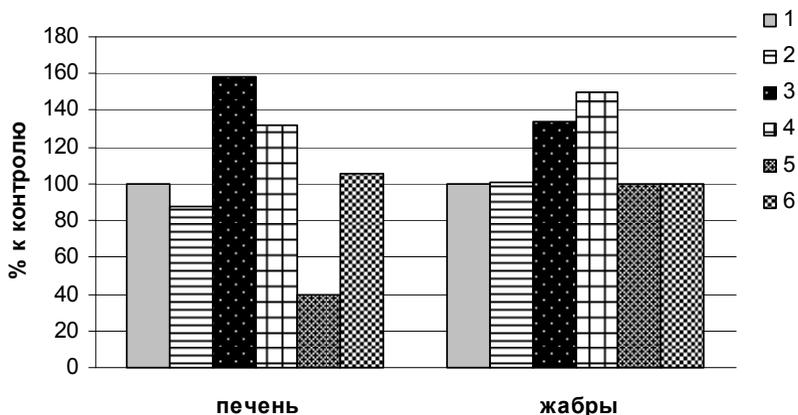
Исследование выполнено на научном оборудовании центра коллективного пользования ИБ КарНЦ РАН.

Объектами исследования были самки повсеместно распространенного в Онежском озере вида – окуня *Perca fluviatilis* [Стерлигова и др., 2015], отловленные в Петрозаводской губе и в Повенецком заливе (район дер. Кузаранда), отличающихся по степени антропогенного загрязнения. Петрозаводская губа характеризуется высокой проточностью и наиболее значительным уровнем антропогенной нагрузки. К настоящему времени природный олиготрофный статус залива изменился на мезотрофный под мощным влиянием таких факторов, как сток с водосбора реки Шуи, сточных вод петрозаводских предприятий и городских ливневых вод [Состояние..., 2007]. В Повенецком заливе сохраняется высокое качество вод практически по всей акватории, за исключением прибрежных участков у крупных населенных пунктов – Медвежьегорска и Пиндуш. Повенецкий залив и его губы отличаются более высокой минерализацией (45 мг/л) и невысокими концентрациями органических веществ, что позволяет относить его воды к олигогумусным.

Для исследований были взяты окуни возраста от 3 до 6 лет, 2–3-й стадии зрелости гонад. Из печени и жабр рыб готовили 10%-е гомогенаты на 0,25 М растворе сахарозы, содержащем ЭДТА и неионный детергент тритон X-100. Гомогенаты осветляли центрифугированием при 12 000 g на центрифуге с охлаждением. В надосадочной жидкости определяли активность ферментов (кислой фосфатазы, ДНКазы, РНКазы,  $\beta$ -глюкозидазы,  $\beta$ -галактозидазы) и содержание белка по методам, приведенным в наших работах [Высоцкая, Немова, 2008]. Расчет активности ферментов производили на 1 г сырой массы ткани и на 1 мг белка. Результаты обрабатывали общепринятыми методами статистики, оценивая достоверность различий по критерию U Вилкоксона-Манна-Уитни при  $p \leq 0,05$ .

## Результаты и их обсуждение

Проведенные исследования выявили существенные различия в уровне активности лизосомальных гидролаз в органах рыб из загрязненного хозяйственными стоками и чистого заливов Онежского озера (рисунок). В печени окуня из Петрозаводской губы отмечена значительно более высокая активность нуклеаз и низкая активность  $\beta$ -глюкозидазы.



**Сравнение активности лизосомальных ферментов в органах окуnea из Петрозаводской губы с соответствующими показателями рыб из более чистого Поенецкого залива (контроль) Онежского озера:**

1 – уровень активности ферментов в контроле; 2 – кислая фосфатаза; 3 – ДНКаза; 4 – РНКаза; 5 – β-глюкозидаза; 6 – β-галактозидаза

Как известно, печень является полифункциональным органом, в котором осуществляется биотрансформация различных ксенобиотиков, происходит биосинтез всевозможных белков и ферментов, участвующих в детоксикации чужеродных веществ и эндогенных метаболитов, защитных и приспособительных реакциях организма. В жабрах – органе, который первым сталкивается с химическими изменениями в водной среде, также выявлено значительное повышение активности обеих нуклеаз у окуней из Петрозаводской губы. Высокий уровень активности нуклеаз свидетельствует об активных биосинтетических процессах в организме рыб из этой части Онежского озера. Вновь синтезированные белки и другие компоненты позволяют им осуществлять перестройки метаболизма и адаптироваться к жизни в условиях загрязнения среды различными поллютантами. Среди последних преобладающими, на наш взгляд, являются вещества органической природы. Такое предположение позволяют сделать полученные нами ранее данные. Было показано, что при высоких концентрациях в сточных водах промышленных предприятий неорганических компонентов, в частности тяжелых металлов, активность нуклеаз, как правило угнетается, а β-глюкозидазы, напротив, возрастает [Высоцкая, Немова, 2008].

В данном исследовании выявлена значительная межгодовая изменчивость активности лизосомальных ферментов у рыб в чистом районе озера (табл.).

**Межгодовая изменчивость биохимических показателей (расчет на 1 г сырой массы ткани) в органах окуны *Perca fluviatilis* из Повенецкого залива ( $M \pm m$ )**

Показатель, единицы измерения	Печень		Жабры	
	2012 г.	2013 г.	2012 г.	2013 г.
Кислая фосфатаза, мкг Р/мин	1,61 ± 0,09	1,91 ± 0,018*	1,79 ± 0,14	2,42 ± 0,034*
ДНККаза, $\Delta D_{260}/\text{мин}$	0,118 ± 0,012	0,177 ± 0,18	0,124 ± 0,007	0,134 ± 0,010
РНКаза, $\Delta D_{260}/\text{мин}$	0,264 ± 0,047	0,692 ± 0,013*	0,197 ± 0,007	0,154 ± 0,027
В-глюкозидаза, мкМ пара-нитрофено- ла/мин	0,013 ± 0,000	0,015 ± 0,002	0,004 ± 0,001	0,005 ± 0,001
В-галактозидаза, мкМ пара-нитрофе- нола/мин	0,047 ± 0,003	0,067 ± 0,004*	0,020 ± 0,002	0,106 ± 0,013*
Белок, мг	79,2 ± 2,96	99,8 ± 4,33*	49,2 ± 4,60	56,7 ± 3,18

*Примечание.* \* – различия достоверны при  $p \leq 0,05$ .

В 2013 г. у окуней из Повенецкого залива отмечено достоверное повышение активности кислой фосфатазы,  $\beta$ -галактозидазы в жабрах и печени и особенно значительное – РНКазы в печени. Можно предположить, что здесь имело место спорадическое антропогенное загрязнение воды веществами органической природы, например, нефтепродуктами.

Таким образом, выявленная в исследованиях высокая чувствительность ферментного комплекса лизосом к загрязнениям воды различными поллютантами позволяет рекомендовать определение активности лизосомальных ферментов в органах рыб и других водных животных в качестве одного из показателей в системе экологического мониторинга состояния водных объектов, при оценке состояния гидробионтов и нормировании антропогенной нагрузки на водоемы.

Финансовое обеспечение работ осуществлялось из средств федерального бюджета на выполнение государственного задания по теме № 0221-2014-0033 и Программы Президиума РАН № 21 «Биоразнообразие природных систем...» (проект № 0221-2015-0003).

### Литература

*Биоресурсы* Онежского озера / Отв. ред. В. И. Кухарев, А. А. Лукин. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2008. 272 с.

Высоцкая Р. У., Немова Н. Н. Лизосомы и лизосомальные ферменты рыб. М.: Наука, 2008. 284 с.

Немова Н. Н., Высоцкая Р. У. Биохимическая индикация состояния рыб. М.: Наука, 2004. 216 с.

Состояние водных объектов Республики Карелия. По результатам мониторинга 1998–2006 гг. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2007. 210 с.

Стерлигова О. П., Ильмаст Н. В., Савосин Д. С. Круглоротые и рыбы пресных вод Карелии. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2016. 224 с.

Gadekar G. P., Baile V. V. Localization of acid phosphatase in the different tissues of developmental stages of Indian major carp, *Labeo rohita* (Hamilton) // Glob. J. Sci. Front. Res. 2015. Vol. 15, N 3. P. 9–13.

Köhler A., Wahl E., Söffker K. Functional and morphological changes of lysosomes as prognostic biomarkers of toxic liver injury in a marine flatfish // Environmental Toxicology and Chemistry. 2002. Vol. 21, N 11. P. 2434–2444.

**LYSOSOMAL ENZYMES IN THE TISSUES OF PERCH  
*PERCA FLUVIATILIS* L. INHABITING AREAS OF LAKE ONEGO  
WITH DIFFERENT ANTHROPOGENIC LOADS**

**R. U. Vysotskaya, E. A. Buoy, N. V. Ilmast**

*Institute of Biology, KarRC RAS*

A comparative study of the enzymatic activity in the tissues of perch *Perca fluviatilis* L. from Lake Onego bays differing in the degree of human pressure was carried out. It has been shown that the activity of  $\beta$ -glucosidase is adaptively suppressed in the liver and the activity of acid RNase and DNase significantly increases in the liver and gills of the perch inhabiting Petrozavodsk Bay polluted by industrial and municipal wastewaters as compared to the corresponding indices of the organisms inhabiting the relatively clean Povenetsky Bay (Kuzaranda area) of the lake. A reliable interannual variability of lysosomal enzymes in fish tissues was revealed. The results obtained suggest that the main polluting components in the lake are substances of organic nature.

**МНОГОЛЕТНЕЕ ИЗУЧЕНИЕ МИКРОВОДОРОСЛЕЙ РЕКИ  
ГАВАРАГЕТ (ВОДОСБОРНЫЙ БАССЕЙН ОЗЕРА СЕВАН)**

**Л. Р. Гамбарян<sup>1,2</sup>, Ж. Г. Мкртчян<sup>1</sup>, А. С. Мамян<sup>1</sup>, Т. Г. Хачикян<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>*Научный центр зоологии и гидроэкологии НАН РА Институт  
гидроэкологии и ихтиологии*

<sup>2</sup>*Ереванский государственный университет*

Фитопланктон и фитобентос используются для биомониторинга экологического состояния и прогнозирования качества воды в водных экосистемах. Из более чем 30 водотоков, впадающих в оз. Севан (1900 м НУБМ), одной из крупных является река Гаварагет (площадь водосбора 480 км<sup>2</sup>, длина 50 км), принадлежит водосборному бассейну Малого Севана. Река берет начало в Гегамских хребтах на высоте 3050 м, среднегодовой расход воды – 3,82 м<sup>3</sup>/с, сток – 120,6 млн м<sup>3</sup>. Зимой покрывается льдом, питание подземными водами (83 %), период половодья наступает в апреле – июне. Воды реки используются для орошения [Природа Армении, 2006]. Фитопланктон реки Гаварагет и других основных притоков оз. Севан

до 1990 г. был изучен слабо [Оганесян, 1994]. Впервые фитопланктон р. Гаваргет был изучен в 1990–1991 гг., в данный период по качественным и количественным показателям превалировала группа диатомовых водорослей [Худоян, 1994].

### Материал и методы

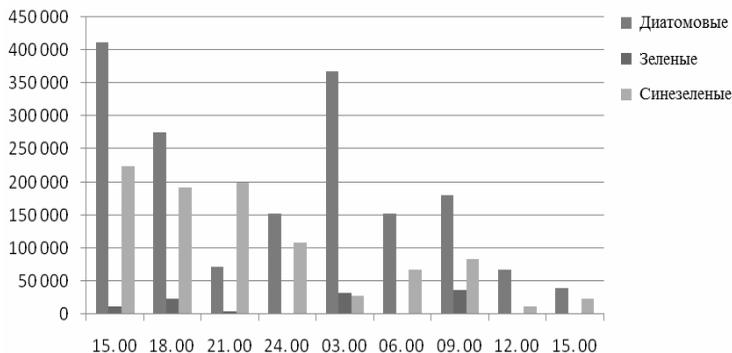
Детальный характер изучения фитопланктона основных притоков оз. Севан относится к периоду 2008–2011 гг. [Хачикян, 2013], пробы отбирались из устьевой части рек; в 2012–2015 гг. пробы отбирались в основном в летние сезоны из трех мониторинговых пунктов (верхнее, среднее течение и устьевая часть). Исследования финансировались Министерством экологии РА в рамках программы 14/10 «Учет биоресурсов рыбы и рака в озере Севан и в его водосборном бассейне». Для изучения суточной динамики фитопланктона были отобраны пробы в сентябре 2009 г. Пробы фитобентоса были отобраны осенью 2015 г. из среднего течения и устьевой части реки. Сбор, консервирование и обработка водорослей проводились по стандартной методике [Абакумов, 1983; Садчиков, 2003]. Видовая принадлежность водорослей идентифицировалась с помощью определителей [Киселев и др., 1953; Прошкина-Лавренко, Макарова, 1986; Царенко, 1990; Streble, Krauter, 2002; Linne von Berg et al., 2012; Гамбарян, Шахазизян, 2014].

### Результаты и обсуждение

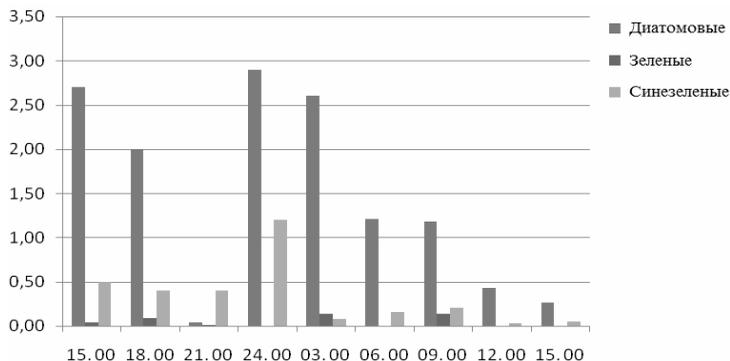
Многолетнее изучение фитопланктона в период 2008–2011 гг. выявило постепенное увеличение видового разнообразия в фитопланктоне от 26 (2008 г.) до 54 (2011 г.) видов. В качественном аспекте превалировали диатомовые водоросли, по количественным показателям преобладали диатомовые и синезеленые. Бедный видовой состав и низкие количественные показатели были отмечены у зеленых водорослей. Общие показатели численности и биомассы за исследованный период колебались в пределах 43 000–456 000 кл/л и 0,05–2,4 г/м<sup>3</sup>, соответственно. В 2009 г. (сентябрь) был проведен также суточный пробоотбор фитопланктона из устьевой части реки с целью выявить основные закономерности развития численности и биомассы фитопланктона, что может дополнить сезонную динамику фитопланктона. Известно, что в колебаниях количественных характеристик фитопланктона наблюдается суточная периодичность: период нарастания численности, приуроченный в основном к светлоте суток, сменяется периодом убывания, приуроченным к темноте суток.

Максимальное количество водорослей (648 000 кл/л и 3,2 г/м<sup>3</sup> по численности и биомассе, соответственно) в суточной динамике было зарегистрировано в дневное время (около 15.00 часов), доминировали диатомовые водоросли (412 000 кл/л; 2,7 г/м<sup>3</sup>), субдоминантами явля-

лись синезеленые водоросли (224 000 кл/л; 0,5 г/м<sup>3</sup>) (рис. 1–2). Снижение количественных показателей диатомовых водорослей наблюдается после 18 часов, однако показатели увеличиваются после полуночи, достигая следующего пика к 3 часам ночи.



**Рис. 1. Суточная динамика численности (ккл/л) фитопланктона р. Гаварагет (сентябрь, 2009 г.)**



**Рис. 2. Суточная динамика биомассы (г/м<sup>3</sup>) фитопланктона р. Гаварагет (сентябрь, 2009 г.)**

В группе синезеленых следующей максимум количественного развития наблюдается к 21 часу (количественного развития достиг вид *Spirulina abbreviata*, что привело к доминированию), а после полуночи показатели начинают уменьшаться, минимальные показатели (12 000 кл/л и 0,03 г/м<sup>3</sup>) наблюдаются к 12 часам следующего дня. Фоновыми видами в группе диатомовых были *Cocconeis placentula*, *Melosira italica*, *Navicula* sp.,

у синезеленых это виды *Aphanothece clathrata* и *Microcystis aeruginosa*. В суточном ритме массовыми были около 16 видов планктонных водорослей, из которых 11 – диатомовых, 3 – синезеленых и 2 вида зеленых водорослей. Наибольшее видовое разнообразие наблюдалось в группе диатомовых водорослей. Наименьшие количественные и качественные показатели наблюдались у группы зеленых водорослей, в отличие от других групп не обнаруженные в отдельные ночные часы. Их численность и биомасса варьировали в пределах 4000–36 000 кл/л и 0,01–0,1 г/м<sup>3</sup>. В количественном отношении особо выделились виды *Scenedesmus quadricauda* и *Ankistrodesmus falcatus*. Таким образом, исследование суточной динамики фитопланктона имеет тенденцию повторения основных черт месячной и сезонной динамики.

Данные за сентябрь 2009 г. выявили, что доминирующей группой в фитопланктоне были диатомовые водоросли (244 000 кл/л и 1,499 г/м<sup>3</sup>), субдоминантами сообщества выступили по численности синезеленые (128 000 кл/л), а по биомассе – зеленые водоросли (0,5 г/м<sup>3</sup>). Низкие показатели численности (48 000 кл/л) наблюдались у зеленых водорослей, однако по биомассе и количеству видов они превосходили группу синезеленых (виды родов *Navicula*, *Fragilaria* и *Stephanodiscus*). Особого развития достигла нитчатая диатомея *Melosira varians* (64 000 кл/л; 0,3 г/м<sup>3</sup>). Доминантным видом группы синезеленых являлся колониальный вид *Aphanothece clathrata* (104 000 кл/л; 0,24 г/м<sup>3</sup>), отмечены также *Microcystis aeruginosa* и *Aphanizomenon flos-aquae*. Доминантным видом в группе зеленых водорослей являлся *Coelastrum microporum* (48 000 кл/л и 0,2 г/м<sup>3</sup>). Отмечены также *Ankistrodesmus falcatus*, *Scenedesmus quadricauda*, *Botryococcus braunii* и редко встречающийся вид *Ulothrix subtilissima*. Таким образом, суточная динамика фитопланктона имеет тенденцию повторения основных черт месячной и сезонной динамики. Однако необходимо более детальное изучение суточной динамики фитопланктона.

Динамика развития фитопланктона в летние месяцы 2012–2015 гг. представлена в табл. В целом в исследуемый период наблюдалось доминирование диатомовых водорослей.

Осенью 2015 г. параллельно отбирались пробы фитопланктона и фитобентоса из среднего и нижнего течения р. Гаварагет. Следует отметить, что фитобентос реки изучается впервые. Основу сообщества фитобентоса составили группы диатомовых, зеленых, синезеленых, желтозеленых и эвгленовых водорослей. В среднем течении в составе фитопланктона было обнаружено около 31 вида водорослей, из которых 20 – диатомовых, 5 – синезеленых, 4 – зеленых, 1 эвгленовый и 1 динофитовый вид. Доминантными были диатомовые виды *Nitzschia acicularis* и *Fragilaria*

*crotonensis*. В среднем течении грунт был песочно-каменистым. В составе фитобентоса зарегистрированы 30 видов водорослей, из которых 22 вида диатомовых, 4 – синезеленых, 3 – зеленых и 1 вид эвгленовых. По своим количественным показателям доминировали диатомовые водоросли, субдоминантной группой являлись синезеленые водоросли. Наиболее высокими показателями в группе диатомовых отличались виды *Fragilaria capucina*, *Nitzschia subtilis*, *N. acicularis*, *Navicula hungarica*. Из синезеленых водорослей высокие количественные показатели имели виды *Microcystis aeruginosa* и *Spirulina* sp. Зеленые водоросли имели сравнительно низкие количественные показатели, основными видами являлись *Scenedesmus acutus*, *Sc. quadricuada*, *Chlamydomonas reinhardi*, а в группе эвгленовых был выявлен всего один вид – *Trachelomonas volvocina*.

**Число видов (s), общая численность (N, тыс. кл./л), биомасса (B, г/м<sup>3</sup>) и доля (%) таксономических групп водорослей в общей численности и биомассе фитопланктона р. Гаварагет летом 2012–2015 гг.**

Показатель	2012			2013			2014			2015		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
<b>s</b>	12	22	16	21	18	–	11	17	13	–	31	23
Bacillariophyta	9	18	13	10	16	–	10	14	11	–	18	19
Chlorophyta	1	1	2	1	–	–	–	1	–	–	2	1
Cyanophyta	2	3	1	–	2	–	1	2	2	–	6	2
Euglenophyta	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Xanthophyta	–	1	–	–	–	–	–	–	–	–	–	1
<b>N (%)</b>	196	422	216	888	368	–	138	456	176	–	986	154
Bacillariophyta	172 (88)	308 (73)	172 (80)	880 (99)	288 (78)	–	116 (84)	396 (87)	124 (70)	–	156 (16)	132 (85,7)
Chlorophyta	4 (2)	110 (26)	4 (2)	8 (1)	–	–	20 (14)	40 (9)	52 (30)	–	6 (0,5)	8 (5,2)
Cyanophyta	20 (10)	4 (1)	40 (18)	–	80 (22)	–	2 (2)	20 (4)	–	–	824 (83,5)	6 (4)
Euglenophyta	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Xanthophyta	–	4 (1)	–	–	–	–	–	–	–	–	–	8 (5,1)
<b>B (%)</b>	2,25	2,32	1,3	6,75	1,6	–	1,83	2,4	0,8	–	3,55	0,78
Bacillariophyta	2,18 (97)	1,45 (62)	1,2 (92)	6,39 (95)	1,42 (89)	–	1,82 (99)	2,2 (92)	0,7 (88)	–	0,65 (18,3)	0,05 (6,4)
Chlorophyta	0,02 (1)	0,02 (1)	0,003 (0,2)	0,36 (5)	–	–	0,006 (0,05)	0,14 (6)	–	–	0,4 (11,2)	0,7 (89,7)
Cyanophyta	0,05 (2)	0,5 (22)	0,1 (7,6)	–	0,18 (11)	–	0,006 (0,05)	0,06 (2)	0,1 (12)	–	2,5 (70)	0,02 (2,56)
Euglenophyta	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Xanthophyta	–	0,35 (15)	–	–	–	–	–	–	–	–	–	0,01 (0,78)

Сравнительный анализ видов в фитопланктоне и фитобентосе р. Гаварагет в среднем течении выявил сравнительно высокое сходство видового состава (59 %). В нижнем течении реки в фитопланктоне было зарегистрировано 34 вида водорослей: 28 – диатомовых, 4 – синезеленых, 1 зеленый и 1 эвгленовый. В устьевой части наблюдался рост количественных показателей фитопланктона, что обусловлено увеличением численности синезеленых водорослей. Доминировали по численности синезеленые (54 %), а по биомассе – диатомовые (72 %). Доминантным синезеленым видом был *Phormidium tenue*, а виды из рода *Fragilaria* преобладали в группе диатомовых. В устьевой части реки грунт был в основном илистым. По сравнению с показателями среднего течения р. Гаварагет наблюдалось увеличение разнообразия в составе фитобентоса. Было выявлено 39 видов водорослей, из которых 33 – диатомовых, 5 – синезеленых и 1 – зеленых.

В целом по своим количественным и качественным показателям преобладали диатомовые водоросли, однако по показателям численности доминантным был синезеленый вид *Phormidium tenue* (16%). Диатомовые виды *Fragilaria construens*, *Achnanthes taeniata.*, *Cocconeis placentula*, *Rhoicosphenia curvata* имели высокие количественные показатели. В группе синезеленых высокого количественного развития достиг вид *Spirulina* sp. Вид *Chlorella vulgaris* был отмечен в группе зеленых водорослей. Общность водорослевого состава фитопланктона и фитобентоса в нижнем течении реки составила 54 %.

### Выводы

Таким образом, видовое разнообразие альгофлоры р. Гаварагет составляют диатомовые, зеленые и синезеленые водоросли, что характерно для многих рек Армении [Степанян, 2009; Мамян, 2013; Хачикян, 2013]. В р. Гаварагет диатомовые водоросли являются флористически наиболее разнообразной и количественно преобладающей группой. Основными по своей значимости в альгофлоре реки являются пеннатные диатомеи из родов *Navicula*, *Fragilaria*, *Nitzschia*.

Видовое богатство зеленых водорослей формируется из хлорококковых. В группе синезеленых фоновыми видами являлись *Microcystis aeruginosa* и *Aphanothece clathrata*. Сравнительный анализ видового состава фитопланктона и фитобентоса выявил большую степень сходства (54–59 %) за счет показателей диатомовых водорослей. Это может свидетельствовать об активном взаимовлиянии сообществ микроводорослей планктона и бентоса.

Многолетний анализ, а также исследования суточной и сезонной активности водорослей помогут оценить изменения, происходящие в

экосистемах рек. Необходимо дальнейшее детальное изучение фито-бентоса р. Гаварагет.

Работа проведена в рамках программы «Учет ресурсов рыбы и рака в озере Севан и его водосборном бассейне», 2016 г.

### Литература

*Абакумов В. А.* Руководство по методам гидробиологического анализа поверхностных вод и донных отложений. Л.: Гидрометеиздат, 1983. С. 78–86.

*Природа Армении.* Армянская энциклопедия. Ереван, 2006. 691 с.

*Гамбарян Л. Р., Шахазизян И. В.* Краткий определитель родов пресноводных водорослей: Учебно-методическое пособие. Ереван: ЕГУ, 2014. 61 с.

*Киселев И. А., Зинова А. Д., Курсанов Л. И.* Определитель низших растений. Т. 2. Водоросли. М.: Сов. наука, 1953. 312 с.

*Мамян А.* Влияние антропогенного фактора на фитопланктонное сообщество рек Памбак и Тандзут: Автореф. дис. ... канд. биол. наук. Ереван, 2013. 22 с.

*Оганесян Р. О.* Озеро Севан вчера, сегодня... Ереван: Гитутюн, 1994. 478 с.

*Прошкина-Лавренко А. И., Макарова И. В.* Водоросли планктона Каспийского моря. Л.: Наука, 1986. 205 с.

*Садчиков А. П.* Методы изучения пресноводного фитопланктона. М.: Университет и школа, 2003. 157 с.

*Степанян Л. Г.* Гидробиологическое и гидрохимическое изучение разданской гидроэкосистемы в пределах города Еревана: Автореф. дис. ... канд. биол. наук. 2009. 22 с.

*Хачикян Т.* Современная характеристика фитопланктона водосборного бассейна озера Севан, Ереван: Автореф. дис. ... канд. биол. наук. Ереван, 2013.

*Худоян А. А.* Фитопланктон основных притоков озера Севан: Автореф. дис. ... канд. биол. наук. Ереван, 1994.

*Царенко П. М.* Краткий определитель хлорококковых водорослей Украинской ССР. Киев: Наукова думка, 1990. 206 с.

*Linne von Berg K.-H., Hoef-Emden K., Melkonian M.* Der Kosmos-Algenführer, Die wichtigsten Süßwasseralgen im Mikroskop. Kosmos, 2012. 368 s.

*Streble H., Krauter D.* Das Leben im Wassertrofen. Prague, 2002.

### LONG-TERM STUDY OF MICROALGAE OF THE GAVARAGET RIVER (LAKE SEVAN CATCHMENT)

**L. R. Gambar'an<sup>1,2</sup>, Zh. G. Mkrtchan<sup>1</sup>, A. S. Mam'an<sup>1</sup>, T. G. Hachik'an<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>*Scientific Center of Zoology and Hydroecology,  
National Academy of Science of the Republic of Armenia*

<sup>2</sup>*Yerevan State University*

Long-term data from the study of qualitative and quantitative parameters of phytoplankton in the Gavaraget River are summarized. The analysis of daily variations in the development of the main groups of planktonic algae has been carried out, which

in general repeats the seasonal and annual patterns of phytoplankton community development. For the first time a study of phytobenthos was carried out, which has revealed that there is a great degree of similarity in the species composition compared with phytoplankton community (54–59%). In the composition of both phytoplankton and phytobenthos, diatom algae were the dominant group, both quantitatively and qualitatively. A long-term analysis, as well as studies of daily and seasonal dynamics of algae will help assess the changes taking place in river ecosystems. The study of the phytobenthos of the Gavraget River is of high relevance and requires detailed research.

## **ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МИКРОСПЕКТРОСКОПИИ ДЛЯ МОНИТОРИНГА ЦИАНОБАКТЕРИАЛЬНОГО «ЦВЕТЕНИЯ» ОТКРЫТЫХ ВОДОЕМОВ**

**Н. Ю. Григорьева<sup>1</sup>, Л. В. Чистякова<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>*Институт озераведения РАН*

<sup>2</sup>*Санкт-Петербургский государственный университет*

Цианобактериальное «цветение», являющееся одним из показателей эвтрофирования водоемов, официально признано глобальной проблемой современной экологии. Несмотря на актуальность данной проблемы, методики исследования и мониторинга состояния цианобактериальных сообществ недостаточно отработаны. В данной работе рассматривается возможность использования инновационных методов микроспектроскопии для экологического мониторинга открытых водоемов. В частности, предлагается несколько методик исследования спектра собственной флуоресценции цианобактерий *in vivo* с целью контроля жизнеспособности природных цианобактериальных культур, предварительного оперативного таксономического анализа натуральных проб, а также для оценки степени эвтрофикации водоемов с помощью микроспектроскопических исследований.

В последние годы вопросы цианобактериального «цветения» эвтрофных водоемов приобретают все большее значение как одна из важнейших экологических проблем, пристальное внимание к которой обусловлено, в частности, сильной токсичностью некоторых видов цианобактерий для животных и человека [Whitton, 2012; Румянцев и др., 2015]. Мониторинг экологического состояния водных ресурсов предполагает, среди прочего, и активное исследование цианобактериальных сообществ, поскольку увеличение концентрации растворенных в воде нитратов, фосфатов, силикатов и пр. создает оптимальные условия для быстрого, лавинообразного роста численности цианобактерий.

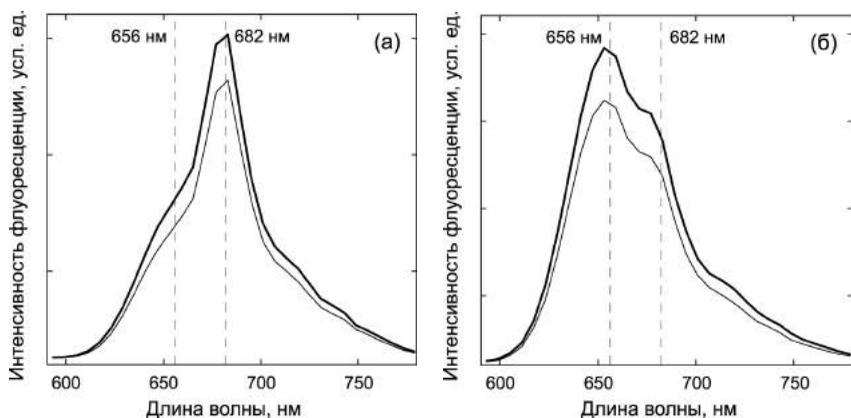
Являясь фотосинтезирующими организмами, цианобактерии обладают уникальным пигментным составом светособирающего комплекса,

спектральные свойства которого могут быть использованы для неинвазивного мониторинга физиологического состояния отдельных клеток и культур в целом. В данной работе представлены два возможных варианта использования микроспектроскопии в лимнологических исследованиях – это мониторинг экологического стресса и контроль биологического разнообразия цианобактерий в конкретном водоеме.

Цианобактерии в силу своей чувствительности к изменениям внешних условий могут являться хорошим индикаторным организмом при исследовании экологического состояния открытых водоемов. Изучая изменения в физиологическом состоянии цианобактериальных клеток, можно, с одной стороны, предсказывать начало периодов «цветения», а с другой – проводить мониторинг состояния водоема при применении различных воздействий, направленных на предотвращение этого «цветения».

Основываясь на работах С. В. Горюновой в 1953–1956 гг. (см. ссылки в [Методы..., 1975]) и новейших исследованиях флуоресценции хлорофилла растений как показателя экологического стресса [Лысенко и др., 2013], авторы данной статьи разработали методику определения жизнеспособности цианобактерий на основе анализа спектров собственной флуоресценции отдельных клеток и культуры в целом. Данная методика основана на строгой зависимости спектра собственной флуоресценции клеток цианобактерий от состояния их фотосинтетической системы и общего физиологического состояния.

Основу исследования составляют спектры собственной флуоресценции клеток цианобактерий, снятые при возбуждении различными лазерными линиями [Григорьева и др., 2017]. Спектры флуоресценции клеток цианобактерий снимаются в стандартном режиме ламбда-сканирования, реализованном в большинстве типов современных конфокальных лазерных сканирующих микроскопов (КЛСМ) (Leica, Zeiss) [Pawley, 1995]. Из-за чувствительности фотосинтетического аппарата к любым изменениям физиологического состояния клеток амплитуда и форма спектров будут меняться в зависимости от состояния клетки. Имея базовые спектры клеток в различных физиологических состояниях, можно определять степень повреждения исследуемой культуры. Универсальность данной методики позволяет использовать ее для исследования любых видов цианобактерий независимо от среды их обитания или культивирования. Кроме того, использование новейших методов микроспектроскопии предполагает определение жизнеспособности колоний в натуральных пробах даже для некультивируемых видов цианобактерий, что значительно облегчает работу с малыми концентрациями исследуемых объектов.

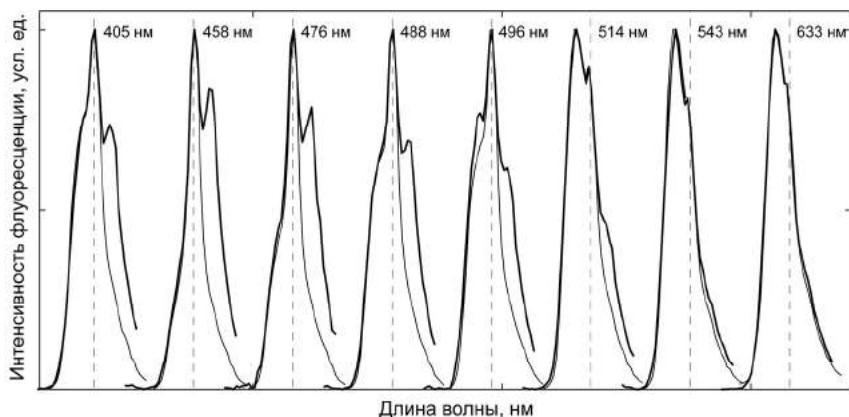


**Рис. 1. Спектры собственной флуоресценции клеток цианобактерий *Microcystis firma* CALU 398, полученные при возбуждении двумя лазерными линиями (а) – 488 нм; (б) – 543 нм:**

жирные линии – спектры клеток, подвергавшихся слабому ультразвуковому воздействию, тонкие линии – спектры клеток из контрольной части. Для получения каждого спектра проводилось усреднение по 35 клеткам

Разработанная авторами данной статьи методика определения жизнеспособности цианобактерий *in vivo* после слабых внешних воздействий, основанная на анализе спектров собственной флуоресценции отдельных клеток, была успешно применена при исследовании влияния слабого ультразвукового воздействия на физиологическое состояние цианобактериальной культуры *Microcystis firma* CALU 398 [Румянцев и др., 2017]. На рис. 1 представлены результаты измерения спектров собственной флуоресценции на КЛСМ Leica TCS-SP5 для контрольной и облученной ультразвуком группы клеток. Для облучения применялся ультразвук частотой 60 кГц, мощностью 5,85 мВт/мл (в экспериментальном объеме). Продолжительность облучения составляла 50 часов. Подробное описание ультразвуковой установки дано в работе [Румянцев, 2017]. Наблюдающееся изменение в соотношении интенсивности пиков флуоресценции хлорофилла *a* (682 нм) и фикоцианина (656 нм) является следствием нарушения отдельных связей внутри цепочки усвоения световой энергии (антенный комплекс – реакционный центр). Увеличение интенсивности флуоресценции в области длин волн вблизи пика флуоресценции фикоцианина служит показателем ухудшения физиологического состояния клеток цианобактерий.

Мы предположили, что спектры собственной флуоресценции могут быть использованы для определения систематической принадлежности цианобактерий в натуральных пробах. Для определения критериев и параметров сравнения были исследованы спектры собственной флуоресценции 20 штаммов цианобактерий, принадлежащих к разным родам, и 2 вида микроводорослей из коллекции CALU Ресурсного центра «Культивирование микроорганизмов». Для снятия спектров флуоресценции были использованы восемь лазерных линий КЛСМ Leica TCS-SP5: 405 нм (диодный лазер), 458, 476, 488, 496, 514 нм (аргоновый лазер), 543, 633 нм (гелий-неоновый лазер). Для примера на рис. 2 приведены два набора спектров собственной флуоресценции сильно отличающихся родов нитчатых цианобактерий *Leptolyngbya* и *Geitlerinema*.



**Рис. 2. Нормированные спектры собственной флуоресценции клеток цианобактерий, полученные при возбуждении 8 лазерными линиями:**

жирные линии – штамм *Leptolyngbya* sp. CALU 1715, тонкие линии – штамм *Geitlerinema* sp. CALU 1315. Для получения каждого спектра проводилось усреднение по 5 клеткам. Каждая пара спектров сдвинута по горизонтальной оси на 200 нм относительно соседней для удобства сравнения. Цифры над кривыми указывают длину волны возбуждающего света. Пунктирные линии отмечают положение максимума флуоресценции хлорофилл-белковых комплексов (682 нм)

Следует отметить, что предыдущие попытки проведения таксономического анализа различных видов микроводорослей [Johnsen et al., 1994] основывались на изучении только спектров поглощения. Однако спектры поглощения несут значительно меньше информации, чем спектры флуоресценции, и получить спектры поглощения можно только при значительном количестве клеток данного вида, выделенных из натурной про-

бы. С помощью конфокального микроскопа спектры флуоресценции могут быть получены даже с одной клетки в пробе, и идентификация цианобактерии может быть проведена по одному набору спектров (конечно, в этом случае с меньшей доверительной вероятностью). В рамках предлагаемой нами методики для повышения точности таксономического анализа при определении видовой принадлежности культивируемых штаммов цианобактерий дополнительно в анализ могут быть включены спектры поглощения и спектры флуоресценции культуры в целом, а также другие спектроскопические исследования (например, спектры метанольных экстрактов, или результаты хроматографического анализа).

В качестве статистической обработки экспериментальных материалов на начальном этапе исследования был использован дискриминантный анализ и так называемый «метод перочинного ножа» (Jackknife method). Планируется ввести анализ на основе нейронных сетей для возможности идентификации близких родов и отдельных штаммов цианобактерий.

Все исследования проведены с использованием оборудования РЦ «Развитие молекулярных и клеточных технологий» Научного парка СПбГУ и ЦКП «Хромас». Образцы штаммов цианобактерий предоставлены Ресурсным центром «Культивирование микроорганизмов» Научного парка СПбГУ.

### Литература

Григорьева Н. Ю., Румянцев В. А., Чистякова Л. В. Спектроскопические методы определения жизнеспособности синезеленых водорослей после слабых внешних воздействий // *Океанология*. 2017. Т. 5 (в печати).

Лысенко В. С. и др. Флуоресценция хлорофилла растений как показатель экологического стресса: теоретические основы применения метода // *Фундаментальные исследования*. 2013. № 4. С. 112–120.

*Методы физиолого-биохимического исследования водорослей в гидробиологической практике*. Киев: Наук. думка, 1975. 247 с.

Румянцев В. А. и др. Проблема «цветения» сине-зеленых водорослей и пути ее решения // *Перспективные направления развития науки в Петербурге* / Отв. ред. Ж. И. Алферов и др. СПб.: Изд-во ИП Пермяков С.А., 2015. С. 277–294.

Румянцев В. А. и др. Многопрофильные натурные и лабораторные эксперименты по оценке работоспособности и экологической безопасности ультразвука при регуляции цветения цианобактерий // *Учен. зап. ПГМУ*. 2017. № 46. С. 118–133.

Johnsen G. et al. In-vivo absorption characteristics in 10 classes of bloom-forming phytoplankton-taxonomic characteristics and responses to photoadaptation by means of discriminant and HPLC analysis // *Marine Ecology Progress Series*. 1994. Vol. 105, N 1–2. P. 149–157.

Pawley J. B. *Handbook of Biological Confocal Microscopy*. New York, London: Plenum Press, 1995.

Whitton B. A. (ed.). *Ecology of cyanobacteria II: their diversity in space and time*. Springer Science & Business Media, 2012. P. 741.

## PROSPECTS OF USING MICROSCOPIC SPECTROSCOPY FOR MONITORING CYANOBACTERIAL BLOOMS IN SURFACE WATER BODIES

N. Yu. Grigoryeva<sup>1</sup>, L. V. Chistyakova<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*Institute of Limnology RAS*

<sup>2</sup>*Saint-Petersburg State University*

Cyanobacterial blooms, being one of the indicators of water body eutrophication, have been officially recognized as a global ecological problem. In spite of the significance of this problem the principles of investigation and monitoring of cyanobacterial communities are not sufficiently worked out. In this work we examine the possibility of applying novel methods of spectral microscopy for ecological monitoring in surface water bodies. In particular, several techniques for *in vivo* analysis of intrinsic cyanobacterial fluorescence spectra have been suggested to enable estimation of the viability of natural cyanobacterial cultures, preliminary *in situ* taxonomic analysis of samples, as well as assessment of the degree of eutrophication of water bodies.

## К ОЦЕНКЕ ДИНАМИКИ СОСТОЯНИЯ РЫБНОГО НАСЕЛЕНИЯ МАЛЫХ ОЗЕР КАРЕЛИИ МЕТОДАМИ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ СТАТИСТИКИ

И. М. Дзюбук, Е. А. Клюкина

*Петрозаводский государственный университет*

В статье представлены результаты обобщенного анализа многолетней динамики рыбного населения Кончезерской группы озер (Мунозеро, Пертозеро, Кончезеро, Укшезеро) за многолетний период (1920–2010-е гг.) с помощью методов математической статистики. Для каждого из четырех озер установлены встречаемые хотя бы в одном из представленных в исследовании временных промежутков между 1920-ми и 2010-ми гг. виды рыб. Дана оценка многолетней динамики состояния фаунистических комплексов. С помощью критерия однородности Пирсона для уровня значимости  $\alpha = 0,05$  каждый вид был проверен на однородность по признаку его встречаемости в каждом озере за многолетний период.

### Введение

С середины прошлого века для водоемов Карелии, как и в целом для озер России, в результате интенсивной антропогенной деятельности отмечено ускорение трансформации всех компонентов водных экосистем, включая и рыбное население. Происходило появление в водоемах новых видов рыб и исчезновение из водоемов ранее многочисленных видов [Решетников, 2007; Стерлигова, Ильмаст, 2009; Дзюбук, Клюкина, 2016].

Несмотря на то что проводились интенсивные рыбоводные работы на водоемах, которые часто давали хорошие результаты (по расселению и интродукции), в настоящее время во многих водоемах Карелии доминантными видами остаются окунь, ерш, плотва и уклейка [Виды-вселенцы, 2010]. Причины такой ситуации на водоемах в большей мере антропогенные, не исключая естественные.

Изучение Кончезерских озер, имеющее почти столетнюю историю, позволяет оценить динамику состояний рыбного населения, фаунистических комплексов рыб за многолетний период. Применение современных методов математической статистики дает возможность получить новые оценки о процессах, происходящих в рыбных сообществах.

Изучение многолетней динамики состояния рыбного населения водных экосистем представляет не только научный интерес, но и имеет практическое значение, в частности, для определения возможностей и перспектив развития промысла, рыборазведения и рыбоводства.

В связи с этим целью работы было оценить встречаемость рыб в малых озерах Карелии (Кончезерских озерах), проверить их на однородность встречаемости с помощью методов математической статистики и проследить изменения состояния фаунистических комплексов рыб за многолетний период (1920–2010-е гг.).

### **Материалы и методы**

Объектами исследований были озера Мунозеро, Пертозеро, Кончезеро и Укшезеро, которые относятся к бассейну реки Шуи, притоку Онежского озера (рис. 1).

Видовой состав рыб озер оценивали за многолетний период (1920–2010-е гг.) на основе литературных материалов [Чернов, 1927, 1935; Мельянцева, 1956; Озера Карелии, 1959; Куккаринна, Рябухин, 1985], собственных уловов (1999–2010 гг.), уловов и опросных данных рыбаководителей.

Для оценки видового состава рыбного населения озер выделили 5 категорий: 0 – не встречался в уловах, 1 – единичные поимки, 2 – встречался, как возможный результат саморасселения, 3 – встречался, как результат рыбоводных работ, 4 – встречался в уловах. С целью выявления сходства каждого выявленного в исследовании вида рыб по категоризованному признаку встречаемости в каждом из четырех Кончезерских озер в период с 1920-х по 2010-е гг. был применен критерий однородности  $\chi^2$  (Пирсона) с вероятностью ошибки 5 % [Рогов и др., 2005]. Статистическую обработку данных, построение таблиц и рисунков проводили с использованием стандартного программного пакета Excel.



Рис. 1. Кончезерские озера:

1 – Мунозеро, 2 – Пертозеро, 3 – Кончезеро, 4 – Укшезеро

### Результаты и их обсуждение

В результате ранее проведенных исследований было выявлено, что видовой состав рыбного населения Кончезерских озер в отдельные промежутки времени между 1920-ми и 2010-ми гг. претерпевал значительные изменения главным образом в результате антропогенного вмешательства, но наблюдалось и естественное расселение видов. Иерархический кластерный анализ на основе показателя присутствия ви-

дов рыб в каждом из озер показал, что временные промежутки, в течение которых видовой состав рыб в озерах был сходным, можно объединить в два периода (1930–1980-е и 2000–2010-е гг.). Наиболее близкими по видовому составу рыбного населения как в первом, так и во втором временном периоде были Пертозеро и Кончезеро, ближе к ним оказалось Укшезеро, по сравнению с оз. Мунозеро, что обусловлено, главным образом, географическим расположением этих водоемов в системе. В период с 1930-х по 1980-е гг. в озерах происходило интенсивное увеличение количества видов. В этот временной промежуток естественные процессы расселения видов рыб дополнились успешными результатами работ по вселению видов (особенно в Мунозеро и Пертозеро), интенсивность которых после 1980-х гг. уменьшилась, при сохранении уровня естественного расселения рыб [Дзюбук, Клюкина, 2016].

При продолжении исследований была выявлена динамика состояния фаунистических комплексов рыб, типичных для Кончезерских озер (рис. 2). Так, для оз. Мунозеро характерны четыре фаунистических комплекса. Установлено увеличение доли рыб арктического пресноводного и пресноводного понтического комплексов. Это был результат рыборазводных работ в прошлом веке (сиг, паляя и лещ, соответственно) и возможного естественного расселения (корюшка и четырехрогий бычок, рогатка, соответственно), хотя к настоящему времени уже не отмечают присутствие таких представителей арктического пресноводного комплекса, как сиг, усатый голец, и бореально-предгорного комплекса – ручьевой форели. Причины также могли быть антропогенного характера – интенсивный вылов ценных промысловых видов и изменение состояния водной среды.

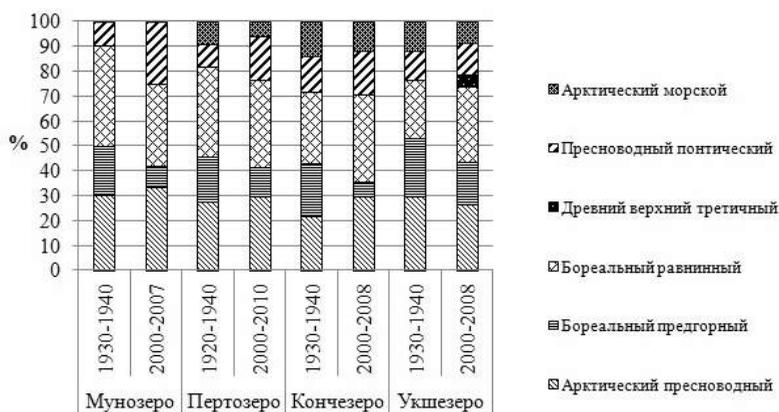


Рис. 2. Многолетняя динамика соотношения фаунистических комплексов рыб Кончезерских озер

В оз. Пертозеро произошли изменения в соотношении всех пяти представленных фаунистических комплексов рыб. В прошлом веке большое значение имели рыбоводно-акклиматизационные работы (ряпушка, лосось). Также в 1950–1980-х гг. впервые отмечены в уловах представители бореального равнинного комплекса (елец и щиповка), пресноводного понтического (красноперка), арктического пресноводного (корюшка) и арктического морского (трехиглая колюшка), как возможный результат естественного расселения. К настоящему времени в целом произошло увеличение доли арктического пресноводного (вселение ряпушки), пресноводного понтического (появление красноперки) комплексов и уменьшение бореального предгорного (не вылавливается лосось), арктического морского (не отмечено девятииглой колюшки).

За многолетний период в оз. Кончезеро произошло уменьшение количества видов бореального предгорного комплекса (не встречаются хариус, форель ручьевая) и увеличение количества видов арктического пресноводного (результат вселения ряпушки в оз. Пертозеро, появилась корюшка), бореального равнинного (появились елец, щиповка) и пресноводного понтического (появилась красноперка, вселили леща) комплексов.

Для оз. Укшезеро отмечено увеличение числа фаунистических комплексов с 5 до 6. В 1990-е гг. в уловах появился представитель древнего верхнего третичного комплекса – судак, до этого не встречавшийся в составе рыбного населения. Также в озере, возможно естественным путем, появились представители бореального равнинного (язь и елец) и арктического пресноводного (пелядь) комплексов.

В ходе исследований была проведена проверка сходства каждого выявленного в исследовании вида рыб по категоризованному признаку встречаемости (всего 5 категорий) в каждом из четырех Кончезерских озер в период 1920–2010-х гг. с помощью критерия однородности Пирсона с доверительной вероятностью 95 %. Если какая-то категория не встречалась ни в одной выборке (озере), то она исключалась из расчетов.

Так, почти для всех видов арктического пресноводного фаунистического комплекса гипотеза об однородности по признаку встречаемости в каждом из четырех исследуемых озер за многолетний период принимается на уровне значимости 5 %. Исключение составили папия, сиг и ряпушка, для которых вычисленные выборочные значения статистики критерия  $\chi^2$  (22; 22,31; 22,38 соответственно) больше критического значения 12,59.

Для видов бореального предгорного фаунистического комплекса, обитающих в Кончезерских озерах, кроме лосося озерного ( $\chi^2_{\text{выборочное}} = 27,11 > 16,92 = \chi^2_{0,95}(9)$ ) и хариуса ( $\chi^2_{\text{выборочное}} = 22 > 7,81 = \chi^2_{0,95}(3)$ ),

гипотеза об однородности по признаку встречаемости в каждом из этих озер принимается на уровне значимости  $\alpha=0,05$ .

Аналогичные результаты получены для видов бореального равнинного комплекса, кроме плотвы ( $\chi^2_{\text{выборочное}} = 11,71 > 7,81 = \chi^2_{0,95}(3)$ ), щиповки ( $\chi^2_{\text{выборочное}} = 11,38 > 7,81 = \chi^2_{0,95}(3)$ ) и язя ( $\chi^2_{\text{выборочное}} = 16,62 > 7,81 = \chi^2_{0,95}(3)$ ), и для видов пресноводного понтического комплекса, кроме леща ( $\chi^2_{\text{выборочное}} = 31,07 > 16,92 = \chi^2_{0,95}(9)$ ), красноперки ( $\chi^2_{\text{выборочное}} = 32,97 > 7,81 = \chi^2_{0,95}(3)$ ), гипотеза об однородности по признаку встречаемости в каждом из четырех озер принимается с доверительной вероятностью, равной 0,95.

Отметим, что трехиглая и девятииглая колюшка, входящие в арктический морской фаунистический комплекс, неоднородны, т. е. несхожи по признаку встречаемости в указанных озерах для уровня значимости  $\alpha = 5\%$ , так как их выборочные значения статистики критерия  $\chi^2$  (соответственно 29,86 и 25,9) больше критического значения 16,92.

Судак, входящий в пресноводный амфибореальный (древний верхний третичный) комплекс, встречался только в одном из четырех исследуемых малых озер, это означает неоднородность по признаку встречаемости данного вида в озерах.

Таким образом, проверка на встречаемость видов рыб, относящихся к различным фаунистическим комплексам, в Кончезерских озерах за многолетний период (1920–2010-е гг.) с помощью математических методов показала, что в каждом фаунистическом комплексе есть виды, которые проявляют сходство по признаку встречаемости в каждом озере, т. е. стабильные и виды, не сходные по этому признаку.

### Заключение

В результате анализа многолетней (1920–2010-е гг.) динамики состояния фаунистических комплексов рыб Кончезерских озер (Мунозеро, Пертозеро, Кончезеро, Укшезеро) выявлено стойкое уменьшение доли рыб бореального предгорного комплекса (лосось, форель). Однако произошло увеличение числа фаунистических комплексов в Укшезере. В целом стабильную основу рыбного населения этой группы озер продолжают составлять арктический пресноводный и бореальный равнинный комплексы.

С помощью методов математической статистики для каждого из четырех озер установлены встречаемые хотя бы в одном из представленных в исследовании временных промежутков виды рыб. С помощью критерия однородности Пирсона для уровня значимости  $\alpha = 0,05$  каждый вид был проверен на однородность по признаку его встречаемости в каждом озере за многолетний период. Проявляют неоднородность по признаку встречаемости виды фаунистических комплексов: арктического пресноводного –

паляя, сиг и ряпушка; бореального предгорного – лосось и хариус; бореального равнинного – плотва, щиповка и язь; пресноводного понтического – лещ и красноперка.

### Литература

*Виды-вселенцы* // Мониторинг и сохранение биоразнообразия таежных экосистем Европейского Севера России. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2010. С. 85–91.

*Дзюбук И. М., Клюкина Е. А.* Оценка многолетней динамики видового состава рыбного населения малых озер Карелии с помощью методов математической статистики // Учен. зап. ПетрГУ, Биол. науки. 2016. № 2 (155). С. 63–69.

*Куккарина О. И., Рябухин В. П.* Ихтиофауна и питание рыб // Отчет о НИР: Оценка биологической продуктивности карельских озер Кончезерской группы. Петрозаводск, 1985. 80 с.

*Мельянцеv В. Г.* Возможности рыбохозяйственного использования Кончезерской группы озер // Вопросы ихтиологии внутренних водоемов. Петрозаводск, 1956. Вып. 5. С. 96–102.

*Озера Карелии*: Справочник. Петрозаводск: Госиздат Карельской АССР, 1959. 425 с.

*Решетников Ю. С.* Разнообразие рыб России // Исследования по ихтиологии и смежным дисциплинам на внутренних водоемах в начале XXI века (к 80-летию проф. Л. А. Кудерского). СПб.; М.: Товарищество научных изданий КМК, 2007. С. 180–190.

*Рогов А. А., Воронин А. В., Коржов С. Т.* Проверка статистических гипотез: Учебно-методическое пособие. Петрозаводск: ПетрГУ, 2005. 38 с.

*Стерлигова О. П., Ильмаст Н. В.* Виды-вселенцы в водных экосистемах Карелии // Вопросы ихтиологии. 2009. Т. 49, № 3. С. 372–379.

*Чернов В. К.* Данные по ихтиофауне озер, расположенных в районе Бородинской биостанции // Тр. Бородинской биостанции. Ленинград, 1927. Т. V. С. 211–218.

*Чернов В. К.* К биологии рыб озер Кончезерской группы в Карелии // Тр. Бородинской биостанции. Ленинград, 1935. Вып. I, ч. VIII. С. 3–16.

### ASSESSMENT OF CHANGES IN THE FISH POPULATION OF SMALL LAKES OF KARELIA BY METHODS OF MATHEMATICAL STATISTICS

**M. Dzyubuk, E. A. Klyukina**

*Petrozavodsk State University*

The article presents the results of a generalized analysis of the long-term dynamics of the fish population of small lakes of the Konchzero group (Munozero, Pertozero, Konchzero, Ukshezzero) over a long time period (1920–2010) using mathematical statistics. For each of the four lakes, fish species found in at least one of the time intervals between 1920 and 2010 were determined. Long-term changes of the state of the faunal complexes were assessed. Each species was tested for homogeneity on the basis of its occurrence in each lake over a long-term period using Pearson test of homogeneity at  $\alpha = 0.05$  significance level.

# ПРОБЛЕМЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЗООПЛАНКТОНА КАК ИНДИКАТОРА НЕФТЯНОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ ПРЕСНОВОДНЫХ ЭКОСИСТЕМ НА ПРИМЕРЕ ОЗЕРА САМОТЛОР (ХМАО)

Н. И. Ермолаева

*Институт водных и экологических проблем СО РАН*

Показано, что может отмечаться как угнетающее, так и стимулирующее влияние присутствия нефтяных углеводородов в воде на развитие отдельных видов зоопланктона. Численность и биомасса зоопланктонного сообщества, как и количественные показатели отдельных групп, не могут являться показателями, характеризующими качество воды. Загрязненность различных участков озера нефтепродуктами отражает соотношение отдельных видов внутри групп. На наиболее загрязненных участках преобладают веслоногие рачки, снижается видовое разнообразие коловраток и фитофильных форм ветвистоусых. При оценке состояния озер после нефтяного загрязнения необходимо пользоваться комбинаторными индексами биологической индикации, по возможности охватывая все звенья экосистемы.

В центральной части Западно-Сибирской равнины в пределах Нижневартовского района Ханты-Мансийского автономного округа Тюменской области расположено Самотлорское нефтегазовое месторождение, которое является одним из крупнейших в мире. Его площадь составляет более 2400 км<sup>2</sup>. По запасам нефти (более 3 млрд т) Самотлорское месторождение входит в десятку нефтяных гигантов мира. Озеро Самотлор – самое крупное в Самотлорской группе. До начала освоения месторождения оно имело площадь 63 км<sup>2</sup>, глубину – 1,5–3,0 м. Для осуществления нефтедобычи был осуществлен вариант с отсыпанием искусственных островов для буровых вышек. В 1968 г. из озера была спущена вода по сбросному каналу в р. Люк-Колен Еган, в результате чего произошло нарушение естественного гидрологического режима. В настоящее время оно представляет неглубокий водоем (1,0–1,5 м), с сетью автодорог, вдоль которых проложены трубопроводы. Суммарная площадь зеркала воды 46,07 км<sup>2</sup>. На территории оз. Самотлор наблюдаются регулярные аварийные утечки нефтяных углеводородов [Московченко, 2003; Московченко, Убайдулаев, 2014]. Происходит и загрязнение поверхностных вод хлоридами из рассолов, закачиваемых в выработанные пласты для поддержания пластового давления. Загрязнение водоемов нефтью и нефтепродуктами в зонах интенсивной добычи приводит к их деградации и оказывает влияние на все группы пресноводных организмов. Мониторинговые исследования зоопланктона могут помочь при биоиндикации нефтяного загрязнения рек и озер Самотлорского месторождения и оценить буферность экосистемы и ее способность к самоочищению.

С 08.09.2007 по 25.09.2007 проводилось комплексное обследование оз. Самотлор с целью оценки современного состояния экосистемы озера и потенциала его биологического самоочищения в условиях активной нефтедобычи, в том числе исследовался зоопланктон. В наши задачи входило изучение видового состава, количественных характеристик зоопланктона и оценка качества воды на различных участках методами биоиндикации. Озеро разделено дамбами на 14 несообщающихся участков различной величины (рис.). По дамбам проходят асфальтированные и грунтовые автомобильные дороги, по акватории и берегам озера проложены трубопроводы, являющиеся потенциальными источниками загрязнения. На оз. Самотлор было выбрано 72 пункта отбора проб, расположенных равномерно по акватории водоема, с учетом охвата как мелководных прибрежных, так и относительно глубоких центральных участков (рис.). Пробы зоопланктона отбирали путем процеживания 100 л воды через сеть Апштейна с размером ячеи 30 мкм. Камеральную обработку проводили по стандартной методике [Руководство..., 1983]. При расчете показателей сапробности использовались индексы, рассчитанные автором для водоемов Западной Сибири [Ermolaeva, Dvurechenskaya, 2013].

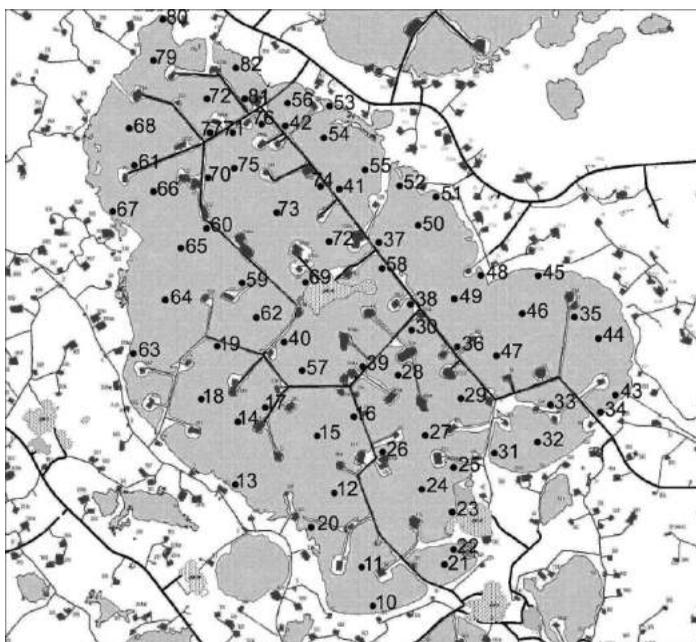


Схема отбора проб на озере Самотлор, сентябрь 2007 г.

Средняя глубина озера в период наблюдений составила 0,8 м, максимальная – 1,9 м, минимальная – 0,2 м. Температура воды находилась в пределах 5,2–13,6 °С. Концентрация кислорода составляла 8,64–12,16 мг/дм<sup>3</sup>. По степени гумификации озеро относится к олигогумозным дистрофированным водоемам. Воды озера относятся к  $\alpha$ -гипогалинным, хлоридно-натриевым водам со слабокислой средой (рН < 6,5) и средней минерализацией 304–315 мг/дм<sup>3</sup>. Нефтепродукты являются главными органическими токсикантами. В среднем по содержанию нефтепродуктов наблюдается превышение ПДК в 4 раза, а фона – в 2 раза. По общим показателям содержания органического вещества, качество вод озера относится к разрядам 3б «слабо загрязненная» – 4б «сильно загрязненная», по уровню содержания биогенных веществ – к 3а «достаточно чистая» – 4б «сильно загрязненная».

Участок № 1 (точки с 10 по 20). Максимальная численность зоопланктона составляла 231,7 тыс. экз./м<sup>3</sup> при биомассе 28,8 г/м<sup>3</sup>. Доминировали *Eudiaptomus graciloides* Lill.; *Daphnia pulex* (De Geer); *Daphnia arctica* Werestschagin, *Epiphanes brachyonus* Ehrenb. Индекс сапробности Пантле и Букк на разных точках колебался от 1,58 до 1,79.

Участок № 2 (точки 21–22). Численность составила 26 тыс. экз./м<sup>3</sup>, биомасса – 1,08 г/м<sup>3</sup>. Доминировали веслоногие ракообразные *Mesocyclops leuckarti* Claus, *Mesocyclops oithonoides* Sars, *Bosmina obtusirostris* Sars, *Alonella nana* (Baird). Индекс сапробности Пантле и Букк составил 1,71.

Участок № 3 (точки 23–30). Максимальная численность зоопланктона на участке составила 59,9 тыс. экз./м<sup>3</sup> (за счет массового развития коловраток), а биомасса – 4,8 г/м<sup>3</sup> (за счет крупных кладоцер *Daphnia arctica* и *Daphnia pulex*). В состав сообщества входили *Sida crystallina* (Müller), *Iliocryptos sordidus* (Lievin), *Macrotrix laticornis* Dad. и другие фитофильные формы. Индекс сапробности Пантле и Букк колебался в пределах 1,59–1,89.

Участок № 4 (точки 31–33). Численность зоопланктона составила 26,2 тыс. экз./м<sup>3</sup>, биомасса – 1,5 г/м<sup>3</sup>. Отмечено очень высокое видовое разнообразие всех трех групп. Помимо эврибионтных форм активно развивались Diaptomidae и фитофильные Cladocera. Индекс сапробности Пантле и Букк составил 1,67.

Участок № 5 (точки 34–35, 43–44). Численность достигала 49,2 тыс. экз./м<sup>3</sup>, биомасса – 23,8 г/м<sup>3</sup>. Доминировали по численности и биомассе ветвистоусые рачки *Daphnia arctica*, *Daphnia pulex*, *Alonella nana*, *Chydorus sphaericus*. Отмечено значительное развитие фитофильного комплекса: *Pleuroxus striatus* Schoedler, *Rynchotalona rostrata* (Koch), *Acroperus harpae* (Baird). Индекс сапробности Пантле и Букк составил 1,63–1,74.

Участок № 6 (точки 36–37, 45–52). Численность составила 117,7 тыс. экз./м<sup>3</sup>, биомасса – 56,3 г/м<sup>3</sup>. Отмечено очень высокое видовое разнообразие ветвистоусых (12 видов) и коловраток (10 видов). Доминировали *Daphnia pulex*, *Daphnia arctica*, *Monospilus dispar* Sars, *Graptoleberis testudinaria* (Fischer). Индекс сапробности Пантле и Букк составил 1,54–1,78.

Участок № 7 (точки 38, 40, 57–58). Численность 154,2 тыс. экз./м<sup>3</sup>, биомасса – 1,4 г/м<sup>3</sup>, за счет массового развития *Filinia longiseta* (Ehrenb.) и *Asplanchna herricki* Guerne. Отмечено очень высокое видовое разнообразие ветвистоусых (11 видов) и коловраток (14 видов). Доминировали *Bosmina longirostris* (Müller), *Alona affinis* Leydig, *Monospilus dispar* Sars. Индекс сапробности Пантле и Букк составил 1,51–1,60.

Участок № 8 (точки 69–75). Максимальная численность зоопланктона составила 40,8 тыс. экз./м<sup>3</sup> при биомассе 2,3 г/м<sup>3</sup>. Доминировали эврибионты *Daphnia pulex*, *Bosmina obtusirostris* Sars, *Chydorus sphaericus*. Значительной численности достиг *Monospilus dispar* (2,4 тыс. экз./м<sup>3</sup>). Индекс сапробности Пантле и Букк 1,62–1,77.

Участок № 9 (точки 59–60, 62–67). Численность достигала 78,1 тыс. экз./м<sup>3</sup>, биомасса 16,7 г/м<sup>3</sup>. Доминировали *Bosmina obtusirostris*, *Daphnia pulex*, *Daphnia arctica*, *Sida crystallina*, *Acroperus harpae*, *Mesocyclops oithonoides*. Видовое разнообразие коловраток невелико (3 вида). Индекс сапробности Пантле и Букк 1,66–1,78.

Участок № 10 (точки 61, 68). Численность зоопланктона 62,7 тыс. экз./м<sup>3</sup>, биомасса 6,6 г/м<sup>3</sup>. Доминировали *Daphnia pulex*, *Daphnia arctica*, *Bosmina obtusirostris*. Индекс сапробности Пантле и Букк составил 1,71.

Участок № 11 (точки 42, 56). Численность зоопланктона достигала 48,5 тыс. экз./м<sup>3</sup> при биомассе 776,04 мг/м<sup>3</sup>. Доминировали по численности и биомассе ветвистоусые раки, в основном эврибионты *Chydorus ovalis* Kurz, *Alonella nana*, *Chydorus sphaericus*. Значительное развитие получили фитофильные формы: *Sida crystallina* (Müller), *Peracantha truncata* (Müller), *Acroperus harpae* (Baird). Индекс сапробности Пантле и Букк составил 1,63–1,68.

Участок № 12 (точки 72, 77, 78, 80). Численность зоопланктона достигала 39,5 тыс. экз./м<sup>3</sup> при биомассе 1,7 г/м<sup>3</sup>. Отмечено высокое видовое разнообразие Cladocera. Доминировали *Alonella nana*, *Bosmina obtusirostris*, *Ceriodaphnia quadrangula* (Müller), *Pleuroxus striatus*, *Acroperus harpae*, *Eudiaptomus graciloides* и *Mesocyclops oithonoides*. Только на этом участке отмечен *Ophryoxus gracilis* Sars – обитатель зарослей северных озер. Индекс сапробности Пантле и Букк составил 1,70–1,77.

Участок № 13 (точки 81–82). Численность достигала 62,0 тыс. экз./м<sup>3</sup>, биомасса 3,5 г/м<sup>3</sup>. Отмечено массовое развитие *Daphnia pulex* и *Bosmina obtusirostris*. Фитофильных Cladocera в пробах не найдено. Видовой состав коловраток тоже характеризовался исключительно эвритопными формами. Индекс сапробности Пантле и Букк составил 1,61.

Участок № 14 (точки 41, 53–55). Численность составила 59,5 тыс. экз./м<sup>3</sup>, биомасса 3,1 г/м<sup>3</sup> за счет массового развития *Daphnia pulex* и *Epiphanes brashyonus* Ehrenb. Высокая численность наблюдалась у *Diaphanosoma brachyurum* (Lievin) (1,6 тыс. экз./м<sup>3</sup>) и *Ceriodaphnia affinis* Lill. (2,4 тыс. экз./м<sup>3</sup>). Среди Copepoda доминировал *Mesocyclops oithonoides*. Индекс сапробности Пантле и Букк составил 1,66.

Видовой состав зоопланктона озера Самотлор типичен для мелких озер Западной Сибири с развитой высшей водной растительностью. Все исследованные участки по характеристикам зоопланктона являются β-мезосапробными, умеренно загрязненными. По классификации О. П. Оксийук и др. [1993], вода на всех участках озера относится к 3 классу (*удовлетворительной чистоты*) к 36 разряду – «слабо загрязненная», несмотря на высокое содержание нефтепродуктов в воде и грунте.

При залповом загрязнении, пока нефть в водном объекте не расслоилась на фракции, как правило, происходит деградация зоопланктонного сообщества. Нефтяные углеводороды нарушают репродуктивную систему Cladocera уже при 0,001 % содержания в воде. Помимо прямого токсического воздействия нефть склеивает фильтрационный аппарат и препятствует фильтрационному питанию, парафины нарушают обмен веществ через панцирь и т. д. [Wong et al., 1981; Choi et al., 2010; Lozovoy, 2012; Almeda et al., 2013]. Однако самоочищение воды происходит достаточно быстро. Поступившая в поверхностные воды нефть вступает в общую цепь сложных и мало исследованных по длительности процессов (испарение, растворение, эмульгирование, окисление, образование агрегатов, седиментация, биodeградация) [Воробьев, 2003]. В итоге тяжелые фракции нефти (смолы, асфальтены, парафины и др.) сорбируются в донных отложениях, а легкие – испаряются. Размыв загрязненных донных отложений может вызывать вторичное загрязнение вод, однако малая площадь изолированных участков и высота дамб препятствуют ветровому перемешиванию, а поступление грунтовых вод ускоряет очищение воды. Адаптационные возможности зоопланктона водоемов данного региона достаточно высоки. Кроме того, нефть является природным материалом. Все составляющие ее углеводороды, включая ароматические, являются результатом преобразования живого вещества и, следовательно, не являются «чужими» для водных организмов, в том числе для зоопланктона. Широко известно, что нефть представляет опасность для крупных орга-

низмов – водоплавающих птиц, рыб, млекопитающих. Однако для фито- и зоопланктона может отмечаться как угнетающее, так и стимулирующее влияние присутствия углеводов в воде на развитие отдельных видов [McCaughey, 1966; Davenport, 1982]. Численность и биомасса зоопланктонного сообщества, как и количественные показатели отдельных групп, не могут являться показателями, характеризующими качество воды. До некоторой степени загрязненность различных участков озера нефтепродуктами отражает соотношение отдельных видов внутри групп. На наиболее загрязненных участках преобладают веслоногие рачки, снижается видовое разнообразие коловраток и фитофильных форм ветвистоусых. Таким образом, при оценке состояния озер после нефтяного загрязнения необходимо пользоваться комбинаторными индексами биологической индикации, по возможности охватывая все звенья экосистемы, включая бактериальную петлю, перифитон, бентос и т. д.

### Литература

*Воробьев Д. С.* Донные сообщества пойменно-речных систем бассейна Васюгана в условиях нефтяного загрязнения: Автореф. дис. ... канд. биол. наук. Томск, 2003. 19 с.

*Московченко Д. В.* Экологическое состояние рек Обского бассейна в районах нефтедобычи // География и природные ресурсы. 2003. № 1. С. 35–41.

*Московченко Д. В., Убайдуллаев А. А.* Влияние разливов нефти на загрязнение поверхностных вод Ханты-Мансийского автономного округа – Югры // Вестник Тюменского гос. ун-та (Науки о Земле). 2014. № 4. С. 5–16.

*Оксиук О. П., Жукинский В. Н., Брагинский Л. П. и др.* Комплексная экологическая классификация качества поверхностных вод суши // Гидробиол. журн. 1993. № 4. С. 62–76.

*Руководство по методам гидробиологического анализа поверхностных вод и донных отложений / Под ред. В. А. Абакумова.* Л.: Гидрометеиздат, 1983. С. 59–78.

*Almeda R, Wambaugh Z, Wang Z et al.* Interactions between Zooplankton and Crude Oil: Toxic Effects and Bioaccumulation of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons // PLoS ONE. 2013. T. 8, N 6. e67212. doi:10.1371/journal.pone.0067212 (дата обращения 30.03.2017).

*Choi Keun-Hyung, Lim Sang-Min, Lee Sung-Mi, Park Gyung-Soo.* Toxicity on Laboratory Grown Plankton by the Oils Released from the Hebei Spirit Spill with Emphasis on a Dispersant Used in the Aftermath // Journal of the Environmental Sciences International. 2010. Vol. 19, N 4. P. 389–397.

*Davenport J., Angel M. V., Gray J. S. et al.* Oil and Planktonic Ecosystems: Discussion // Philosophical transactions of the royal society. B. Biological sciences. 1982. N 297. P. 369–384.

*Ermolaeva N. I., Dvurechenskaya S. Y.* Regional indices of the indicator significance of zooplanktonic organisms in water bodies of southern Western Siberia // Russian Journal of Ecology. 2013. Vol. 44, N 6. P. 527–531.

*Lozovoy D. V.* The influence of oil hydrocarbons on Baikalian organisms in natural and laboratory conditions // Scientific and Technical Journal Georesursy (Georesources). 2012. Vol. 43, N 1. P. 53–58.

*McCaughey R. N.* The biological effects of oil pollution in a river // Limnology and Oceanography. 1966. Vol. 11, N 4. P. 475–486.

*Wong C. Kim, Engelhardt F. Rainer, Strickler J. R.* Survival and Fecundity of *Daphnia pulex* on Exposure to Particulate Oil. Bull. // Environm. Contam. Toxicol. 1981. N 26. P. 606–612.

## **PROBLEMS OF USING ZOOPLANKTON AS AN INDICATOR OF OIL POLLUTION OF FRESHWATER ECOSYSTEMS (EXAMPLE OF LAKE SAMOTLOR)**

**N. I. Yermolaeva**

*Institute for Water and Environmental Problems, Siberian Branch RAS*

It is shown that the presence of oil hydrocarbons in water did not kill the plankton. The density of plankton remained unaffected but there was some change in community structure, with some species disappearing while others prospered. The ratios of species within zooplankton groups may reflect the contamination of certain sites in the lake by oil products. The presence of healthy plankton in low-energy environments that have been chronically polluted or exposed to a spill may be misleading; the water column may be relatively clean but contaminated sediments may prevent effective settlement of benthic or nektonic organisms. At an assessment of the condition of lakes after oil pollution it is necessary to use combinatorial indexes of biological indication covering as much as possible all components of the ecosystem.

## **ВЛИЯНИЕ АБИОТИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ НА ПРОДУКТИВНОСТЬ МАЛЫХ ОЗЕР ЮГА ЗАПАДНОЙ СИБИРИ**

**Н. И. Ермолаева<sup>1</sup>, Е. Ю. Зарубина<sup>1</sup>, В. Д. Страховенко<sup>2</sup>, Е. А. Овдина<sup>2</sup>, Р. Е. Романов<sup>3</sup>, А. В. Пузанов<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>*Институт водных и экологических проблем СО РАН*

<sup>2</sup>*Институт геологии и минералогии им. В. С. Соболева СО РАН*

<sup>3</sup>*Центральный сибирский ботанический сад СО РАН*

Исследована биологическая продуктивность разнотипных малых озер юга Западной Сибири от сухостепной до лесной зоны. На основе статистической обработки полученных данных выявлены основные факторы, влияющие на продуктивность водных экосистем. На величину образования первичной продукции основное влияние оказывают: сумма эффективных температур, концентрация растворенного в воде кислорода, содержание растворенных органических веществ, карбонатов и сульфатов. Определяющими факторами формирования суммарной продукции водных эко-

систем в сухостепной зоне оказались рН и минерализация, объясняя в сумме 94 % изменчивости. В степной зоне также рН и минерализация, но уже в меньшей степени (65 % изменчивости). Севернее роль минерализации и активной реакции среды снижается, при этом возрастает определяющая роль суммы температур.

В 2012–2016 гг. было исследовано более 40 разнотипных озер, расположенных в сухостепной, степной, лесостепной и лесной зонах юга Западной Сибири (в пределах Алтайского края, Новосибирской, Томской и Омской областей). Озера различались по степени минерализации (от 0,01 до 24,3 и от 24 до 113 г/дм<sup>3</sup>), величине рН (от 6,3 до 9,96), содержанию растворенного в воде кислорода (4–13 мг/дм<sup>3</sup>), концентрации органических веществ (по БПК<sub>5</sub> 0,81–7,44 мг О/дм<sup>3</sup>), гидрокарбонатов, сульфатов, нитратов и фосфатов.

Была изучена продуктивность озерных экосистем по первичным (фитопланктон и макрофиты) и вторичным (зоопланктон) продуцентам. На основе статистической обработки выявлены основные факторы, влияющие на величину продукции.

По уровню развития фитопланктона наиболее продуктивны оказались озера лесной и лесостепной зон, величина валовой первичной продукции в которых составляла от 1,14 до 1,96 мг О<sub>2</sub>/(л·ч), наименее продуктивны озера сухостепной и степной зон (0,02–0,1 мг О<sub>2</sub>/(л·ч)). Продукция макрофитов была также выше в озерах лесной и лесостепной зон – 2083–4426 г/м<sup>2</sup>·год, при этом в озерах лесной зоны была выше продукция погруженной растительности, в лесостепной – полупогруженной.

Дисперсионный анализ показал, что на образование первичной продукции фитопланктона (ПР<sub>фп</sub>) во время вегетационного сезона в исследованных озерах основное влияние оказывают такие факторы, как сумма положительных температур (сумма положительных температур за вегетационный период), содержание растворенного в воде кислорода и концентрация органических веществ (по БПК<sub>5</sub>). Интенсивность влияния фактора – от 44,6 до 55,4 % при уровне достоверности <0,05 (табл. 1). Продукция фитопланктона практически не зависит от суммарной минерализации, реагируя только на возрастание концентрации хлоридов (при возрастании концентраций хлоридов до 1 г/л наблюдается рост продукции фитопланктона). При этом развитие азотфиксирующих цианобактерий приводит к активному вовлечению в биотический круговорот атмосферного азота. При росте продукции фитопланктона в воде наблюдается рост концентраций соединений азота.

На процессы образования первичной продукции у погруженных растений (ПР<sub>гд</sub>) наиболее интенсивное влияние оказывает концентрация сульфат-ионов и растворенного в воде кислорода (64,3 и 59,3 %, соответственно) при уровне достоверности <0,05. Большое значение имеет также

концентрация растворенного в воде кислорода (59,3 %) и сумма эффективных температур (SET) (58,8 %) при уровне достоверности <0,05. В то же время величина годовой продукции полупогруженной растительности (П<sub>гд</sub>) значительное влияние оказывала кислотность (pH) среды (69 % при уровне достоверности <0,05) (табл. 1).

**Таблица 1. Результаты дисперсионного анализа (в системе ANOVA) по оценке влияния факторов внешней среды на продукционные показатели экосистемы озер**

Показатель	Фактор	F критерий Фишера	P-значение	Интенсивность влияния фактора, %
ПР <sub>гд</sub>	pH	2,5	0,0539	69
ПР <sub>гд</sub>	SET	2,6	0,0354	58,8
	O <sub>2</sub>	2,14	0,0694	59,3
	Ca	2,3	0,0533	57,6
	SO <sub>4</sub>	4,02	0,0102	64,3
ПР <sub>мф</sub>	SET	2,26	0,0613	62,1
	Ca	3,34	0,0098	48,4
ПР <sub>фп вал</sub>	SET	53,89	0,0001	44,6
	O <sub>2</sub>	2,66	0,0289	53,9
ПП <sub>фп числ</sub>	БПК <sub>5</sub>	2,52	0,0368	55,4

Таким образом, на величину образования первичной продукции в исследованных водоемах основное влияние оказывают следующие факторы: сумма эффективных температур, концентрация растворенного в воде кислорода, содержание растворенных органических веществ, а также карбонатов и сульфатов. Уровень минерализации воды в озерах не оказал существенного влияния на продуктивность автотрофных организмов.

Проведен статистический анализ комплексного влияния активной реакции воды (pH), общей минерализации (TDS), суммы годовых эффективных температур, концентрации растворенного кислорода, карбонатов, сульфатов, хлоридов, нитратов, фосфатов, БПК<sub>5</sub>, прозрачности на формирование зоопланктонного сообщества озер. Графический и дисперсионный анализы показали, что продукция зоопланктонного сообщества в целом в меньшей степени лимитирована абиотическими факторами среды обитания, чем фитопланктон, макрофиты и зообентос. С увеличением минерализации достоверно снижается только число видов. Сила влияния минерализации на видовое богатство сообщества зоопланктона составила 52 %.

При анализе продукционных показателей различных групп зоопланктона на указанных градиентах среды выявлено, что Cladocera, Rotifera, Сорепода различным образом реагируют на их изменение. Часто реакции являются разнонаправленными, что не позволяет их проследить при рассмотрении сообщества в целом.

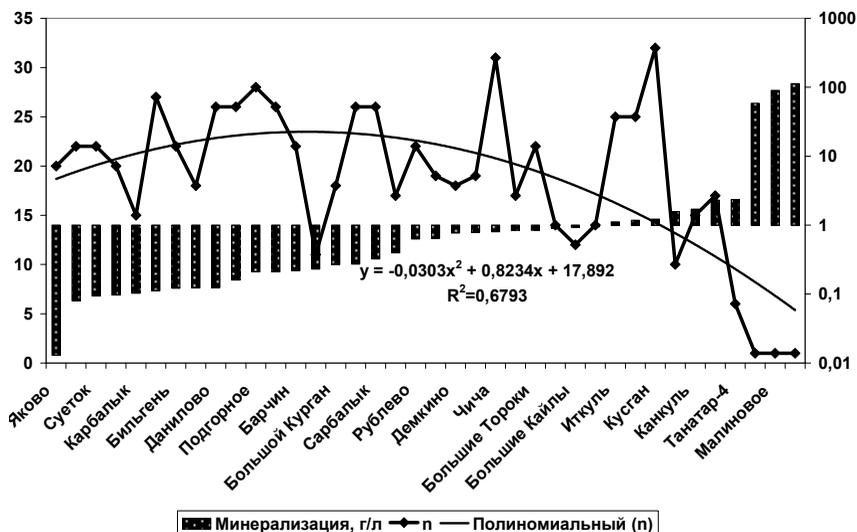


Рис. 1. Зависимость числа видов зоопланктона от минерализации воды в малых озерах юга Западной Сибири

Максимальная продукция зоопланктонного сообщества в целом наблюдается в озерах лесостепной зоны, снижаясь в степной и лесной зонах (т. е. при возрастании и при снижении суммы положительных температур).

Увеличение минерализации приводит к снижению видового богатства зоопланктона. При этом его продукционные характеристики в отдельных озерах даже увеличиваются, хотя трофическая структура упрощается. Продукция зоопланктона в основном определяется величиной продукции Cladocera и зависит от количества органических веществ в воде (прямая зависимость от БПК<sub>5</sub>). Продукция Rotifera и Copepoda возрастает при увеличении показателей рН и является максимальной в диапазоне  $8,5 \leq \text{pH} \leq 9,5$ .

Экстремально высокие значения факторов рН и минерализации угнетающе действуют на зоопланктон озер. Если один из этих факторов имеет экстремальное значение, любое повышение второго благоприятно сказывается на состоянии угнетенного зоопланктона, и тогда именно этот второй фактор определяет величины продукции и видового разнообразия. Поскольку в условиях юга Западной Сибири оба этих фактора возрастают, как правило, параллельно, угнетение продукции зоопланктонного сообщества отмечается только при минерализации свыше 280 г/л.

Отметим, что в летний период ни прозрачность воды, ни концентрация кислорода не оказались определяющими факторами, обуславливающими продукционные характеристики фито- и зоопланктона (табл. 2).

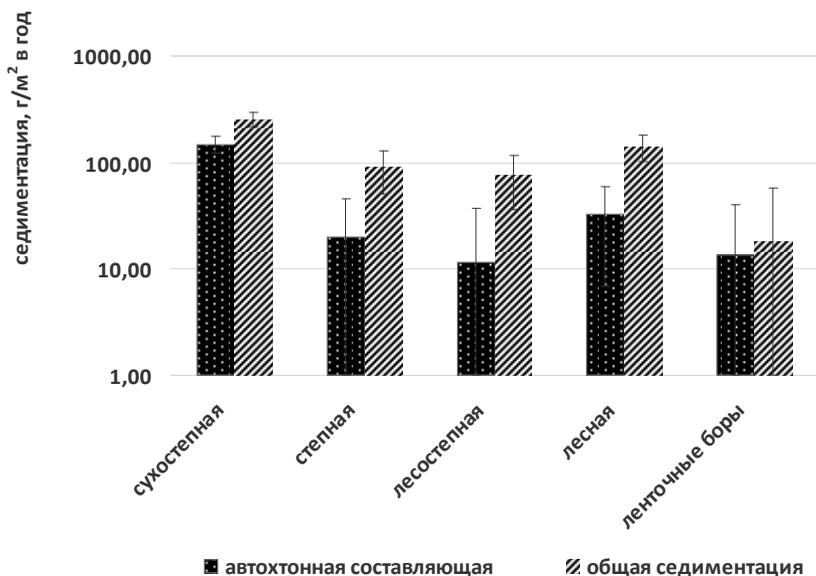
Проведен расчет вклада отдельных групп гидробионтов в потоки органического азота, органического фосфора, органического углерода. Развитие крупных фильтрующих Cladocera, как и фитопланктона, способствует осаждению фосфора, тогда как высокая продукция Soropoda (как хищных форм, так и детритофагов) является показателем повышенного процентного содержания азота и органического углерода в донных осадках. На содержание органического вещества в сапропелях влияет и тип зарастания озер высшей водной растительностью. Наибольшее содержание  $C_{орг.}$  и  $N_{орг.}$  отмечено в донных отложениях озер со сплавинным и массивно-зарослевым типами зарастания и доминированием *Phragmites australis* (Cav.) Trin ex Steud., *Typha angustifolia* L., *Carex acuta* L., *Ceratophyllum demersum* L., *Potamogeton pectinatus* L. и *P. perfoliatus* L.

Самая высокая скорость накопления донных отложений наблюдается в озерах сухостепной зоны, самая низкая – в озерах ленточных боров (рис. 2). Наибольший вклад гидробионтов в формирование ОВ донных отложений характерен для озер лесной зоны (до 83 % от общего

Таблица 2. Критерий Фишера (F) и величина достоверности аппроксимации (P) для однофакторного дисперсионного анализа ANOVA

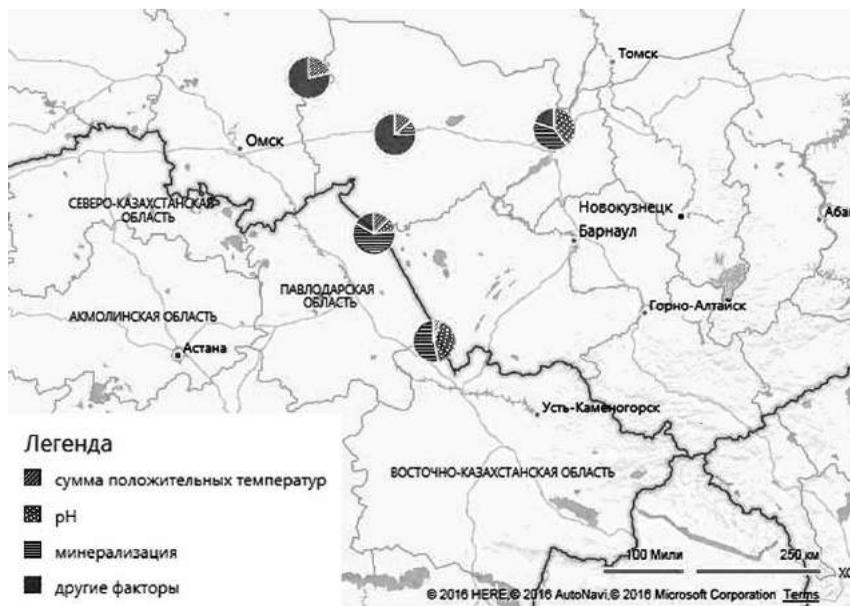
	Сумма положительных температур	pH	Минерализация	Классификационный род	Прозрачность	БПК, мг О <sub>2</sub> /л	Карбонаты	Хлориды	Сульфаты	Нитраты	PO <sub>4</sub>
Продукция зоопланктона	-	-	-	-	-	F = 2,45 P = 0,048	-	-	-	-	-
Продукция Rotifera	-	F = 2,79 P = 0,027	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Продукция Cladocera	-	-	-	-	-	F = 2,47 P = 0,047	-	-	-	-	F = 2,88 P = 0,023
Продукция Соропода	-	F = 3,80, P = 0,005	-	-	-	-	-	-	-	-	F = 2,95 P = 0,021
Число видов зоопланктона	-	-	F = 3,07 P = 0,011	-	-	-	F = 4,67 P = 0,002	F = 5,71 P = 0,00	F = 12,60 P = 0,00	F = 8,49 P = 0,00	F = 2,86 P = 0,024
Продукция фитопланктона	F = 53,89 P = 0,00	-	-	-	-	-	-	F = 25,74 P = 0,00	-	F = 36,16 P = 0,00	-

седиментационного потока). При минерализации в диапазоне от 10 до 280 г/л и  $8,5 \leq \text{pH} \leq 9,5$  в озерах образуется планктонный сапропель, обогащенный аминокислотами, моносахарами, витаминами группы В, что позволяет использовать его в качестве лечебных грязей, включать в состав комбикормов и косметических средств [Страховенко и др., 2014, 2016; Ермолаева и др., 2016]. При снижении минерализации и показателей pH в сапропелях возрастает роль растительных компонентов (макрофитный сапропель). Такие сапропели оптимально использовать в качестве комплексных удобрений, к тому же без риска засоления почв.



**Рис. 2.** Доля аллохтонной составляющей в седиментационном потоке в малых озерах юга Западной Сибири (природные зоны указаны на диаграмме)

При проведении многофакторного анализа выявлено, что определяющими факторами для формирования суммарной продукции водных экосистем в сухостепной зоне оказались pH и минерализация, объясняя в сумме 94 % изменчивости; в степной зоне – также pH и минерализация, но уже в меньшей степени (65 % изменчивости). Севернее роль минерализации и активной реакции среды снижается, при этом возрастает определяющая роль суммы температур и других, пока неустановленных факторов (рис. 3).



**Рис. 3. Процентное влияние абиотических факторов на суммарную продуктивность водных экосистем малых озер юга Западной Сибири**

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ № 16-05-00132 А и 17-05-00404 А.

### Литература

*Ермолаева Н. И., Зарубина Е. Ю., Романов Р. Е. и др.* Гидробиологические условия формирования сапропелей в озерах юга Западной Сибири // Водные ресурсы. 2016. Т. 43, № 1. С. 79–91.

*Страховенко В. Д., Таран О. П., Ермолаева Н. И.* Геохимическая характеристика сапропелевых отложений малых озер Обь-Иртышского междуречья // Геология и геофизика. 2014. Т. 55, № 10. С. 1466–1477.

*Страховенко В. Д., Росляков Н. А., Сысо А. И. и др.* Геохимическая характеристика сапропелей Новосибирской области // Водные ресурсы. 2016. Т. 43, № 3. С. 336–344.

## THE EFFECT OF ABIOTIC FACTORS ON THE PRODUCTIVITY OF SMALL LAKES IN THE SOUTH OF WESTERN SIBERIA

N. I. Yermolayeva<sup>1</sup>, E. Yu. Zarubina<sup>1</sup>, V. D. Strakhovenko<sup>2</sup>, E. A. Ovdina<sup>2</sup>,  
R. E. Romanov<sup>3</sup>, A. V. Puzanov<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Institute for Water and Environmental Problems, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences*

<sup>2</sup>*Institute of Geology and Mineralogy, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences*

<sup>3</sup>*Central Siberian Botanical Garden, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences*

The biological productivity of small lakes of different types in the south of Western Siberia from arid steppe to the forest zone was investigated. The major factors influencing the productivity of the water ecosystems were revealed through statistical processing of the obtained data. The main influence on the size of primary production was exerted by: the sum of efficient temperatures, concentration of dissolved oxygen, content of dissolved organic matter, carbonates and sulfates. The key factors for the total production of aquatic ecosystems in the arid steppe zone were pH and mineralization, which collectively explained 94 % of variation. In the steppe zone they were also pH and mineralization, but to a lesser degree (65 % of variation). Further north the role of mineralization and pH decreased, whereas the effect of the sum of temperatures increased.

## СУКЦЕССИИ РАСТИТЕЛЬНОГО ПОКРОВА ПЕРИОДИЧЕСКИ ПЕРЕСЫХАЮЩИХ ОЗЕР ЮГА ОБЬ-ИРТЫШСКОГО МЕЖДУРЕЧЬЯ

Е. Ю. Зарубина, М. И. Соколова

*Институт водных и экологических проблем СО РАН*

Исследован растительный покров малых мелководных периодически пересыхающих озер юга Обь-Иртышского междуречья. Показано, что сезонные и многолетние циклические колебания уровня воды в озерах приводят к унификации и однообразию их растительного покрова: полностью исчезает погруженная растительность, а воздушно-водная растительность замещается гигрофильной, и при длительном отсутствии воды озеро может трансформироваться в галофильный луг, являющийся характерным элементом данной территории. При новом наполнении водоема в течение нескольких лет вероятно восстановление его растительного покрова.

Озера – наиболее заметные, ценные и уязвимые элементы ландшафтов во всем мире, средоточие природных процессов и социальных интересов. Состав, структура и функционирование биоценозов мелководных озер в большей, чем в других лимнических системах, степени зависят от внешних факторов. Внутригодовая и многолетняя сукцессии их экосистем от-

ражают разномасштабные по времени и пространству изменения биологических, химических и физических характеристик окружающей среды, происходящих под влиянием естественных и антропогенных факторов [Кириллов и др., 2008, 2010].

Целью работы было изучение особенностей растительного покрова мелководных периодически пересыхающих озер юга Обь-Иртышского междуречья.

Территория юга Обь-Иртышского междуречья занимает обширную Барабинско-Кулундинскую депрессию, ограниченную на западе Иртышским увалом, на востоке – Приобским плато, на севере – Васюганским плато, на юге – предгорными равнинами Алтая. Эта территория относится к числу озерных районов России и представлена около 8500 водоемами с общей площадью акватории более 16 000 км<sup>2</sup> [Дурников, 2013]. Озера различаются по площади, форме котловины, гидрологическому режиму, минерализации воды, растительному покрову. В основном это небольшие по площади мелководные водоемы, но встречаются и крупные, такие как Кулундинское и Кучукское озера (площадь акватории – 727 и 170 км<sup>2</sup>, соответственно) [Абрамович, 1960]. Расположены озера, как правило, в межгрядных понижениях и западинах с низкими плоскими берегами, постепенно сливающимися с окружающей местностью. Общая минерализация воды в озерах колеблется в пределах 30–365 г/дм<sup>3</sup>, причем в разные годы в отдельно взятом озере, подчиняясь циклам общей увлажненности и обводненности, концентрация солей может изменяться в значительных пределах, например, в оз. Кулундинском от 39,0 до 145,2 г/дм<sup>3</sup> [Новоселова, Новоселов, 2000].

Уровень воды в озерах, расположенных на юге Обь-Иртышского междуречья, характеризуется сезонными и многолетними циклическими колебаниями и имеет в течение года два максимума – весной и осенью и два минимума – летом и зимой. Весенний подъем уровня воды связан со снеготаянием, затем происходит быстрый спад в связи с увеличением расхода воды на испарение. К середине лета некоторые водоемы могут пересыхать полностью. Осенний максимум формируется дождевыми осадками, зимний минимум наступает перед вскрытием озер ото льда [Дурников, 2013].

Кроме годовых (сезонных) колебаний уровня воды в озерах этого региона отмечаются и внутривековые колебания. По данным А. В. Шнитникова [1957], их продолжительность составляет от 29 до 45 лет, при этом подъем уровня воды в озерах происходит относительно быстро, начинаясь обычно резко и в короткий период (2–3 года), после чего темп подъема на 2–6 лет (в зависимости от размера бассейна) замедляется. Далее следует короткий период неустойчивого максимума (1–3 года) и продол-

жительный медленный спад (12–20 и более лет) до периода максимально низкого уровня воды, продолжающегося 6–8 лет. Внутривековые колебания уровня воды озер являются следствием внутривековой изменчивости их водного баланса, и в первую очередь атмосферных осадков, с их последующей трансформацией и испарением.

Усыхание озер, дальнейшее восстановление их обводненности и, как следствие, изменение минерализации воды оказывают значительное влияние на функционирование водных и прибрежно-водных фитоценозов.

Растительный покров мелководных периодически пересыхающих озер юга Обь-Иртышского междуречья изучали в ходе комплексных экспедиционных исследований ИВЭП СО РАН в 2008–2015 гг. Исследования проводили стандартными методами [Руководство..., 1992]. Уровень продуктивности водных фитоценозов определяли по их биомассе на укосных площадках размером 0,25 м<sup>2</sup> [Папченко, 2003]. В укосах подсчитывали число побегов, измеряли высоту и сырую массу. В камеральных условиях укосы досушивали до абсолютно-сухого веса для подсчета продукции. Годовая продукция макрофитов рассчитывалась по формуле  $P = 1,2V_{\max}$ , где  $P$  – годовая продукция,  $V_{\max}$  – максимальная надземная фитомасса в абсолютно-сухом весе [Распопов, 1973].

По ботанико-географическому районированию данная территория относится к Западно-Сибирской низменности и включает три подпровинции: Барабинскую и Приобскую лесостепи и Кулундинскую степь [Куминова и др., 1963]. В Барабинской лесостепи и Кулундинской степи климат характеризуется недостаточным увлажнением, большим количеством тепла и света в летний период. Вероятность засух в степной зоне составляет до 30–40 %, лесостепной – до 20–30 % [Азьмука и др., 1972; Харламова, Силантьева, 2011].

Именно в этих районах расположено большинство озер, подверженных значительному снижению уровня воды вплоть до полного высыхания в теплый период года. Растительный покров этих озер характеризуется преобладанием воздушно-водной растительности. Тип зарастания озер преимущественно бордюрный или займищный. Доминирует тростник южный (*Phragmites australis* (Cav.) Trin. ex Steud.), иногда в ассоциациях с рогозами узколистным и Лаксмана (*Typha angustifolia* L. и *T. laxmanii* Lerech.), а также камышами (*Scyrrpus lacustris* L., *S. tabernemontanii* Gmel.). Со стороны берега зона воздушно-водных растений во многих случаях соприкасается с зоной прибрежно-водных, образованных солеросами, а со стороны воды ограничена чистым открытым плесом или зоной погруженных растений, преимущественно рдестов (*P. pectinatus* L. и *P. macrocarpus* Dobroch.) и наяды (*Najas marina* L.).

На регулярно пересыхающих водоемах, где вода из озера практически ежегодно испаряется к середине лета, погруженная растительность, как правило, отсутствует. Однако воздушно-водная растительность сохраняется до осени (начала периода дождей). Примером таких озер могут служить многочисленные мелководные малые озера Кулундинской степи, расположенные на территории Алтайского края: Пресное (Волчихинский район), Горькое (Угловский район), Соленое (Михайловский район) и др.

При этом на озерах, где уровень воды падает до 0,2–0,4 м, ситуация может развиваться в двух направлениях. В первом случае (оз. Пресное) отмечается угнетение воздушно-водной растительности, выражающееся в значительном уменьшении площади зарастания, высоты растений (до 1,2 м), плотности зарослей (до 40 экз./м<sup>2</sup>) и снижении годовой продукции тростниковых сообществ (до 211,2 г/м<sup>2</sup>). В береговой обсыхающей полосе заросли тростника становятся еще более разреженными и заменяются сообществами маревых.

На других озерах (Соленое), напротив, при усыхании озера и уменьшении площади его акватории площадь его зарастания, преимущественно тростником, увеличивается, численность в сообществах достигает 80–120 экз./м<sup>2</sup>, а годовая продукция – 624–750 г/м<sup>2</sup>. В береговой полосе в сообществах появляются маревые, общая численность возрастает до 96–148 экз./м<sup>2</sup>, а годовая продукция до 784 г/м<sup>2</sup>. Однако на обсыхающих участках берега тростник также полностью заменяется сообществами маревых.

На полностью высыхающих водоемах (оз. Горькое) происходит активное заселение озерной котловины представителями семейств Chenopodiaceae, Suringaceae и Roaseae. При этом значительного увеличения площади зарослей воздушно-водных растений (тростник, камыш Табернемонтана) не происходит, но количественные показатели, как правило, остаются высокими (численность в тростниковых сообществах – до 76 экз./м<sup>2</sup> при годовой продукции 1296,0 г/м<sup>2</sup>). В случае отсутствия воды на этом озере в течение двух-трех лет озеро может полностью трансформироваться в галофильный луг, являющийся характерным элементом данной территории.

В настоящее время на внутривековые, межгодовые и сезонные колебания уровня воды в озерах огромное влияние оказывают различные виды хозяйственной деятельности человека. К катастрофическим последствиям приводит гидротехническое строительство, приводящее к изменениям гидрологического режима водных объектов. Примером может служить оз. Саргуль, расположенное в Барабинской лесостепи. Площадь зеркала озера в зависимости от водности года ранее составляла от 10 до 38 км<sup>2</sup>, при средней глубине 0,2 и 2,7 м, соответственно. На озере отмечался бордюрно-займищный тип зарастания с доминированием среди

воздушно-водной растительности сообществ тростника южного и рогозов Лаксмана и узколистного, среди погруженной – рдеста гребенчатого (*P. pectinatus*) и кладофоры (*Cladophora* sp.) [Ресурсы..., 1962]. В результате постройки водоотводного канала, воды р. Чулым, питающей озеро, перестали поступать в водоем, и через несколько лет вода в озере сохранилась лишь в центральной части в виде отдельных мелких луж. Воздушно-водная растительность, приспособленная к колебаниям уровня воды, занимала обширные площади на высыхающем дне и вдоль бывших берегов водоема, т. е. на участках, занимаемых ею в период существования воды в озере. Продуктивность тростниковых сообществ составляла около 1600 г/м<sup>2</sup> в год, при средней численности 168 ± 4 экз./м<sup>2</sup> и высоте растений 2,1 ± 0,2 м. Эти показатели были подобны или даже выше, чем на расположенных в той же зоне и обводненных в этот период озерах Большие Тороки (продукция 1650 г/м<sup>2</sup> в год при численности 192 экз./м<sup>2</sup> и средней высоте растений 2,0 ± 0,3 м) и Иткуль (продукция 864 г/м<sup>2</sup> в год при численности 276 экз./м<sup>2</sup> и средней высоте растений 1,3 ± 0,4 м). Однако среди рогозов Лаксмана и узколистного было отмечено большое количество тератогенных форм, свидетельствующих о неблагоприятных для этих растений условиях существования [Краснова, 2010]. Погруженная растительность в виде высохших растительных матов из остатков рдестов с примесью кладофоры покрывала около 30 % обсыхающего дна озера. Свободные от тростниково-рогозовых зарослей участки активно заселялись гигрофильной растительностью, преимущественно осоковыми (*Bolboschoenus planiculmis* (Fr. Schmidt.) Egor) и маревыми (*Chenopodium glaucum* L., *Ch. rubrum* L., *Suaeda prostrata* Pall).

Значительное влияние гидротехническое строительство оказало и на гидрологический режим оз. Большое Топольное (Кулундинская степь). В результате строительства выше по течению р. Бурла большого количества дамб и плотин, используемых местными рыбсовхозами, произошло нарушение ее естественного стока, и оз. Большое Топольное, являющееся приемником стока реки и имеющее площадь зеркала около 100 км<sup>2</sup>, за последние 40 лет пересыхало уже дважды [Дурников, 2002]. В настоящее время водное ядро представлено только двумя погруженными видами рдестов (*Potamogeton pectinatus* L. и *P. macrocarpus* Dobroch.). На озере доминируют тростниковые сообщества. В годы с низким уровнем воды в озере тростники оказываются на берегу на расстоянии 30–40 м от уреза воды, продукция таких сообществ низкая (около 355 г/м<sup>2</sup> в год при средней численности 32 ± 4 экз./м<sup>2</sup> и высоте растений 2,1 ± 0,1 м), в то время как в других озерах этой системы, расположенных выше по течению, продукция тростниковых сообществ превышает 850 г/м<sup>2</sup> в год.

Таким образом, сезонные и многолетние циклические колебания уровня воды в озерах привели к унификации и однообразию их растительного покрова. Понижение уровня воды в озерах приводит к исчезновению погруженной растительности и частичному, а в случае высыхания водоема и полному замещению воздушно-водной растительности гигрофильной. В случае отсутствия воды в течение нескольких лет оно может полностью трансформироваться в галофильный луг, являющийся характерным элементом данной территории. Однако при наполнении водоема в течение нескольких лет вероятно восстановление его растительного покрова.

Работа выполнена в рамках госбюджетного проекта 134.1.2 и при частичной финансовой поддержке гранта РФФИ 17-05-00404.

### Литература

*Абрамович Д. И.* Воды Кулундинской степи. Новосибирск: СО АН СССР, 1960. 214 с.

*Азьмуха Т. И., Воронина Л. В., Пазухина Р. А.* Ресурсы климата // Оценка природных ресурсов Новосибирской области. Новосибирск, 1972. 144 с.

*Дурникин Д. А.* Флора водоемов юга Обь-Иртышского междуречья. Барнаул: Изд-во Алт. ун-та, 2013. 168 с.

*Дурникин Д. А.* Внутривековые колебания уровня степных озер между Уралом и Обью, их влияние на гидро- и гигрофитную флору и растительность // Биология внутренних вод: проблемы экологии и биоразнообразия: Тез. докл. XII Междунар. конф. молодых ученых. Борок, 2002. С. 4–5.

*Зарубина Е. Ю., Дурникин Д. А.* Флора соленых озер Кулундинской равнины (юг Западной Сибири) // Сибирский экологический журнал. 2005. Т. 12, № 2. С. 341–351.

*Кириллов В. В., Зарубина Е. Ю., Котовициков А. В. и др.* Состав и структура водных экосистем бассейна реки Бурлы в 2010 году // Наука – Алтайскому краю, 2010 год: Сб. ст. Вып. 4. Барнаул: Алтайский дом печати, 2010. С. 239–252.

*Кириллов В. В., Безматерных Д. М., Зарубина Е. Ю. и др.* Состав и структура экосистем степных озер Алтайского края в 2008 г. // Наука – Алтайскому краю, 2008 год: Сб. науч. ст. Вып. 2. Барнаул: Азбука, 2008. С. 237–254.

*Краснова А. Н.* Тератоморфы рогоза широколистного *Typha latifolia* L. озера Воже // Биология внутренних вод. 2010. № 4. С. 39–44.

*Куминова А. В., Вагина Т. В., Лапина Е. И.* Геоботаническое районирование юго-востока Западно-Сибирской низменности // Растительность степной и лесостепной зон Западной Сибири. Вып. 6. Новосибирск: СО АН СССР, 1963. С. 35–62.

*Новоселова З. И., Новоселов В. А.* Экологический мониторинг соляных аква-систем, испытывающих антропогенную нагрузку // Сибирский экологический журнал. 2000. № 3. С. 249–255.

*Папченков В. Г.* Продукция макрофитов вод и методы ее изучения // Гидророботаника: методология и методы: Материалы Школы по гидророботанике. Рыбинск: Рыбинский Дом печати, 2003. С. 137–145.

*Распопов И. М.* Фитомасса и продукция макрофитов Онежского озера. Л., 1973. С. 123–142.

*Ресурсы* поверхностных вод районов освоения целинных и залежных земель. Т. VI: Равнинные районы Алтайского края и южная часть Новосибирской области. Л.: Гидрометеиздат, 1962.

*Руководство* по гидробиологическому мониторингу поверхностных экосистем / Под ред. В. А. Абакумова. СПб.: Гидрометеиздат, 1992. 318 с.

*Савченко Н. В.* Озера южных равнин Западной Сибири. Новосибирск, 1997. 300 с.

*Шнитников А. В.* Изменчивость общей увлажненности материков Северного полушария / Зап. геогр. общества СССР. М.; Л.: АН СССР, 1957. Т. 16. 336 с.

*Харламова Н. Ф., Силантьева М. М.* Современное состояние и тенденции изменений климата Кулунды // Изв. Алтайского гос. ун-та. 2011. № 3–2. С. 50–55.

## **SUCCESSIONS OF THE PLANT COVER OF EPHEMERAL LAKES IN THE SOUTHERN PART OF THE OB-IRTYSH INTERFLUVE**

**E. Yu. Zarubina, M. I. Sokolova**

*Institute for Water and Environmental Problems, Siberian Branch,  
Russian Academy of Sciences*

The plant cover of small shallow-water ephemeral lakes in the southern part of the Ob-Irtysh interfluve was investigated. It was shown that seasonal and long-term cyclic fluctuations of the water level in the lakes lead to unification and homogeneity of their plant cover: submerged vegetation completely disappeared, and emergent plants are replaced by hydrophytes. In the long absence of water a lake can turn into a halophilic meadow, which are a typical feature in this territory. After a lake is refilled, its plant cover can recover within several years.

## **АНАЛИЗ РЕЦЕНТНЫХ ОСТАТКОВ CLADOCERA (BRANCHIOPODA, CRUSTACEA) В ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЯХ ОЗЕР БАССЕЙНА РЕКИ ХАТАНГИ**

**Э. А. Зиннатова, Л. А. Фролова**

*Казанский (Приволжский) федеральный университет*

Изучение озерных отложений позволяет воссоздать детальную картину смены абиотических и биотических условий в озере и его окрестностях Субарктики [Моисеенко и др., 1997]. Особый интерес представляют собой донные отложения удаленных, подверженных минимальному антропогенному вмешательству водоемов, в частности, повышенный интерес проявляется к исследованиям арктических и субарктических экосистем. Северные экосистемы являются наиболее уязвимыми в силу их специфических характеристик. Водные экосистемы в условиях российского Заполярья характеризуются особенностями

формирования химического состава поверхностных вод. Поведение и миграционная способность элементов и соединений в высоких широтах специфичны в силу климатических и ландшафтно-географических особенностей, их токсичные свойства проявляются более активно в низкоминерализованных и низкотемпературных водах вследствие низкой скорости энергообмена и более бедного видового разнообразия водных экосистем Субарктики [Моисеенко и др., 1997; Тетерюк, 2012].

Долгое время полярные озера из-за своего географического положения были слабо изучены и лишь в последние десятилетия развернулись активные научно-исследовательские работы по изучению озер. Палеоэкологическая оценка, а также сведения о современном состоянии данных водоемов позволяют выявить основные закономерности изменения природных условий водосборного бассейна озер на протяжении позднего плейстоцена и голоцена, оптимально использовать природные ресурсы и прогнозировать эволюцию озерных ландшафтов в условиях глобального антропогенного потепления климатов Севера [Пестрякова, 2008; Методические подходы..., 2011; Городничев и др., 2012; Спиридонова и др., 2012].

Целью исследования является изучение состава кладоцерного сообщества озер Красноярского края в бассейне р. Хатанги с применением палеоэкологических методов.

Для реконструкции климатических и экологических условий в палеоэкологии все чаще используются различные биоиндикаторы [Методические подходы..., 2011]. Ветвистоусые ракообразные, или кладоцеры, являются одной из самых многочисленных групп зоопланктона, населяющих современные пресноводные водоемы. Высокая скорость развития и смены генераций позволяет им очень быстро реагировать на изменения условий среды, вследствие чего кладоцеры широко используются в экологических исследованиях в качестве индикаторных организмов [Методические подходы..., 2011]. Хитиновые части экзоскелета Cladocera, которые имеют высокую степень сохранности в донных отложениях (карапаксы, постабдомены, постабдоменальные коготки, мандибулы, головные щиты и пр.), позволяют идентифицировать остатки до различных таксономических рангов [Korhola, Rautio, 2001].

В рамках российско-германской экспедиции «Хатанга-2011» летом 2011 г. были собраны поверхностные донные отложения, а также гидрохимические и морфометрические данные 20 озер бассейна р. Хатанги. Река Хатанга протекает по Северо-Сибирской низменности в юго-восточной части полуострова Таймыр в широкой долине, разбиваясь на рукава, и впадает в Хатангский залив моря Лаптевых. В бассейне реки находится около 112 тыс. озер общей площадью 11,6 тыс. км<sup>2</sup>. Климат

региона континентальный, с коротким летом со средней июльской температурой около 12,5 °С и суровой зимой со средней январской температурой ~31,5 °С. Годовые осадки низкие, около 250 мм, причем большинство осадков выпадает летом (с июня по сентябрь) [Grigoriev, Sokolov, 1994].

Обработка проб проводилась по стандартной методике, для идентификации остатков использовались специализированные определители [Szeroczyńska, Sarmaja-Korjonen, 2007; Методические подходы..., 2011; Korosi, Smol, 2012]. В лабораторных условиях навеску влажных осадков растворяли в 10 % КОН, нагревали до 75 °С в течение 30 минут, затем суспензию фильтровали через сито с размером ячеек 50 микрон. Отфильтрованную суспензию окрашивали раствором сафранина, добавляли несколько капель этанола в качестве антикоагулянта и фиксатора. Микроскопирование и определение субфоссильных остатков Cladocera проводилось с использованием светового микроскопа Axio Lab A1. Из каждой пробы было определено от 220 до 351 экземпляров Cladocera.

В составе субфоссильного кладоцерного сообщества обнаружено 20 таксонов, принадлежащих к 6 семействам. В большем количестве были представлены виды семейства Chydoridae. По нашим данным, сообщество ветвистоусых ракообразных поверхностных донных отложений озер бассейна р. Хатанги характеризовалось обилием в пробах видов: *Bosmina longispina*, *Chydorus sphaericus*, *Daphnia longispina*. Менее представлены такие виды, как: *Alona affinis*, *Alona guttata*, *Acroperus harpae*, *Bosmina longirostris*, *Daphnia pulex*, *Eurycercus* spp. Малочисленные остатки представителей *Alona rectangula*, *Alona quadrangularis*, *Alonopsis elongata*, *Bosmina coregoni*, *Camptocercus rectirostris*, *Eurycercus macracanthus*, *Ophryoxus gracilis*, *Sida crystallina* также формируют картину кладоцерного сообщества исследованных озер. По частоте встречаемости доминировали такие виды, как *Chydorus sphaericus*, *Alona guttata*, *Acroperus harpae*, *Bosmina longispina*, данные виды были встречены практически во всех пробах. Редкими видами стали: *Alona quadrangularis*, *Alonopsis elongata*, *Ophryoxus gracilis*, *Camptocercus fennicus*, *Camptocercus lilljeborgi*, *Eurycercus macracanthus*. В данных озерах преобладают виды, свойственные зонам палеарктики и голарктики. По биотипической принадлежности большинство ветвистоусых ракообразных в исследованных озерах принадлежали к числу литорально-пелагических видов.

Среднее значение индекса Шеннона составило 2,41, что характеризует исследованные воды как умеренно-загрязненные. Значения индекса Пиелу варьировали в пределах от 0,53 до 0,92, среднее значение индекса – 0,80,

что свидетельствует о приближенности к устойчивой и выровненной структуре сообщества. Также нами был рассчитан индекс видового разнообразия Симпсона, который варьировал в пределах от 0,53 до 0,85 (в среднем – 0,75), что говорит о равномерном распределении видов в озерах.

Исследование выполнено за счет средств субсидии, выделенной Казанскому федеральному университету для выполнения государственного задания в сфере научной деятельности и при финансовой поддержке РФФИ (проект № 15-05-04442).

### Литература

*Городничев Р. М., Колмогоров А. И., Пестрякова Л. А.* Современный российско-немецкий проект по изучению водоемов северных экосистем (на примере бассейна реки Хатанга) // Науки о Земле: устойчивое развитие территорий – теория и практика. Сб. материалов Междунар. науч.-практ. конф. Чебоксары: Чуваш. ун-т, 2012. С. 34–35.

*Методические подходы к использованию биологических индикаторов в палеоэкологии* / Под ред. Л. Б. Назаровой. Казань: Казан. ун-т, 2011. 280 с.

*Моисеенко Т. И., Даувальтер В. А., Родюшкин И. В.* Геохимическая миграция элементов в субарктическом водоеме на примере озера Имандра. Апатиты: КНЦ РАН, 1997. 127 с.

*Пестрякова Л. А.* Диатомовые комплексы озер Якутии. Якутск: ЯГУ, 2008. 177 с.

*Спиридонова И. М., Пестрякова Л. А., Цибульске Р., Херциу У.* Диатомовые водоросли биотопов полигональной тундры в бассейне реки Хатанга // Экологические проблемы северных регионов и пути их решения: Материалы Всерос. IV науч. конф. с междунар. участием. Апатиты: КНЦ РАН, 2012. Ч. 1. С. 122–126.

*Тетерюк Б. Ю.* Флора древних озер Европейского Севера-Востока России // Изв. Самарского научного центра Российской академии наук. 2012. Т. 14, № 1. С. 82–90.

*Grigoriev V. Y., Sokolov B. L.* Northern Hydrology in the Former Soviet Union (FSU) // Prowse T. D., Ommanney C. S. L., Watson L. E. (eds.). Northern Hydrology: International Perspectives. NHRI Science Report No. 3. National Hydrology Research Institute, Environment, Canada, Saskatoon, 1994. P. 147–179.

*Korhola A., Rautio M.* Cladocera and other branchiopod crustaceans // Smol J. P., Birks J. B., Last W. M. (eds). Tracking environmental change using lake sediments. Vol.: Zoological indicators. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 2001. P. 5–41.

*Korosi J. B., Smol J. P.* An illustrated guide to the identification of cladoceran subfossils from lake sediments in northeastern North America / The Chydoridae. Springer Science+Business Media B.V. 2012.

*Szeroczyńska K., Sarmaja-Korjonen K.* Atlas of Subfossil Cladocera from Central and Northern Europe. Friends of the Lower Vistula Society, 2007. 84 p.

## **ANALYSIS OF RECENT CLADOCERA (BRANCHIOPODA, CRUSTACEA) REMAINS FROM BOTTOM SEDIMENTS OF LAKES IN THE KHATANGA RIVER CATCHMENT**

**E. A. Zinnatova, L. A. Frolova**

*Kazan (Volga Region) Federal University, Kazan*

The study of lake sediments allows us to reconstruct the pattern of abiotic and biotic conditions in the lake and its environs. Of particular interest in studies of Arctic and Subarctic ecosystems are bottom sediments, because they are least exposed to human interference. Our research was conducted to study the composition of the cladoceran community of lakes in the Khatanga River catchment using paleoecological methods. It was found that Palaeartic and Holarctic species with littoral-pelagic distribution dominate in the lakes. The work uses indices that determine the degree of species richness, diversity and dominance of Cladocera communities. Statistical analysis was performed.

## **КОМПЛЕКСНЫЕ ГИДРОБИОЛОГИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ТРАНСГРАНИЧНЫХ РЕК СЕЛЕЗНЕВКИ И МАЛИНОВКИ**

**Ю. А. Зуев<sup>1</sup>, С. Ф. Титов<sup>1</sup>, Н. В. Зуева<sup>2</sup>**

*<sup>1</sup>Государственный научно-исследовательский институт озерного и речного рыбного хозяйства им. Л. С. Берга*

*<sup>2</sup>Российский государственный гидрометеорологический университет*

Исследованы распределение молоди лосося и кумжи и донные сообщества трансграничных рек Селезнёвки, Малиновки и их притоков. Все реки обладают кормовой базой, уровень которой достаточен для поддержания высокой плотности популяции лососевых рыб.

Объектами исследования были трансграничные реки Селезнёвка, Малиновка, с притоками. В качестве исходных данных используются материалы комплексных полевых работ, полученные в рамках русско-финской программы сотрудничества RIFCI «Реки и рыбные запасы – наши общие интересы» [Zuev, Mitskevich, 2014]. Целью данного совместного проекта было воссоздание нерестилищ и порогов для восстановления популяции лосося и кумжи. Для оценки величины кормовой базы рыб этих водотоков, с учетом последующего восстановления численности популяций лосося и кумжи, были проведены комплексные гидрохимические, гидробиологические, в том числе ихтиологические, исследования.

Отбор проб зообентоса и дрифта проводился в течение пяти сезонов с 26 мая 2011 г. по 11 октября 2012 г. на порожистых участках в реке

Селезневке (3 станции) и ее основных притоках – реках Бусловка (2 станции), Гусиная (1 станция) – и в реке Малиновке (3 станции) и ее основных притоках – реке Черной (1 станция) и ручье Кананоя (1 станция). Описание растительного покрова проводилось на р. Селезневке в июле 2016 г. на 3 станциях. Данные работы были поддержаны грантом РФФИ в рамках научного проекта № 16-35-00382 мол. а.

Весь бентос, отмеченный в р. Селезневке и ее притоках, принадлежит к категории кормового. Поэтому по составу дрефта бентоса беспозвоночных и непосредственно донных сообществ кормовая база на всех станциях, за исключением бентоса р. Гусиной, может быть оценена как «средне-» и «высококормная». Высокое видовое богатство и представленность различных групп бентоса на большинстве станций подтверждают высокую оценку кормовой базы для бассейна р. Селезневки (рис. 1).

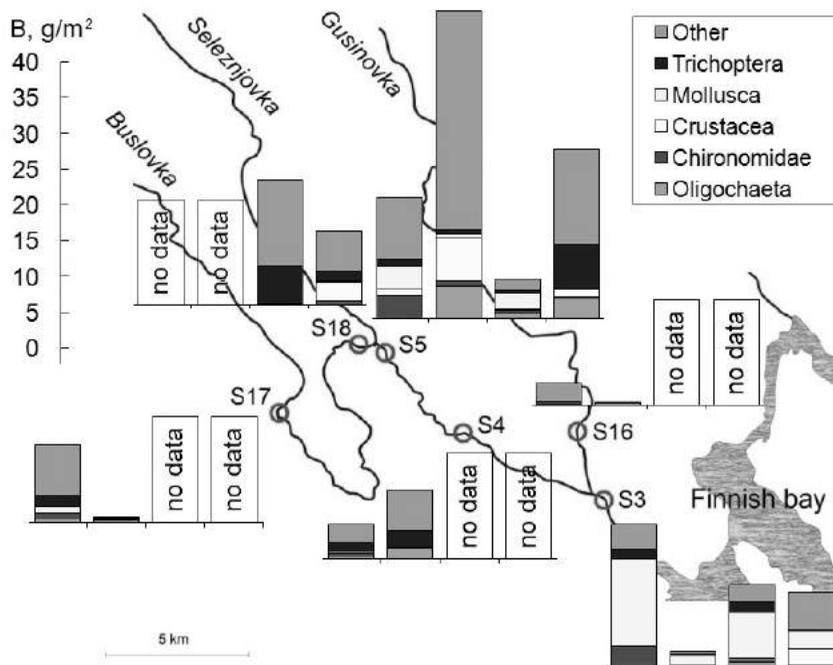


Рис. 1. Биомасса ( $B, g/m^2$ ) макрозообентоса на станциях в р. Селезневке и ее притоках в мае, сентябре 2011 г. и июне, октябре 2012 г. (слева направо)

Наибольшие показатели численности и биомассы бентоса наблюдались вдоль основного русла р. Малиновки, в притоках они значительно меньше (рис. 2). Несмотря на довольно низкие значения дрефта в р. Ма-

линовке, уровень запасов кормового бентоса выше среднего. Принимая во внимание высокое видовое богатство и участие в их создании различных групп бентоса, кормовую базу для рыб-бентофагов можно охарактеризовать как «среднекормную».

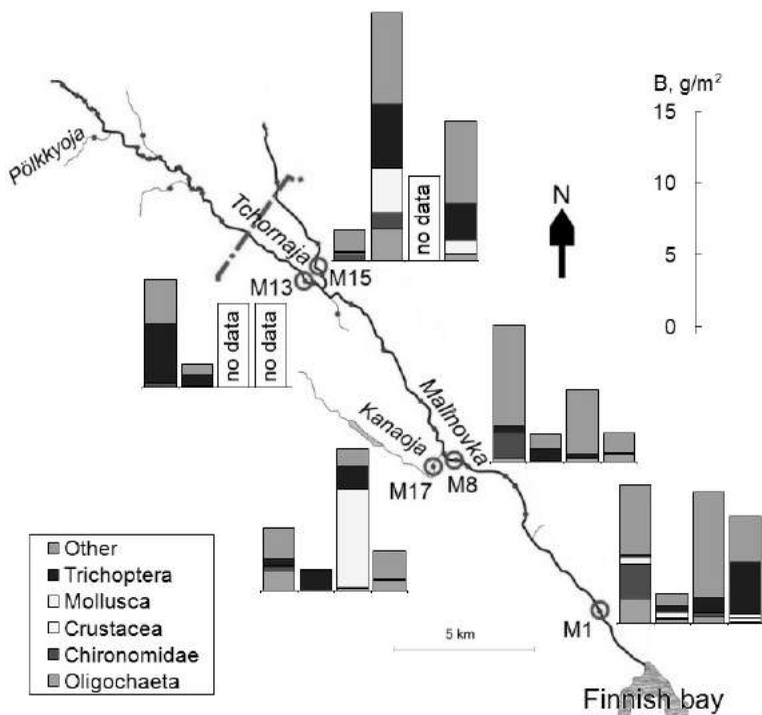


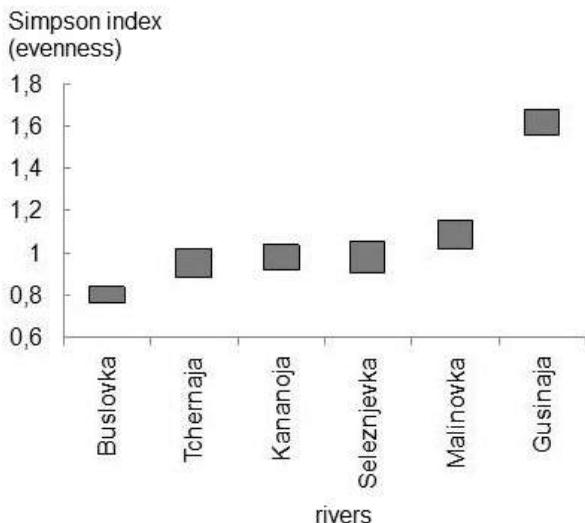
Рис. 2. Биомасса ( $B, g/m^2$ ) макрозообентоса на станциях в р. Малиновке и ее притоках в мае, сентябре 2011 г. и июне, октябре 2012 г. (слева направо)

Сотрудники лаборатории лососевых рыб ФГБНУ «ГосНИОРХ» совместно с финскими коллегами уже более десяти лет наблюдают распространение кумжи и лосося на порогах рек Малиновки, Селезневки, Гладышевки и их притоках. В настоящее время, несмотря на восстановление нерестилищ и выпуск молоди лосося на р. Буслровке, лосось и кумжа на реке пока не встречаются. Оценка запасов кормового бентоса на реке позволяет отнести водоток к «среднекормным» (рис. 2).

Полученные в рамках проекта данные о качестве воды не выявили значительного загрязнения воды в период исследований. Для р. Селезневки характерны превышения ПДК таких металлов, как железо, марганец и

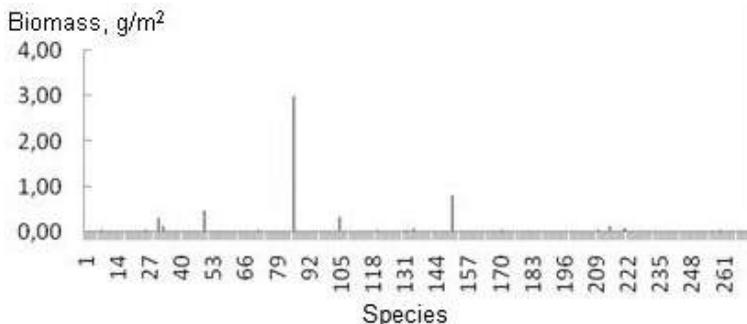
медь. Вероятно, это объясняется вымыванием большого количества органических кислот гумусового происхождения, а также железа и марганца из лесной подстилки. Поступление в водоток соединений меди мы связываем с сельскохозяйственным использованием земель водосбора Селезневки на территории Финляндии [Козлов и др., 2015]. В этом водотоке развиваются разнообразные растительные сообщества, в целом видовое богатство и разнообразие макрофитов велико.

Наиболее вероятной причиной отсутствия рыбы является лимитирование кормовой базой, ее размером, составом или доступностью для рыб. Хорошим показателем высокой ценности кормовой базы является выравненность сообществ. В сообществе с высокой выравненностью сезонное отсутствие нескольких видов или труднодоступность этих видов для рыбы не вызовет критического сокращения кормовой базы. Для оценки выравненности сообществ в реках использовался индекс Симпсона (рис. 3).



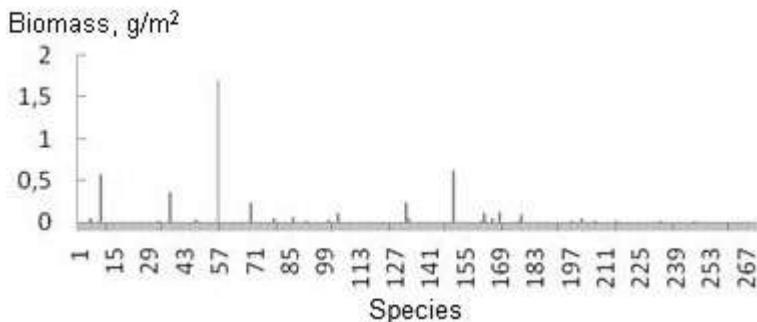
**Рис. 3.** Диапазон изменения коэффициента выравненности сообществ Симпсона, рассчитанного на основе биомассы кормового бентоса для исследованных водотоков

Наименьшее значение индекса выравненности отмечено в р. Бусловке. Практически вся биомасса бентоса в этом водотоке приходится на один вид – поденку *Heptagenia flava* (рис. 4). Оценить доступность этого вида для рыб достаточно сложно. Однако тот факт, что вся биомасса приходится практически на один вид, может означать, что вид недоступен для поедания в силу его особенностей распространения в русле или имеет строгую сезонность развития и не встречается в местах нагула рыб в другие сезоны.



**Рис. 4. Распределение биомассы кормового бентоса в р. Бусловке**

Ручей Кананоя, также имеющий невысокий уровень индекса выравниваемости (рис. 4), принципиально отличается по характеру распределения кормового бентоса: пусть невысокая в целом суммарная биомасса значительно равномернее распределена между несколькими видами донных беспозвоночных (рис. 5). Результаты обловов подтверждают наличие в ручье небольшого (из-за бедной кормовой базы) количества кумжи.



**Рис. 5. Распределение биомассы кормового бентоса в ручье Кананоя**

По составу сообществ с помощью кластеризации с высокой долей достоверности выделились сообщества бассейна р. Малиновки, сообщества р. Селезневки и некоторые другие станции. В силу подвижности многих видов и значительного биотопического разнообразия в районах исследования на группировку не оказали влияния характер грунта на станции, характер течения и наличие водной растительности.

В группу I вошли станции, расположенные в прозрачных и холодных водотоках: ручье Кананоя и р. Черной, а также в нижнем течении р. Малиновки. В группу II вошли станции на реках Селезневка и Бусловка у

впадения в р. Селезневку (находящиеся под влиянием донных сообществ р. Селезневки) и станция в верхней части р. Малиновки, где не отмечены лосось и кумжа, а вода характеризуется более высокой мутностью.

В группе I (р. Малиновка) в составе сообществ характерны реофильные и олигосапробные организмы, а в группе II появляются черты мезосапробности, что согласуется с информацией о некоторой антропогенной нагрузке на р. Селезневку. Река Бусловка на достоверном уровне по составу донных сообществ выделяется в отдельную группу. Здесь также присутствуют мезосапробные организмы. Возможно, это связано с антропогенной нагрузкой на реки Селезневка и Бусловка на территории Финляндии.

### Литература

Козлов Е. Э., Зуева Н. В., Зуев Ю. А. Качество вод ряда малых лососевых рек бассейна Финского залива // Водные биоресурсы, аквакультура и экология водоемов: Тр. III балтийского морского форума. 2015. С. 165–166.

Zuyev Y., Mitskevich O. Complex hydrobiological study of transboundary rivers Gladyshevka, Malinovka and Selesnevka 2011–2013. 2014. 37 p.

## INTEGRATED HYDROBIOLOGICAL STUDY OF TRANSBOUNDARY RIVERS SELEZNEVKA AND MALINOVKA

Yu. A. Zuyev<sup>1</sup>, S. F. Titov<sup>1</sup>, N. V. Zuyeva<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*Berg State Research Institute on Lake and River Fisheries*

<sup>2</sup>*Russian State Hydrometeorological University*

The distribution of juvenile salmon and trout and benthic communities of transboundary rivers Seleznevka (Rakkonlanjoki) and Malinovka (Mustajoki) and their tributaries were studied. All the rivers have the forage resources sufficient for maintaining a high population density of salmonids.

## МОЛЛЮСКИ ПРЕСНЫХ ОЗЕР ПАМИРА, ИХ РАСПРОСТРАНЕНИЕ, ВОПРОСЫ ПРОИСХОЖДЕНИЯ И ЗООГЕОГРАФИЧЕСКИЕ СВЯЗИ ДАННОЙ ФАУНЫ

З. И. Иззатуллаев

*Самаркандский государственный университет,*

*г. Самарканд, Узбекистан*

В статье впервые приведены материалы по составу, численности, экологическим комплексам, распространению, происхождению и зоогеографическим связям моллюсков пресных озер Памира. Здесь установлено обитание 36 видов моллюсков, относящихся к 8 семействам и 10 родам. Среди них брюхоногих

(Gastropoda) – 22, двустворчатых (Bivalvia) – 14 видов. Озера различаются и по экологическим комплексам моллюсков. В этом отношении самым богатым фитофилами является оз. Яшилькуль, бедным – оз. Турумтайкуль. Причиной этого является заселенность первого большим числом водных растений.

Памир – одно из высочайших нагорий мира – большей частью находится в пределах Республики Таджикистан. По рельефу, климату, почвам, растительному и животному миру Памир принято делить на Западный (Бадахшан) и Восточный (собственно Памир).

В целом до наших исследований из Памира было известно 11 видов пресноводных моллюсков [Лидгольм, 1931; Старобогатов, 1932; Янковская, 1965]: *Lymnaea stagnalis* (L.), *L. auricularia* (L.), *L. lagotis* Schr., *L. bactriana* Hutton, *L. tenera* Kuster, *Pyrgobaicalia aenigma* Star., *Valvata pamirensis* Star., *Anisus convexiusculus* (Hutton), *A. ladacensis* Nevill, *Armiger annandalei* (Germ.), *Melanoides pomirensis* Lindholm.

В течение ряда лет (1971, 1974, 1976, 1984) собирался малакологический материал из различных озер Восточного Памира, которые различаются по величине, происхождению, количеству растворенных в воде солей, режиму и другим характеристикам.

Нами подробно изучена фауна моллюсков следующих крупных озер Восточного Памира: Булункуль, Яшилькуль, Ранкуль, Турумтайкуль, Зоркуль. Кроме того, были определены сборы моллюсков сотрудников Института зоологии и паразитологии АН Республики Таджикистан (в котором более 25 лет проработал автор этих строк) Ф. А. Ахророва, А. Г. Гафурова, И. Эргашбоева, М. Эгамова, Л. А. Наливаевой из небольших озер Сулукты-сай, Дракон, Аждаркуль, Дункульдук, Кичиккуль за 1963–2003 гг. Всего обработано более 300 проб моллюсков. Следует отметить, что особенно ценными оказались сборы гидробиолога Ф. А. Ахророва за 1963–1964, 1971–1977, 2002–2003 гг. В итоге обработки этого материала к настоящему времени в пресных озерах Памира (за исключением Сарезского озера на Западном Памире, где моллюски не обнаружены) установлено обитание 36 видов моллюсков, относящихся к 8 семействам из 10 родов. Среди них брюхоногих (Gastropoda) 22 вида из 4 семейств и 5 родов; двустворчатых (Bivalvia) – 14 видов из 3 семейств и 4 родов.

Как видно из табл., фауна моллюсков озер различаются как по числу видов, так и по их составу. Среди этих озер моллюсками богаты озера Яшилькуль (21 видов), Зоркуль (17), Булункуль (13), а в оз. Турумтайкуль обитают всего 4 вида моллюсков. Богатство видами моллюсков этих озер определяется наличием в них большого числа биотопов и сильным развитием ила, песка и растений, а между тем в оз. Турумтайкуль растительность скудная, дно каменисто-илистое и озеро расположено значительно выше других.

**Распределение моллюсков и их экологических комплексов по крупным пресным озерам Памира (высота над уровнем моря)**

№	Видовой состав моллюсков	Булун-куль (3757)	Яшиль-куль (3734)	Ранг-куль (3780)	Зор-куль (4126)	Турум-тайкуль (4265)	Экологические комплексы
1	Кл. Gastropoda Подкл. Pectinibranchia Сем-во Valvatidae <i>Cincinna pamirensis</i>		+				Фитофил
2	Подкл. Pulmonata Сем-во Lymnaeidae <i>Lymnaea stagnalis</i>	+					Фитофил
3	<i>L. psilia</i>	+	+				Фитофил
4	<i>L. auricularia</i>	+	+			+	Фитофил, эврибионт
5	<i>L. siriculensis</i>				+		Пелолимнофил
6	<i>L. solidissima</i>		+		+		Пелофил
7	<i>L. narzykulovi</i>	+	+		+	+	Пелолимнофил
8	<i>L. tumida</i>					+	Фитофил
9	<i>L. subdisjuncta</i>		+				Пелофил
10	<i>L. tenera</i>		+		+		Фитофил
11	<i>L. bactriana</i>	+	+				Фитофил, тельматофил, эврибионт
12	<i>L. lagotis</i>		+		+		Фитофил
13	<i>L. fontinalis</i>	+	+				Фитофил, тельматофил, кремнофил, эврибионт
14	Сем-во Physidae <i>Costatella acuta</i>	+	+	+		+	Фитофил
15	Сем-во Planorbidae <i>Planorbis planorbis</i>	+	+	+	+		Фитофил
16	<i>Anisus acronicus</i>		+				Фитофил
17	<i>A. albus</i>	+	+				Фитофил
18	<i>A. convexiusculus</i>	+	+				Фитофил
19	<i>A. ladacensis</i>		+	+			Фитофил
20	<i>A. pancongensis</i>		+	+			Фитофил
21	<i>A. centralis</i>	+	+	+			Пелолимнофил
22	<i>Armiger annandalei</i>	+	+				Фитофил
23	Кл. Bivalvia Сем-во Sphaeriidae <i>Sphaerium corneum</i>		+				Пелолимнофил
24	<i>Musculium creplini</i>	+					Пелолимнофил
25	Сем-во Euglesidae <i>Euglesa conica</i>				+		Пелопсам- молимнофил
26	<i>E. curta</i>				+		Пелопсам- молимнофил

**Окончание табл.**

№	Видовой состав моллюсков	Булункуль (3757)	Яшилькуль (3734)	Рангкуль (3780)	Зоркуль (4126)	Турумтайкуль (4265)	Экологические комплексы
27	<i>E. nitida</i>			+			Пелолимнофил
28	<i>E. mitchelli</i>			+	+		Пелопсам-малимнофил
29	<i>E. gurvichi</i>			+	+		Пелопсам-малимнофил
30	<i>E. heldreichi</i>				+		Пелофил
31	<i>E. borealis</i>				+		Пелопсаммофил
32	<i>E. jondoniana</i>				+		Пелопсам-молимнофил
33	<i>E. rugmayeri</i>		+		+		Пелопсам-молимнофил
34	Сем-во Pisididae <i>Odhneripisidium stewarti</i>				+		Пелопсам-молимнофил
35	<i>O. prashadi</i>		+	+	+		Пелолимнофил
36	<i>O. kungejense</i>				+		Пелолимнофил
	Всего	13	21	9	17	4	

Моллюски этих озер различаются не только по видовому составу, но и по численности. В оз. Булункуль *L. psilia* достигает численности 20–30 экз./м<sup>2</sup>, *L. auricularia* – 18–20 экз./м<sup>2</sup>, а остальные виды малочисленны, они же достигают заметной численности и в оз. Яшилькуль. Эти моллюски играют определенную роль в питании эндемичной рыбы Памира лжеосмана [Иззатуллаев, 1981а]. В оз. Рангкуль обитают только мелкие двустворчатые моллюски из родов *Euglesa* и *Odhneripisidium*. Здесь совершенно отсутствуют лимнеиды. В оз. Зоркуль кроме мелких двустворчатых моллюсков обитают и прудовики. Среди них *L. siriculensis* описан из этого озера. Наличие прудовиков в данном озере говорит, по-видимому, о его тесной связи с рекой. И, наконец, в оз. Турумтайкуль многочисленными являются *L. narzykulovi*, *L. tumida* (100–150 экз./м<sup>2</sup>) и *O. prashadi* (90–100 экз./м<sup>2</sup>), которые, как и в оз. Яшилькуль, служат пищей лжеосману, составляющему 30 % от всех обитающих в озере рыб [Иззатуллаев, 1981а]. Озера населены следующими экологическими комплексами моллюсков [Иззатуллаев, 1981б]: фитофилами, обитателями растений, – 17 видов (3 из них термофилы и креофилы, эврибионты); пелолимнофилами, живущими в илу, – 8; пелопсаммолимнофилами, обитающими в илисто-песчаных грунтах, – 7 и пелофилами, населяющими ил, – 3 вида. Среди фитофилов по числу видов преобладают представители семейств Lymnaeidae и Planorbidae – по 8 видов. Далее идут пелопсаммолимнофилы из семейства Euglesidae рода *Euglesa* – 8 видов, из пелофилов – семейство Sphaeriidae из родов *Sphaerium* и *Musculium* по 1 виду, из семейства Pisididae – 2 вида из рода *Odhneripisidium*.

Исследованные озера различаются и по происхождению [Ахроров, 2006]: Турумтайкуль и Рангкуль – тектонические, Зоркуль и Булунккуль – ледниковые, оз. Яшилкуль – завальное (молодое). Это обстоятельство, конечно, повлияло на численность моллюсков, обитающих в них.

Обсуждая историю происхождения Памира, в целом следует отметить, что он сформировался в раннем плейстоцене [Белоусов, 1976], в кайнозое Памир превратился в высокогорную страну. Современный облик Памира существует 25–30 млн лет, т. е. в течение неогенового и четвертичного периода [Бабаев, 1982].

Изучение генезиса гидрофауны Памира [Ахроров, 2006], в том числе и моллюсков, показало, что фауна горных водоемов является самобытной плейстоценовой и постплейстоценовой, предки моллюсков обитали в пресных и солоноватых водоемах региона до процесса оледенения и горообразования.

Зоогеографически фауна моллюсков Памира относится к Памирской провинции [Иззатуллаев, Старобогатов, 1985; Иззатуллаев, 1987]. Это провинция включает водоемы Западного Памира (Бадахшан), Центральный Памир, а также высокогорную часть бассейна Сырдарьи (водоемы южного хребта Терсей-Алатау, верховья рек Нарына, Карадарьи и др.). Для провинции эндемичны *Cincinna gafurovi*, *C. pamirensis*, *Pyrgabaicalia aenigma*, *Odhneripisidium gafurovi*. На Памире имеются памиро-тибетские виды: *Melanoides pamirens*, *Odhneripisidium stewarti*, *Euglesa mitchelli* и *E. rugmayeri*. Первый из них заходит и в Тибетскую провинцию, второй, кроме того, распространен в Ферганской и Согдийской провинциях, в последнюю они проникают до юго-запада средней части бассейна Амударьи, а *Anisus ladacensis* даже расселился по всей Средней Азии.

Другой отличительной особенностью малакофауны Памирской провинции является то, что здесь отсутствуют тибетские виды: *Anisus barakparensis* (Cless.) и *A. nanus* (Benson) – и сино-индийский – *Lymnaea rufescens* Lamarck [Старобогатов, 1970].

В итоге Памир относится к следующему зоогеографическому району: Палеарктическая область, Европейско-Центральноазиатская подобласть, Согдийско-Тибетская надпровинция, Памирская провинция.

### Литература

Ахроров А. Донная фауна и биопродуктивность водоемов Памира. Душанбе: Дониш, 2006. 283 с.

Бабаев А. М. Тектоника и сейсмичность // Таджикистан: (природа и природные ресурсы). Душанбе: Дониш, 1982. С. 98–108.

Белоусов Т. П. Тектонические движения Памира в плейстоцене, голоцене и сейсмичность. М.: Наука, 1976. 119 с.

*Иззатуллаев З.* Некоторые данные о роли пресноводных моллюсков в питании рыб Таджикистана // Биологические основы рыбного хозяйства водоемов Средней Азии и Казахстана. Фрунзе: Илим, 1981а. С. 280–283.

*Иззатуллаев З.* К изучению экологических группировок пресноводных моллюсков Восточного Памира // Круговорот вещества и энергии в водоемах. Вып. 2. Иркутск, 1981б. С. 135–136.

*Иззатуллаев З.* Водные моллюски Средней Азии и сопредельных территорий: Автореф. дис. ... докт. биол. наук. Л.: ЗИН АН СССР, 1987. 45 с.

*Иззатуллаев З., Старобогатов Я. И.* Зоогеографическая характеристика пресноводных моллюсков Центральной Азии и вопрос о существовании Нагорноазиатской подобласти Палеарктики // Зоол. журн. 1985. Т. 64, вып. 4. С. 506–517.

*Линдгольм В. А.* Mollusca // Тр. экспедиции: Памирская экспедиция. 1928. Л.: АН СССР, 1931. Вып. 8. С. 29–64.

*Старобогатов Я. И.* Фауна моллюсков и зоогеографическое районирование континентальных водоемов земного шара. Л.: Наука, 1970. 322 с.

*Старобогатов Я. И.* Новые виды брюхоногих моллюсков из источников и подземных вод Средней Азии // Тр. Зоол. ин-та АН СССР. 1932. Т. 51. С. 165–172.

*Янковская А. И.* Фауна теплых родников Восточного Памира // Тр. Зоол. ин-та АН СССР. 1965. Т. 35. С. 43–56.

## **MOLLUSKS OF PAMIR FRESHWATER LAKES, THEIR DISTRIBUTION, ORIGIN AND ZOOGEOGRAPHICAL LINKAGES**

**Z. I. Izzatullayev**

*Samarkand State University, Samarkand, Republic of Uzbekistan*

Materials on the composition, abundance, ecological complexes, distribution, origin and zoogeographical connections of mollusks in freshwater lakes of the Pamir reported for the first time. The lakes are home to 36 species of mollusks belonging to 8 families and 10 genera. There are 22 species of Gastropoda and 14 species of Bivalvia. The lakes also differ in the ecological complexes of mollusks. In this respect, the richest in phytophiles is Lake Yashilkul, and the poorest is Lake Turumtaikul. The reason for this is that the former has a substantial population of aquatic plants.

## **РЫБОХОЗЯЙСТВЕННОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МАЛЫХ ВОДОЕМОВ КАРЕЛИИ (НА ПРИМЕРЕ УРОЗЕРА)**

**Н. В. Ильмаст, О. П. Стерлигова, Я. А. Кучко**

*Институт биологии КарНЦ РАН*

В работе приводятся данные о количественном развитии фито-, зоопланктона, макрозообентоса оз. Урозера (южная Карелия). Показано, что по гидробиологическим показателям водоем относится к олиготрофному типу. Ихтиофауна пред-

ставлена 7 видами. В результате рыбоводных работ в озере успешно натурализовалась европейская ряпушка. В настоящее время водоем используется в рекреационных целях.

Площадь водных объектов Республики Карелия достигает 21 % ее территории и включает более 61 тыс. озер [Гашева, 1967; Каталог..., 2001]. Для внутренних водоемов региона характерна сравнительно высокая встречаемость ценных видов рыб [Стерлигова и др., 2016]. Однако во многих озерах они или отсутствуют, или крайне немногочисленны. Особенно неблагоприятный для рыбного хозяйства состав ихтиофауны свойствен малым и многим средним озерам Карелии. С целью повышения рыбопромысловой продуктивности водных экосистем и улучшения качественного состава ихтиофауны в республике в разные годы проводились работы по интродукции ценных видов рыб. Рыбоводные работы осуществляли по двум направлениям: расселение местных, ценных видов рыб и интродукция новых видов из других регионов страны [Кудерский, Сонин, 1968; Стерлигова, Ильмаст, 2009]. Анализ результатов рыбоводных работ показал, что расселение аборигенных видов в условиях Карелии оказалось более эффективным. Виды, интродуцированные из отдаленных регионов, за исключением горбуши, в водоемах вселения отмечаются редко [Стерлигова, Ильмаст, 2009; Ильмаст, 2012].

Урозеро расположено в южной части Карелии, относится к бассейну р. Шуи и входит в систему Кончезерских озер. Площадь водной поверхности озера составляет 13,4 км<sup>2</sup>, наибольшая длина 7 км, наибольшая ширина 3,3 км (табл.). Озеро сравнительно глубокое, с максимальной глубиной 35 м, средней – 12 м. Глубины от 0 до 5 м составляют 30,6 %, от 5 до 10 м – 26,1 %, свыше 10 м – 43,3 % [Гордеев, 1959; Озера Карелии, 2013].

Вода озера обладает низкой цветностью 3–4°, перманганатная окисляемость – 1,8–2,7 мг О/л, активная реакция воды – 7,0. Прозрачность воды в озере в начале XX в. составляла 15 м [Гордеев, 1959], в настоящее время – 8,5 м. В водоеме отмечено низкое содержание общего фосфора и азота, и по этим показателям оно принадлежит к олиготрофному типу [Китаев, 2007].

По результатам исследований (2007–2009 гг.) в составе фитопланктона Урозера отмечены синезеленые, золотистые, диатомовые и пирофитовые водоросли с преобладанием диатомовых. Среди синезеленых доминировала *Anabaena lemmermanii* Вору, среди золотистых *Dinobryon bavaricum* Ehr. и *Mallomonas tonsurata* Perty, у диатомовых преобладали *Aulacosira italica* var. *tenuissima* (Grin.) и *Stephanodiscus agassizensis* (Ehr.). Пирофитовые водоросли были представлены *Glenodinium quadridens*. Основу численности составляли синезеленые водоросли –

80 тыс. кл/л, биомассы – диатомовые – 0,07 (г/м<sup>3</sup>). Уровень количественного развития фитопланктона низкий. Средняя численность достигала 119 тыс. кл/л, биомасса – 0,11 г/м<sup>3</sup>. Индекс сапробности, рассчитанный по численности индикаторных видов, составил 1,92 и укладывается в границы бета-мезо-сапробной зоны, что характеризует качество воды как удовлетворительное.

### Основные лимнологические показатели Урозера

Показатель	Величина
Географические координаты	61°56' с. ш.; 34°06' в. д.
Высота над уровнем моря, м	42,6
Площадь водной поверхности, км <sup>2</sup>	13,4
Максимальная глубина, м	35,0
Средняя глубина, м	12,0
Цветность, град.	3,0–4,0
Прозрачность, м	8,5
pH	7,0
Перманганатная окисляемость, мг O <sub>2</sub> /л	1,8–2,7
Содержание O <sub>2</sub> , % насыщения, поверхность	97–105
Биомасса фитопланктона, г/м <sup>3</sup>	0,11
Биомасса зоопланктона, г/м <sup>3</sup>	0,48
Биомасса бентоса, г/м <sup>2</sup>	2,6
Количество видов рыб	7

В составе зоопланктона выявлено 32 вида ракообразных и коловраток. С учетом более ранних исследований видовой список расширился до 36. Из них Rotifera – 16 видов, Cladocera – 10 и Copepoda – 10. Видовое разнообразие планктонной фауны Урозера достигается за счет примерно равного соотношения (по числу видов) представителей трех основных групп, что не характерно для большинства водоемов Карелии. Основа биомассы (74 % в среднем за вегетационный период) создается ветвистосыми ракообразными, главным образом видами рр. *Bosmina* и *Daphnia*. Индекс видового разнообразия Шеннона – Уивера, рассчитанный по численности, колеблется в пределах 1,75 (июнь) – 2,05 (октябрь). Величина индекса сапробности по Пантле и Букк изменялась от 1,20 (июнь) до 1,36 (октябрь), что соответствует олигосапробному классу водных объектов. Средняя летняя биомасса зоопланктона составила 0,48 г/м<sup>3</sup> при численности 14,6 тыс. экз./м<sup>3</sup>.

Донная фауна озера была представлена 10 таксономическими группами. Преобладающими организмами по численности и по величине биомассы макрозообентоса являются реликтовые ракообразные *Monoporeia affinis* Lind. и хирономиды. Биомасса зообентоса в осенний период в озере составила 2,64 г/м<sup>2</sup> при средней численности 1335 экз./м<sup>2</sup>.

Ихтиофауна озера состоит из 7 видов: ряпушка (*Coregonus albula*), окунь (*Perca fluviatilis*), ерш (*Gymnocephalus cernuus*), щука (*Esox lucius*), налим (*Lota lota*), уклейка (*Alburnus alburnus*), бычок-подкаменщик (*Cottus gobio*). Наиболее многочисленными видами являются окунь и ряпушка. На водоеме в разные годы проводились рыбоводные работы по вселению ценных видов рыб.

По данным Карелрыбвода в озеро было выпущено 1 млн штук икры и личинок сига (1950 г.) и 11,5 млн штук личинок ряпушки (1973, 1982, 1986, 1987 гг.). Сиг в настоящее время в озере не выявлен. Положительный эффект получен от интродукции в водоем ряпушки. Анализ ее биологических показателей свидетельствует о том, что в Урозере обитает крупная форма европейской ряпушки (рис. 1). Ряпушка Онежского озера является типичным планктофагом, в Урозере в ее питании преобладают бентосные организмы, и темп роста выше.

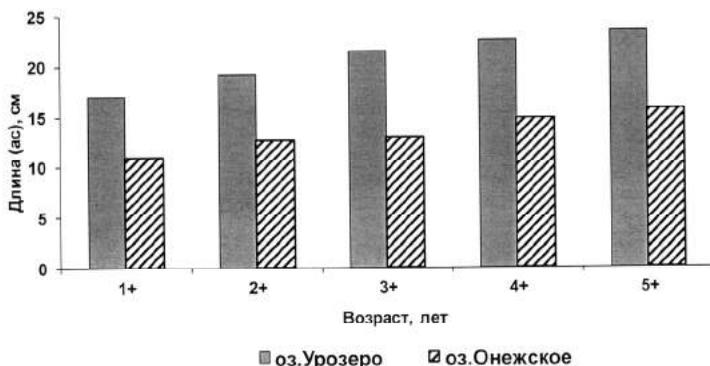
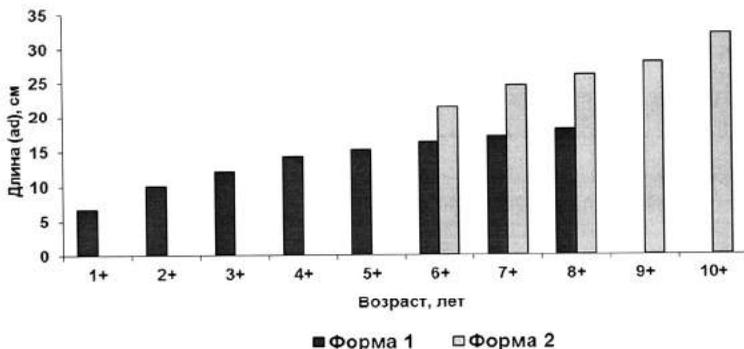


Рис. 1. Линейный рост ряпушки Урозера и Онежского озера

Массовым видом является окунь, который представлен медленно- и быстрорастущими формами (рис. 2). Окуня с быстрым темпом роста было выловлено 14 экземпляров в возрасте от 6+ до 10+. В его питании преобладала ряпушка, тогда как у мелкой формы окуня доминировали бентосные организмы. Ранее две формы окуня были отмечены для Угличского водохранилища [Макарова, 1975].

Таким образом, анализ данных показал, что Урозеро по уровню количественного развития планктона и бентоса относится к олиготрофному типу. Анализ рыбоводных работ свидетельствует о том, что положительный результат получен при интродукции в водоем европейской ряпушки, которая натурализовалась и достигла промысловой численности. В настоящее время водоем активно используется в рекреационных целях, развито любительское рыболовство.



**Рис. 2. Линейный рост окуня оз. Урозеро:**

форма 1 – медленнорастущая; форма 2 – быстрорастущая

Финансовое обеспечение исследований осуществлялось из средств федерального бюджета на выполнение государственного задания № 0221-2014-0038, программы Президиума РАН № 21 «Биоразнообразие природных систем. Биологические ресурсы России: оценка состояния и фундаментальные основы мониторинга» (проект № 0221-2015-0003).

### Литература

Гашева В. Ф. Некоторые особенности гидрографии КАССР // Сб. работ Ленинградской гидрометеорологической станции. 1967. Вып. 4. С. 103–114.

Гордеев О. Н. Озеро Урозеро // Озера Карелии: природа, рыбы и рыбное хозяйство. Петрозаводск: Гос. изд-во Карельской АССР, 1959. С. 276–278.

Ильмаст Н. В. Рыбное население пресноводных экосистем Карелии в условиях их хозяйственного освоения: Автореф. дис. ... докт. биол. наук. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2012. 44 с.

Каталог озер и рек Карелии / Под ред. Н. Н. Филатова и А. В. Литвиненко. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2001. 290 с.

Китаев С. П. Основы общей лимнологии для гидробиологов и ихтиологов. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2007. 395 с.

Кудерский Л. А., Сонин В. П. Обогащение ихтиофауны внутренних водоемов Карелии // Тр. НИИ озер. и реч. рыб. хоз-ва. 1968. Т. 5, вып. 1. С. 310–314.

Макарова Н. П. Различия биологических показателей половозрелых и неполовозрелых самок окуня *Perca fluviatilis* L. Угличского водохранилища // Вопросы ихтиологии. 1975. Т. 15, № 2. С. 365–368.

Озера Карелии. Справочник / Под редакцией Н. Н. Филатова, В. И. Кухарева. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2013. 464 с.

Стерлигова О. П., Ильмаст Н. В. Виды-вселенцы в водных экосистемах Карелии // Вопросы ихтиологии. 2009. Т. 49, № 3. С. 372–379.

Стерлигова О. П., Ильмаст Н. В., Савосин Д. С. Круглоротые и рыбы пресных вод Карелии. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2016. 224 с.

## THE USE OF KARELIA'S SMALL WATER BODIES FOR FISH FARMING (EXEMPLIFIED BY LAKE UROZERO)

N. V. Imast, O. P. Sterligova, Ya. A. Kuchko

*Institute of Biology, KarRC RAS*

Data on the quantitative development of phyto- and zooplankton and macrozoobenthos in Lake Urozero, southern Karelia, are reported. The hydrobiological indices of Lake Urozero show that it is an oligotrophic water body. Its fish population consists of 7 species. As a result of fish farming activities, European vendace has become successfully naturalized in the lake. Lake Urozero is currently used for recreation.

## ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ МИКОПЛАНКТОНА ЛАДОЖСКОГО ОЗЕРА

И. В. Иофина

*Институт озераедения РАН*

Водные грибы, как и бактерии, осуществляют разложение органических веществ, способствуя их минерализации. Уровень заспоренности воды пропагулами микопланктона (грибные зародыши гиф и споры различных типов) является показателем трофии водоема. В условиях антропогенного воздействия на озеро они могут быть использованы в качестве индикаторов степени загрязнения водоема.

Все водные грибы являются гетеротрофными организмами. Они участвуют в минерализации органических субстратов, а уровень заспоренности воды их пропагулами (грибные зародыши гиф и споры различных типов) является показателем трофии водоема. В условиях антропогенного воздействия на водоем они могут быть использованы в качестве индикаторов степени загрязнения водоема. Их интенсивное развитие характерно для водоемов, подвергающихся антропогенному эвтрофированию. Микопланктон может влиять на активность и развитие других гидробионтов. Пути воздействия могут быть различными – от прямого паразитирования до опосредованного влияния путем выделения биологически активных метаболитов [Терехова, 1995]. Массовое развитие микопланктона в Ладожском озере было связано с возникновением дефицита биологически доступного (минерального) фосфора в экосистемных круговоротах в результате интенсивного потребления его водорослями и, в еще большем количестве, бактериопланктоном в ходе антропогенного эвтрофирования озера.

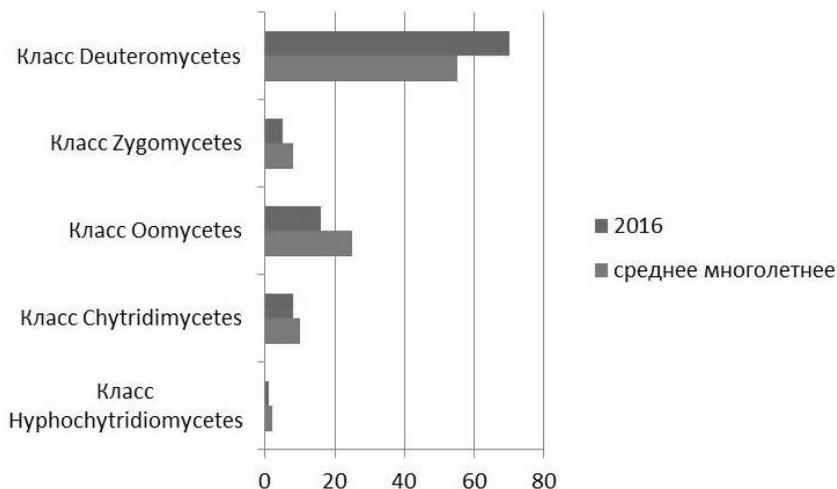
Задачей исследования, помимо выявления видового состава, распространения микофлоры Ладожского озера был анализ индикаторных возможностей микобиоты.

Пробы воды отбирались с поверхности, десяти метров и у дна. Определялся видовой состав и общая численность микопланктона. Для выделения водных грибов был использован метод глубинного посева воды. Объем пробы в опытах был 5 мл, использовалась агаризованная питательная среда – сусло-агар. С целью задержки роста бактерий к среде добавляли смесь антибиотиков. Опыты проводились в чашках Петри. Засеянные чашки Петри инкубировались в течение недели при температуре 18–24 °С, выросшие колонии подсчитывали, а представителей отличающихся колоний отсеивали в пробирки со скошенным агаром того же состава [Литвинов, Дудка, 1977]. Видовое определение культур осуществлялось согласно требованиям определителей [Lodder, 1970; Пидопличко, Милько, 1975].

Многолетний анализ микофлоры показал, что состав водных грибов представлен 5 классами: *Hyphochytridiomycetes*, *Chytridiosomycetes*; *Oomycetes*, *Zigomycetes*, *Deuteromycetes* в соответствии с рис. 1. Доминируют виды таксономических групп оомицетов, зигомицетов и несовершенных грибов. Из класса *Oomycetes* наиболее распространенными являются *Saprolegnia ferax* (Gruith) и *Lactomytus lacteus* Ag. Из класса *Zigomycetes* периодически отмечалась высокая встречаемость грибов из рода *Mucor*; представители остальных родов встречались редко. Класс *Deuteromycetes* широко представлен родами *Penicillium*, *Trichoderma*, *Candida* и *Rhodotorula*. Отмечается изменение качественного состава микопланктона в сторону увеличения численности дрожжевых грибов, которые образуют, в последние годы, доминирующий комплекс, вытеснив виды других таксономических групп. При антропогенном воздействии отмечается повышение популяции дрожжевых клеток [Солнцева, 1988]. Видовой состав в исследованные периоды был идентичен.

Анализ частоты встречаемости микопланктона показал, что выделенные виды можно условно разделить на три группы: постоянные, периодические и редкие виды [Семенова, 1994]. Группа постоянных обитателей представлена видами, чье развитие было стабильным на протяжении многолетних наблюдений, колебалась лишь численность того или иного вида (родов *Mucor*, *Trichoderma*, *Penicillium*). Вторая группа – виды, встречающиеся периодически по всей акватории или в отдельных районах озера. К этой группе относятся виды родов *Achlya*, *Chytridium*, *Aspergillus*.

Третья группа – виды, встречающиеся эпизодически и имеющие очень низкую численность. Это представители родов *Fusidium*, *Rhizophidium*, *Woronina* и др. Они не могут оказывать существенного влияния на различные процессы, происходящие в озере. Таким образом, первые две группы составляют стабильный комплекс мицелиальных грибов, участвующий в деструкционных процессах.

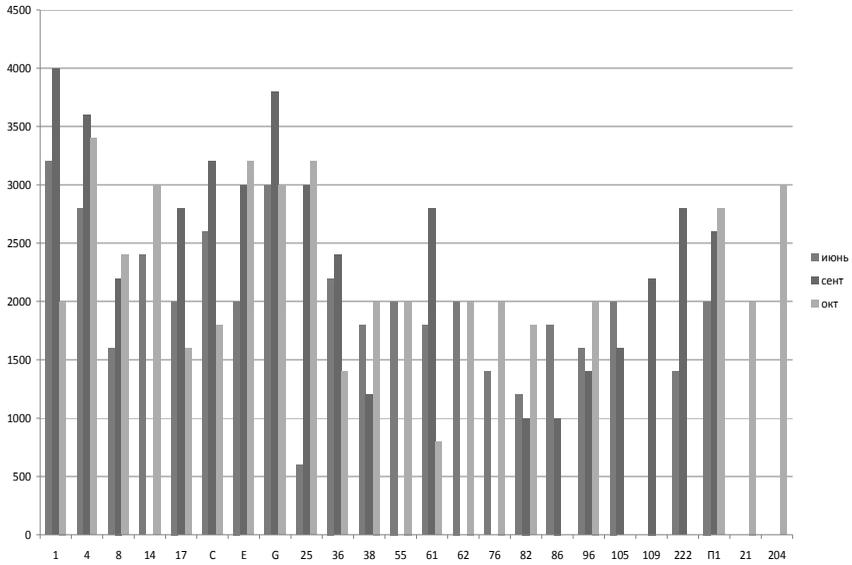


**Рис. 1. Встречаемость таксономических групп водных грибов в Ладожском озере**

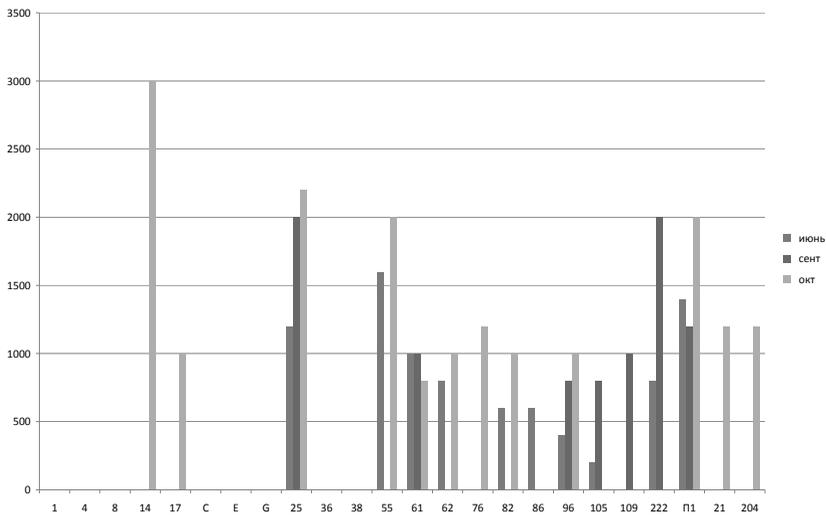
Анализ вертикального распределения видового состава в водной толще показал, что большинство видов не имеют четкой приуроченности к какому-либо горизонту.

Количественные характеристики микопланктона, полученные в 2016 г., колебались от 600 п/л (ст. 25) до 3200 п/л (ст. 1) в июне, от 1000 п/л (ст. 82, 86) до 4000 п/л (ст. 1) в сентябре и от 800 п/л (ст. 61) до 3400 п/л (ст. 4) в соответствии с рис. 2.

Исследования 2016 г. выявили повышение численности микопланктона по сравнению с 2015 г., при этом сохранилась тенденция видовой перестройки доминирующего комплекса, возможно вызванная ростом объема новообразованного органического вещества. Высокие значения микопланктона были характерны для 1980-х гг. (максимум отмечался в 1986 г. и составлял 7500 п/л), что объяснялось последствиями процесса антропогенного эвтрофирования. Снижение численности стало наблюдаться с 1991 г., когда антропогенная нагрузка на озеро упала в соответствии с рис. 4. С 2001 г. средняя численность микопланктона по акватории озера колебалась от 500 до 900 пропагул/л. В период исследования 2009–2016 гг. максимальная численность водных грибов отмечалась в 2013 г. и составляла 7000 п/л, что, вероятно, было вызвано осенней вспышкой диатомовых и последствиями этапа интенсивной перестройки озерной биоты в ходе антропогенного эвтрофирования.

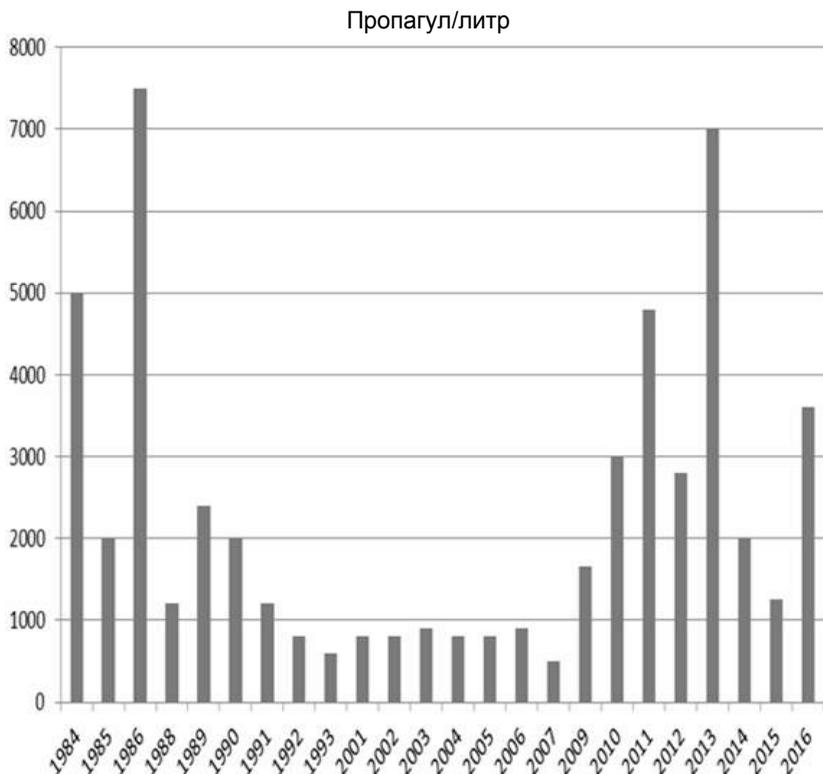


**Рис. 2. Численность водных грибов по акватории Ладожского озера в июне, сентябре и октябре 2016 г. (поверхность)**



**Рис. 3. Численность водных грибов Ладожского озера в июне, сентябре и октябре 2016 г. (дно)**

Следует отметить резкое увеличение численности микопланктона в придонных горизонтах глубоководных станций в октябре в соответствии с рис. 3.



**Рис. 4.** Численность водных грибов по акватории Ладожского озера (п/л)

На всем протяжении наблюдений распределение водной микофлоры по акватории озера было неравномерным, как показано на рис. 4. Наиболее богат в видовом и численном отношении прибрежный район. Именно здесь были выделены виды, развитие которых связано с повышенным содержанием органического вещества и антропогенным загрязнением, – *Saprolegnia ferax*, *Leptomyces lacteus* [Коколия, 1967; Терехова, Швед, 1991]. Причем на грибах рода *Saprolegnia* был обнаружен паразитирующий *Woronina polycystis* Cornu. В Волховской губе выделялись дрожжевые грибы *Rhodotorula rubra* и *Torulopsis candida*, что указывает на локальное техногенное воздействие [Терехова, 2007]. В профундальном районе отмечались единичные экземпляры *Rhizophidium planctonicum*, паразитирующие на *Asterionella formosa*.

Полученные в ходе многолетних исследований экологические характеристики водных грибов Ладожского озера позволяют моделировать их поведение в условиях изменения климатических факторов и биогенной нагрузки. Надо отметить, что полученные данные не показали наличия грибов в таких объемах, которые могли бы привести к ухудшению качества воды. Интерес представляет изменение качественного состава микопланктона в сторону увеличения численности дрожжевых грибов, которые и входят в доминирующий комплекс, вытеснив виды других таксономических групп.

### Литература

*Коколия Т. Г.* О развитии водного гриба Лептомитуса и других компонентов биологических обростаний в р. Неве // Санитарное состояние реки Невы. Л., 1967. С. 110–126.

*Литвинов М. А., Дудка И. А.* Методы исследования микроскопических грибов пресных и соленых (морских) водоемов. Л.: Наука, 1977. 151 с.

*Пидопличко Н. М., Милько А. А.* Атлас мукокоральных грибов. Киев: Наукова думка, 1975. 187 с.

*Семенова Т. А.* Антропогенная изменчивость микроскопических грибов в водных экосистемах (на примере водоемов Среднего Поволжья). Тольятти: ИЭВБ РАН, 1994. 36 с.

*Солнцева Н. П.* Общие закономерности трансформации почв в районах добычи нефти (формы проявления, основные процессы, модели) // Восстановление нефтезагрязненных почвенных экосистем. М.: Наука, 1988. С. 23–41.

*Терехова В. А.* Микобиота в мониторинге водных экосистем // Микол. и фитопатол. 1995. Т. 29, вып. 1. С. 36–40.

*Терехова В. А.* Микромицеты в экологической оценке водных и наземных экосистем. М.: Наука, 2007. 215 с.

*Терехова В. А., Швед Л. Г.* Численность и биомасса микроскопических грибов в малых реках Среднего Поволжья // Биол. науки. 1991. № 6. С. 74–82.

*Lodder J.* The yeast. A taxonomic study. Amsterdam; London, 1970. 658 p.

## FUNCTIONAL CHARACTERISTICS OF AQUATIC FUNGI OF LAKE LADOGA

I. V. Iofina

*Institute of Limnology, Russian Academy of Sciences*

Aquatic fungi, which play an important role in biological processes in an aquatic environment, are indicators of the trophic status of a lake. Human impacts cause changes in microbiota composition.

## СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ОНЕЖСКОГО ОЗЕРА И ПРОБЛЕМЫ БИОМОНИТОРИНГА ЕГО ЭКОСИСТЕМЫ

Н. М. Калинин, Е. В. Теканова, А. И. Сидорова, Н. А. Белкина

*Институт водных проблем Севера КарНЦ РАН*

Рассмотрены основные факторы, оказывающие влияние на экосистему Онежского озера. Показано, что на фоне снижения нагрузки от точечных источников загрязнения (промышленные и коммунально-бытовые сточные воды) появились новые факторы воздействия (форелевые хозяйства, биологическое загрязнение). В настоящее время антропогенно измененными являются северо-западные заливы озера (4 % от всей акватории). Основная часть озера сохраняет высокое качество воды. Проблемы биомониторинга связаны с высокой лимнической гетерогенностью экосистемы Онежского озера, которая определяется сложной формой котловины, особенностями температурного режима, изменчивостью физико-химического состава донных отложений, разобщенностью планктонной и бентосной систем и неравномерным распределением антропогенной нагрузки. Предложены подходы, позволяющие учесть пространственно-временную изменчивость водных сообществ и выявить их реакцию на действие антропогенного и климатического факторов. Разработаны критерии количественной оценки состояния водных сообществ, которые могут быть использованы при разработке экспертной системы Онежского озера. Для сохранения высокого качества воды этого уникального водоема необходимо создание Закона об охране Онежского озера на основе научных подходов к его хозяйственному использованию.

Онежское озеро как источник питьевой воды для значительной части населения Республики Карелия и чистых вод для Ладожского озера [Онежское озеро. Атлас, 2010] является важнейшим стратегическим водным объектом Северо-Запада России. Анализ данных показал высокую степень гетерогенности экосистемы водоема [Крупнейшие озера-водохранилища..., 2015]. Основная глубоководная часть озера сохраняет свой олиготрофный статус, что объясняется ее значительной морфометрической изоляцией от северо-западных заливов, которые претерпевают изменения в результате антропогенного воздействия.

Кондопожская и Петрозаводская губы, составляющие 4 % от акватории всего озера, на протяжении многих десятилетий являются приемниками сточных вод крупных населенных пунктов. В Кондопожскую губу, кроме того, поступают сточные воды целлюлозно-бумажного производства. В результате поступления фосфора и органических веществ природного и антропогенного происхождения произошло эвтрофирование этих районов озера [Тимакова и др., 2014]. Однако в силу их ковшеобразной формы основная масса загрязняющих веществ остается в пределах заливов, оседает на дно и частично трансформируется. Таким образом,

Кондопожская и Петрозаводская губы играют важную барьерную роль на пути загрязняющих веществ в глубоководную часть Онежского озера. Лишь в отдельные годы отмечаются спорадические выносы загрязненных вод из заливов в центральные районы [Тимакова, Теканова, 1999].

На протяжении последнего десятилетия сброс сточных вод в береговую часть Онежского озера упал на 30 % [Филатов и др., 2016]. Это вызвало реолиготрофизацию водоема, т. е. снижение трофического статуса заливов озера [Калинкина и др., 2016]. Особенно ярко процессы реолиготрофизации проявились в изменении состояния глубоководного бентоса, численность которого в разных районах озера в последние десять лет снизилась в 7–10 раз. Что касается планктонных сообществ, высокая сезонная изменчивость их показателей не позволяет пока выявить четкой реакции планктона на уменьшение антропогенной нагрузки. Тем не менее в 2000-е гг. отмечается некоторое сокращение численности и биомассы фитопланктона, при этом его структурные перестройки свидетельствуют о снижении трофического статуса озера [Чекрыжева, 2015].

В период 2000-х гг. заметно изменился характер антропогенного воздействия на экосистему Онежского озера. На фоне снижения объемов сточных вод от точечных источников появились новые, так называемые рассеянные источники, в том числе нефтяное загрязнение, очаг которого сформировался в подземных горизонтах в прибрежной зоне Петрозаводской губы [Калинкина и др., 2017б]. В начале 2000-х гг. Петрозаводская губа подвергалась массовому загрязнению в результате аварийного разлива нефти, с которым справлялась в силу своей высокой проточности. Однако сегодняшняя ситуация отличается от предыдущих хроническим характером загрязнения. Необходимо детальное изучение нефтяного загрязнения Петрозаводской губы, особенно вблизи пункта водозабора и на дне, где могут скапливаться тяжелые фракции нефти.

Среди новых угроз для экосистемы Онежского озера можно назвать форелевые хозяйства, которые сосредоточились в северных заливах. В настоящее время треть всей товарной форели в Карелии выращивается на акватории Онежского озера [Стерлигова и др., 2011]. Хотя влияние форелевых ферм проявляется в заливах локально, тем не менее известны случаи превышения допустимой нагрузки по фосфору (например, в Кефтень-губе), что является предпосылкой возможного выноса загрязнений в открытое озеро. В связи с этим важной задачей ближайшего будущего является организация постоянного биомониторинга ситуации в районах расположения форелевых хозяйств.

К числу современных экологических проблем Онежского озера относится биологическое загрязнение, т. е. вселение новых видов. Около 15 лет назад на литорали озера был обнаружен бентосный рачок байкаль-

ского происхождения *Gmelinoides fasciatus* Stebbing. Сорок лет назад он был завезен в водоемы европейской части России с целью улучшения кормовой базы рыб [Березина, Панов, 2003]. В настоящее время гмелиноидес распространился по всей литорали, что составляет около 5 % от всей акватории Онежского озера. Вселение нового рачка характеризуется разнонаправленными последствиями: от улучшения кормовой базы молоди окуня до возможности включения гмелиноидеса в жизненные циклы паразитов рыб [Сидорова, Калинин, 2015].

Климатические изменения наиболее контрастно проявляются в северных широтах. Для Карелии в последние годы отмечается повышение среднегодовой температуры воздуха на 1 °С по сравнению с климатической нормой 1960–1990-х гг. [Назарова, 2014]. В Онежском озере увеличилась продолжительность безледоставного периода [Efremova et al., 2013] и «биологического лета» [Филатов и др., 2014]. Тем не менее воздействие климатических изменений на экосистему Онежского озера в целом выражено незначительно. Огромные массы воды (295 км<sup>3</sup>), сосредоточенные в озере, определяют его высокую теплоинертность и относительное постоянство температурных условий для водных сообществ. Исключения составляют все более частые в последнее время жаркие годы. Особенно большое значение для биоты Онежского озера имеет аномально высокий прогрев воздуха в весенние месяцы, как это наблюдалось в 2010 и 2016 гг. Нарушение хода весеннего термобара смещает сроки развития планктонных сообществ на более ранние [Калинкина и др., 2017б].

Таким образом, экосистема Онежского озера на протяжении последних 60 лет находится в условиях непрерывного изменения характера и интенсивности антропогенной нагрузки. В настоящее время расширился спектр действующих факторов, к которым добавилось влияние форелевых хозяйств и биологическое загрязнение. С учетом высокой ценности водных ресурсов Онежского озера, обеспечивающих экологическую безопасность северо-западного региона России, необходимо принятие Федерального закона об охране этого уникального водоема.

Экологические проблемы Онежского озера определяют необходимость постоянного контроля его состояния. Однако проведение биомониторинга осложняется высокой лимнической гетерогенностью экосистемы озера. Неоднородность водных сообществ обусловлена сложной формой котловины озера, особенностями температурного режима (прохождение термобара) и неравномерным распределением антропогенной нагрузки.

Для озера характерен гетеротрофный тип метаболизма, т. е. резкое превышение деструкции органического вещества над его продукцией. В Онежском озере интегральные значения деструкции органического

вещества в 3–10 раз больше, чем скорость первичной продукции [Теканова, Тимакова, 2006]. Такое превышение деструкции над продукцией объясняется большим количеством аллохтонного органического вещества, поступающего с заболоченного водосбора, и пятикратным превышением трофолитического слоя над трофогенным. Поскольку все синтезированное органическое вещество утилизируется в верхних слоях воды, бентосная система оказывается трофически слабо связанной с планктонной системой. Таким образом, глубоководность озера обуславливает функциональную разобщенность планктонной и бентосной систем. Кормовая база глубоководного бентоса остается до сих пор неизученной. Это вызывает трудности в интерпретации наблюдаемых изменений.

Накопление на дне повышенных концентраций микроэлементов – меди, железа, марганца, поступающих с речными водами, определяют геохимические особенности Онежского озера [Белкина и др., 2008]. Максимальные концентрации микроэлементов приурочены к наиболее глубоким районам. Высокая изменчивость физико-химического состава донных отложений предопределяет варьирование структуры бентосных сообществ. Некоторые из показателей, рекомендуемых Росгидрометом для целей биомониторинга (например, олигохетный индекс), в условиях Онежского озера не отражают действительной ситуации, поскольку малощетинковые черви повсеместно распространены в озере, в том числе на большой глубине.

Для решения задач биомониторинга на базе обширной гидробиологической информации, накопленной в ИВПС КарНЦ РАН, разработаны подходы, позволяющие учесть пространственно-временную изменчивость водных сообществ и выявить их реакцию на действие антропогенного и климатического факторов. Предложены критерии количественной оценки естественной изменчивости показателей планктона [Сярки, Теканова, 2008; Теканова, Сярки, 2015]. Показано, что высокие концентрации железа и сопутствующие ему микроэлементы (марганец, медь, хром, кобальт, никель, цинк) в глубоких районах озера проявляют свое угнетающее действие и определяют низкие показатели развития бентоса. Подтверждением этого служат обнаруженные в этих районах токсичные донные отложения. Выявлены три зоны, в пределах которых достоверно различается структура сообществ глубоководного бентоса. Доказано, что при проведении биомониторинга необходимо рассматривать динамику сообществ бентоса отдельно в каждой зоне [Калинкина и др., 2016]. Предложенные критерии могут быть использованы при разработке экспертной системы Онежского озера [Калинкина и др., 2017а].

## Литература

*Белкина Н. А., Рыжаков А. В., Тимакова Т. М.* Распределение и трансформация нефтяных углеводородов в донных отложениях Онежского озера // Водные ресурсы. 2008. Т. 3, № 4. С. 472–481.

*Березина Н. А., Панов В. Е.* Вселение байкальской амфиподы *Gmelinoides fasciatus* (Amphipoda, Crustacea) в Онежское озеро // Зоол. журн. 2003. Т. 82, № 6. С. 731–734.

*Калинкина Н. М., Сидорова А. И., Полякова Т. Н. и др.* Снижение численности глубоководного макрозообентоса Онежского озера в условиях многофакторного воздействия // Принципы экологии. 2016. Т. 5. № 2. С. 47–68.

*Калинкина Н. М., Коросов А. В., Сярки М. Т.* К созданию экспертной системы Онежского озера: оптимизация мониторинга состояния экосистемы по показателям зоопланктона // Принципы экологии. 2017а. № 1. С. 117–132.

*Калинкина Н. М., Теканова Е. В., Сярки М. Т.* Экосистема Онежского озера: реакция водных сообществ на антропогенные факторы и климатические изменения // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2017б. № 1. С. 4–18.

*Крупнейшие озера-водохранилища Северо-Запада Европейской части России: современное состояние и изменения экосистем при климатических и антропогенных воздействиях /* Под ред. Н. Н. Филатова. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2015. 375 с.

*Назарова Л. Е.* Изменчивость средних многолетних значений температуры воздуха в Карелии // Известия РГО. 2014. Т. 146, вып. 4. С. 27–33.

*Онежское озеро.* Атлас. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2010. 151 с.

*Сидорова А. И., Калинкина Н. М.* Инвазия байкальской амфиподы *Gmelinoides fasciatus* в Онежское озеро. Сезонная динамика популяционных показателей. LAP Lambert Academic publishing, 2015. 80 с.

*Стерлигова О. П., Кутаев С. П., Ильмаст Н. В. и др.* Состояние заливов Онежского озера при товарном выращивании радужной форели // Поволжский эколог. журнал. 2011. № 3. С. 386–393.

*Сярки М. Т., Теканова Е. В.* Сезонный цикл первичной продукции в Онежском озере // Изв. РАН, сер. Биологическая. 2008. № 5. С. 621–625.

*Теканова Е. В., Сярки М. Т.* Особенности фенологии первично-продукционного процесса в пелагиали Онежского озера // Изв. РАН, сер. Биологическая. 2015. № 6. С. 645–652.

*Теканова Е. В., Тимакова Т. М.* Первичная продукция и деструкция органического вещества в Онежском озере // Состояние и проблемы продукционной гидробиологии. М.: Товарищество научных изданий КМК, 2006. С. 60–70.

*Тимакова Т. М., Куликова Т. П., Литвинова И. А. и др.* Изменение биоценозов Кондопожской губы Онежского озера под влиянием сточных вод целлюлозно-бумажного комбината // Водные ресурсы. 2014. Т. 41, № 1. С. 74–82.

*Тимакова Т. М., Теканова Е. В.* Характеристика процессов первичного продуцирования органического вещества // Онежское озеро. Экологические проблемы. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 1999. С. 158–174.

Филатов Н. Н., Калинин Н. М., Литвиненко А. В. и др. Состояние и изменения экосистем крупнейших озер-водохранилищ европейской части России // Общество. Среда. Развитие. 2016. № 3 (40). С. 109–114.

Филатов Н. Н., Руховец Л. А., Назарова Л. Е. и др. Влияние изменений климата на экосистемы озер севера Европейской территории России // Учен. зап. Российского государственного гидрометеорологического института. 2014. № 34. С. 49–55.

Чекрыжева Т. А. Фитопланктон. Оценка современного состояния Онежского озера по гидробиологическим показателям и устойчивости функционирования водных сообществ // Крупнейшие озера-водохранилища Северо-Запада Европейской части России: современное состояние и изменения экосистем при климатических и антропогенных воздействиях. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2015. С. 115–121.

Efremova T., Palshin N., Zdorovenkov R. Long-term characteristics of ice phenology in Karelian lakes // Estonian Journal of Earth Sciences. 2013. Vol. 62, N 1. P. 33–41.

## THE CURRENT STATE OF LAKE ONEGO AND PROBLEMS OF ECOSYSTEM BIOMONITORING

N. M. Kalinkina, E. V. Tekanova, A. I. Sidorova, N. A. Belkina

*Northern Water Problems Institute, KarRC RAS*

The main factors affecting the ecosystem of Lake Onego are taken into consideration. It is shown that while the load from point sources (industrial and municipal wastewater) has declined, there appeared new factors of influence (trout farms, biological invasions). At present, northwestern bays of the lake (4 % of the entire water area) have been modified by anthropogenic factors. The main part of the lake retains high water quality. The problems of biomonitoring are associated with high heterogeneity of the Lake Onego ecosystem generated by the complex shape of the basin, peculiarities of the thermal regime, variability of the physicochemical composition of bottom sediments, disconnected plankton and benthic systems, and uneven distribution of human pressure. Approaches are proposed that allow taking into account the spatial-temporal variability of aquatic communities and revealing their response to anthropogenic and climatic factors. Criteria have been developed for quantitative assessment of the state of the aquatic communities, which can be used to work out the expert system for Lake Onego. A prerequisite for maintaining the high water quality of this unique water body is adoption of a Law on the protection of Lake Onego on the basis of scientific approaches to its economic use.

## ХАРАКТЕРИСТИКА ЗИМНЕГО ФИТОПЛАНКТОНА ОЗЕРА ШЛИНО

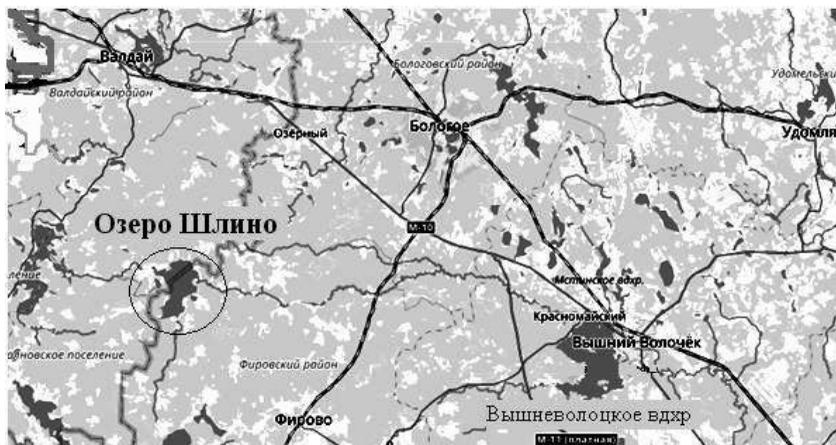
**А. Б. Комиссаров**

*Иваньковская научно-исследовательская станция филиала ФГБУ науки  
Института водных проблем РАН*

Проведено исследование зимней альгофлоры планктона озера Шлино в феврале разных лет. Было обнаружено 57 видов и разновидностей фитопланктона, 23 таксона определены до рода. Основу таксономического разнообразия формировали диатомовые и зеленые водоросли при незначительном участии криптофитовых и цианобактерий. Общая численность водорослей достигала 3678 млн кл/л, биомасса – 2,262 мг/л.

Шлино – озеро на границе Тверской и Новгородской областей, принадлежащее бассейну р. Мсты (бассейн Балтийского моря). В 1812 г. на вытекающей из озера реке Шлине была сооружена плотина, в результате чего сток озера был зарегулирован, а уровень воды поднят на несколько метров. Площадь водной поверхности в настоящее время составляет 34 км<sup>2</sup>, полный объем – 0,068 км<sup>3</sup>, наибольшая глубина – 4,3 м, средняя – 2 м, площадь водосбора – 752 км<sup>2</sup>. Озеро почти овальной формы, слегка вытянуто с севера на юг: длина – 8,8 км, ширина достигает 7 км. Северный, восточный и юго-восточный берега освоены, здесь располагаются несколько деревень (Красилово, Комкино и Яблонька). Западная и юго-западная части труднодоступны (рис. 1). Берега заняты в основном сосновыми и елово-березовыми лесами. Озеро интенсивно используется в качестве отдыха в теплое время года (стоянки туристов с палатками) и круглогодично – для любительской рыбной ловли. Притоки озера немногочисленны, наиболее крупные из них – реки Либья, Кова и Рабежа. Река Либья в верховьях соединена искусственным каналом с озером Вельё, часть водостока которого поступает в оз. Шлино. Шлина – единственная река, вытекающая из озера, впадает в Вышневолоцкое водохранилище [Природа..., 1960].

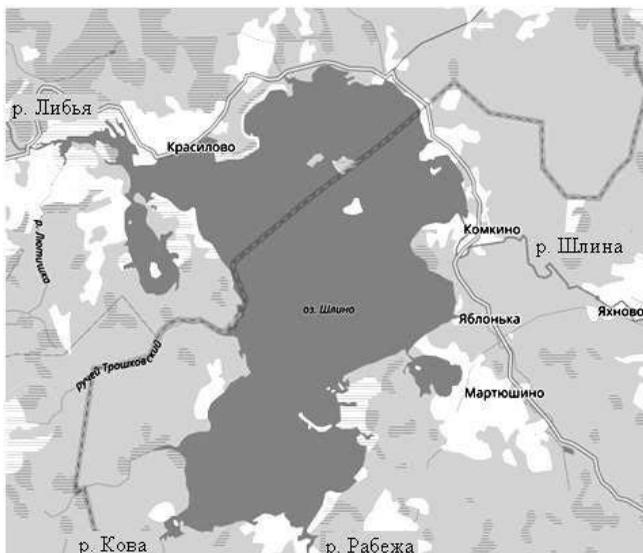
До обустройства Петром I Вышневолоцкой водной системы в начале XVIII в., сток из озера через р. Шлину происходил в р. Цну и далее в оз. Мстино, из которого вытекает р. Мста, впадающая в оз. Ильмень. После сооружения Заводского водохранилища (впоследствии названного Вышневолоцким) в междуречье Цны и Шлины часть стока из озера была перенаправлена на Волжский склон в р. Тверцу – приток р. Волги (рис. 1). В настоящее время 80 % стока Вышневолоцкого водохранилища (около 1 млн м<sup>3</sup>/год) через р. Тверцу направляется в Иваньковское водохранилище. Таким образом, часть воды из оз. Шлино участвует в формировании баланса Иваньковского водохранилища – источника питьевой воды для Московского региона [Бессеребренникова, 2012].



**Рис. 1. Карта-схема Вышневолоцкой водной системы**

По данным собственных исследований, проведенных в 2011 г., вода оз. Шлино по классификации Алекина относилась к гидрокарбонатному классу кальциевой группы, характеризовалась нейтральной реакцией pH (7,63–8,01), являлась ультрапресной по минерализации (менее 150 мг/дм<sup>3</sup>) и очень мягкой по величине общей жесткости (не более 2,9 мг-экв/дм<sup>3</sup>), цветность воды от средней до высокой (до 120° по Pt-Co шкале), мезотрофный уровень [Комиссаров, 2013б].

Пробы зимнего фитопланктона были отобраны в феврале 2011, 2012 и 2014 гг. в северной и юго-восточной частях озера в трех точках – дд. Красиловое, Яблонька и Комкино (рис. 2). Две точки – Красиловое и Яблонька – отбирались из лунки непосредственно на озере приблизительно в 100 м от берега, Комкино – нижний бьеф Шлинского бейшлота (исток р. Шлины) с открытой водой. Пробы из лунок отбирались батометром под кромкой льда. Глубина в местах отбора не превышала 1 м. Толщина льда достигала 70 см. Проба в нижнем бьефе отбиралась с правой стороны плотины с открытой воды пластиковым ведром. Объем отбираемых проб составлял 0,5 дм<sup>3</sup>. Фиксация материала осуществлялась смешанным реактивом с формалином и раствором Люголя. Фильтрация и концентрирование проб проводились через мембранные фильтры «Владипор» с размером пор 1 мкм. Определение видов и внутривидовых таксонов осуществлялось на микроскопе Carl Zeiss Primo Star при увеличении 400. Подсчет численности клеток производился в камере «Учинская-2» объемом 0,01 см<sup>3</sup>, оценка биомассы – счетно-объемным методом [Кузьмин, 1975].



**Рис. 2.** Карта-схема оз. Шлино

В результате исследования проб зимнего фитопланктона в оз. Шлино было обнаружено в общей сложности 80 таксонов водорослей из 8 отделов (57 рангом ниже рода, 23 – определенные до рода), более половины которых – это диатомовые и зеленые (рис. 3).

Соотношение числа видов в крупных таксономических группах сильно различалось в зимние периоды разных лет (табл. 1). Наибольшее таксономическое разнообразие было зафиксировано в феврале 2011 г. – 51 таксон: 34 рангом ниже рода, 17 – определенные до рода. В феврале 2012 г. было зарегистрировано 46 таксонов: 34 рангом ниже и 12 определенных до рода. Наименьшее разнообразие фитопланктона было отмечено в феврале 2014 г. – 26 таксонов: 20 рангом ниже рода, 6 – определенные до рода. Недостаток света и низкая температура воды (была близка к нулю) не позволяли водорослям вегетировать в полной мере. В теплое время года с мая по октябрь в альгофлоре планктона

**Таблица 1.** Число таксонов водорослей планктона оз. Шлино в феврале разных лет (с учетом определенных до рода)

Отдел	2011 г.	2012 г.	2014 г.
Диатомовые	23	15	5
Зеленые	10	12	8
Криптофитовые	7	8	5
Цианобактерии	7	4	3
Золотистые	2	2	2
Эвгленовые	2	2	1
Динофитовые	–	2	1
Стрептофитовые	–	1	1
Всего	51	46	26

*Примечание.* Прочерк – не обнаружены.

оз. Шлино на тех же станциях только в 2011 г. разнообразие водорослей достигало 119, что на 50 % больше, чем число таксонов, обнаруженных за три зимних периода в целом.

Наибольшее видовое богатство было отмечено в роде *Cryptomonas* Ehrenberg из отдела Кристофитовые водоросли (6 видов). По 4 вида было в родах *Cyclotella* (Kutzing) Brebisson и *Fragilaria* Lyngbye из отдела Диатомовые водоросли, *Monoraphidium* Komarkova-Legnerova и *Didymocystis* Korshikov из отдела Зеленые водоросли.

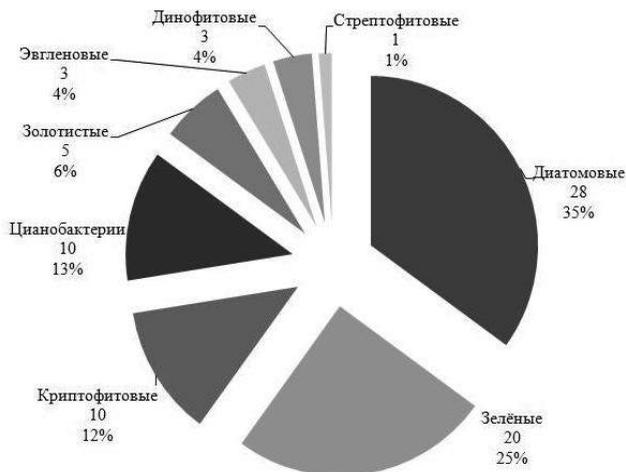
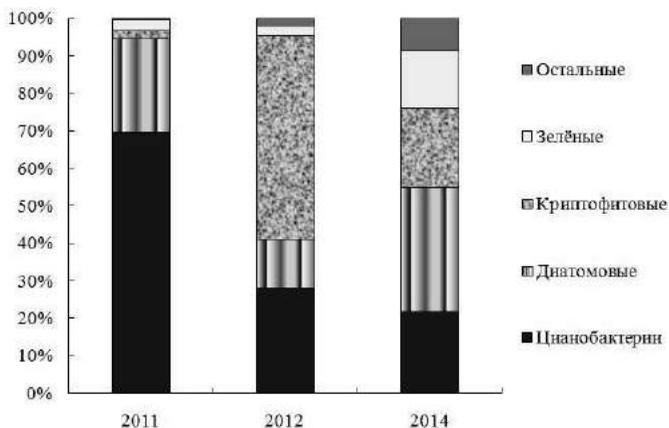


Рис. 3. Таксономический состав зимнего фитопланктона оз. Шлино

Фитопланктон в феврале разных лет характеризовался непостоянством видового состава. Так, из 80 таксонов, обнаруженных во всех трех зимних сезонах, постоянно в пробах присутствовали всего 8 (6 видов и 2 таксона, определенных до рода) – это представители криптофитовых *Chroomonas acuta* Utermohl, *Cryptomonas erosa* Ehrenberg, *C. marssonii* Skuja и *C. ovata* Ehrenberg, диатомовые *Aulacoseira ambigua* (Grunow) Simonsen и *Nitzschia* sp., зеленые *Monoraphidium contortum* (Thuret) Komarkova-Legnerova и *Chlamydomonas* sp. Таксонов, обнаруженных в двух зимних сезонах, – 24. Таким образом, 48 таксонов, или 62 % от общего списка зимнего фитопланктона, были встречены единичными экземплярами в какой-либо один зимний сезон.

Общая численность фитопланктона в зимний период в оз. Шлино изменялась от 31 тыс. кл/л до 3,678 млн кл/л (табл. 2). По сравнению с теплым периодом это невысокий показатель. Так, в 2011 г. общая численность водорослей достигала 11,63 млн кл/л [Комиссаров, 2013а].

Основу численности формировали в феврале 2011 г. диатомовые водоросли и цианобактерии, в феврале 2012 г. – криптофитовые, цианобактерии и диатомовые, в феврале 2014 г. – практически в равной степени диатомовые, цианобактерии, криптофитовые и зеленые (рис. 4).



**Рис. 4.** Соотношение численности основных отделов водорослей в планктоне оз. Шлино в зимний сезон разных лет (усредненные значения по трем станциям)

Общая биомасса фитопланктона в зимнее время изменялась на станциях от 0,015 до 2,262 мг/л (табл. 3). Для сравнения, в весенне-летний период 2011 г. биомасса водорослей достигала практически 4 мг/л [Комиссаров, 2013а].

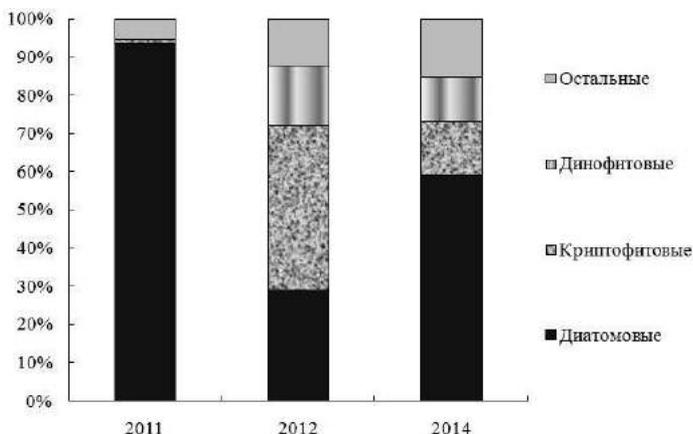
**Таблица 2.** Изменение общей численности фитопланктона на станциях оз. Шлино в феврале разных лет, тыс. кл/л

Станция отбора	2011 г.	2012 г.	2014 г.
Красилово	295	920	215
Яблонька	1892	3678	105
Комкино	221	946	31

**Таблица 3.** Изменение общей биомассы фитопланктона на станциях оз. Шлино в феврале разных лет, мг/л

Станция отбора	2011 г.	2012 г.	2014 г.
Красилово	0,087	0,640	0,155
Яблонька	2,262	0,584	0,085
Комкино	0,048	0,396	0,015

Ведущая роль в формировании биомассы в феврале 2011 г. принадлежала исключительно диатомовым водорослям (рис. 5). В другие зимние сезоны биомасса водорослей складывалась в основном за счет диатомовых, криптофитовых и динофитовых водорослей.



**Рис. 5.** Соотношение биомассы основных отделов водорослей в планктоне оз. Шлино в зимний сезон разных лет (усредненные значения по трем станциям)

Таким образом, в результате проведенного исследования в феврале 2011, 2012 и 2014 гг. в зимнем фитопланктоне оз. Шлино было идентифицировано всего 57 видов, разновидностей и форм водорослей из 8 отделов, с учетом определенных до рода – 80, большинство из которых встречалось единичными экземплярами в отдельные зимние сезоны. Общая численность и биомасса были невелики по сравнению с периодом интенсивной вегетации с мая по октябрь. Таксономическую структуру флоры зимнего планктона определяли в основном диатомовые и зеленые водоросли, тогда как в количественном отношении преобладали в основном диатомовые и криптофитовые.

### Литература

*Бессеребренникова С. Е.* Оценка качества воды Вышневолоцкого водохранилища по гидрохимическим показателям. Дипломный проект. Тверь: ТГТУ, 2012.

*Комиссаров А. Б.* Сезонная динамика фитопланктона озера Шлино в 2011 г. // Биоразнообразие: глобальные и региональные процессы. Материалы III Всерос. конф. молодых ученых. Улан-Удэ, 2013а. С. 48–49.

*Комиссаров А. Б.* Сравнение гидрохимических и гидробиологических методов оценки качества воды // География, экология, туризм: научный поиск студентов и аспирантов. Материалы I Всерос. науч.-практ. конф. Тверь: ТвГУ, 2013б. С. 24–27.

*Кузьмин Г. В.* Фитопланктон: видовой состав и обилие // Методика изучения биогеоценозов внутренних водоемов. М., 1975. С. 73–90.

*Природа и хозяйство Калининской области.* Калинин: КГПУ, 1960. 665 с.

## CHARACTERISTICS OF LAKE SHLINO PHYTOPLANKTON IN WINTER

A. B. Komissarov

*The department of Water Problems Institute of the Russian Academy of Sciences –  
Ivankovo Scientific Research Station, Konakovo*

The results of studies of the winter period algal flora of Lake Shlino conducted in February 2011, 2012 and 2014 are presented. Altogether 80 taxa of algae were found (57 of them rank below genus). The bulk of the flora diversity is composed of Bacillariophyta and Chlorophyta, with a minor contribution of Cryptophyta and Cyanobacteria. The total abundance of algae was 3 678 cells/liter, total biomass was 2.262 mg/liter.

## МАКРОЗООБЕНТОС – ИДЕНТИФИКАТОР СОСТОЯНИЯ МАЛЫХ ОЗЕР ЮГО-ВОСТОЧНОГО ПРИЛАДОЖЬЯ

A. Ю. Куличенко

*Нижне-Свирский государственный природный заповедник*

Исследованы таксономический состав и показатели количественного развития макрозообентоса трех малых озер юго-восточного Приладожья, расположенных на территории Нижне-Свирского заповедника. По данным 1999–2015 гг. выполнена оценка состояния водоемов на основе показателей видового разнообразия и сходства (индексы Шеннона-Уивера, коэффициент Жаккара), а также традиционных биотических индексов на основе соотношения крупных таксонов (индексы Вудивисса, Балушкиной и Попченко). Озеро Николкина Кара, связанное протокой со Свирской губой Ладожского озера, характеризуется как «чистый» или «слабо загрязненный» водоем. Канковское и Кандольское озера, соединенные протоками с р. Свирью, крупным водотоком с высокой антропогенной нагрузкой, характеризуются как «умеренно загрязненные».

Макрозообентос – один из важнейших элементов экосистем континентальных водоемов. Использование структурных и функциональных характеристик сообщества в целях биоиндикации качества вод малых озер и рек, формирующих до 94,7 % гидрографической сети России [Ткачев, Булатов, 2002], приобретает большое значение в настоящее время. Исследование водных объектов, сохраняющих естественный режим функционирования, в частности озер, расположенных на ООПТ, способствует адекватной оценке изменений в структуре сообществ экосистем, подверженных антропогенному воздействию.

Нижне-Свирский государственный природный заповедник (НСГПЗ) – водно-болотное угодье международного значения. ООПТ расположена в юго-восточной части Ладожского озера (Свирская губа), занимает право-

бережье р. Свири в нижнем ее течении. Территория заповедника включена в состав проектируемого водно-болотного угодья международного значения «Устье реки Свирь, включая государственный природный заповедник „Нижне-Свирский“» [Водно-болотные..., 2012; Сорокина и др., 2013]. В состав территории НСГПЗ входят акватории множества водных объектов, и гидробиологические работы играют существенную роль при подготовке ежегодных Летописей природы («Изучение естественного хода процессов, протекающих в природе, и выявление связей между отдельными частями природного комплекса») [Летопись..., 1999, 2013]. Однако изучению сообществ водных беспозвоночных малых рек и озер уделяется недостаточное внимание.

В настоящей работе впервые выполнена многоплановая оценка состояния водоемов на основе обобщения литературных, фондовых и собственных материалов автора о характеристиках макрозообентоса трех озер юго-восточного Приладожья – Николкина Кара, Кандольское, Канковское. Работа дает представление о таксономическом составе и структурных характеристиках донных биоценозов, что может быть использовано при инвентаризации фауны малых озер водно-болотного угодья международного значения.

### Материалы и методы

Исследуемые озера представляют собой небольшие по площади поверхности, неглубокие нейтрально-щелочные полигузмозные водоемы, непосредственно связанные протоками с Ладожским озером (оз. Николкина Кара) и р. Свирью (озера Канковское и Кандольское). Основные лимнологические характеристики водоемов приведены в табл. 1.

**Таблица 1. Характеристики малых озер юго-восточного Приладожья (НСГПЗ) [Куличенко, 2008, с дополнениями; Летопись..., 2008]**

Озеро	Площадь зеркала, га	Средняя глубина, м	Прозрачность, м	pH	Цветность, °Pt-Co
Николкина Кара	26,9	1,4	0,3–0,5	6,2–6,9	194–246
Кандольское	18,1	1,5	0,4–0,7	6,0–6,7	239–271
Канковское	10,2	1,2	0,3–0,6	6,3–6,8	292–339

В 2015 г. в условиях хронической низкой водности в системе «нижнее течение р. Свири – Ладожское озеро» средняя глубина в изученных водоемах не превышала 0,8 м, а условия для развития донных сообществ были экстремальными.

Водосборная территория озер заболочена, по урезу воды отмечаются *Phragmites communis* Trin, виды рода *Carex* sp., *Juncus* sp., *Sparganium* sp. На акватории регулярно встречаются *Nuphar lutea* (L.), *Sagittaria*

*sagittifolia* L., виды рода *Potamogeton* sp. В озерах Николкина Кара и Кандольское неоднократно отмечены встречи телореза обыкновенного *Stratiotes aloides* L., что позволяет говорить о расширении границы ареала макрофита до северо-восточных районов Ленинградской области. В оз. Канковском в 2015 г. был отмечен полушник озерный – *Isoetes lacustris* L., внесенный в перечень редких и охраняемых видов растений Красной книги Восточной Фенноскандии и Красной книги Республики Карелия.

Донные отложения водоемов неоднородны: центральные части котловин, в основном, заполнены плохо разложенным органическим веществом растительного происхождения, в литеральной части встречаются участки с илисто-песчаными отложениями.

В основу работы положены собственные результаты изучения сообществ макрозообентоса озер Николкина Кара, Кандольское, Канковское в 1999, 2006, 2015 гг., а также материалы сотрудников НСГПЗ Л. В. Кудашкиной и Е. Л. Белозеровой, изложенные в Летописи природы за 1999–2002, 2006, 2008, 2013, 2015 гг. и в литературных источниках [Летопись..., 2000, 2009, 2014, 2016; Результаты..., 2006; Куличенко, 2009].

В течение всего периода исследований изучение таксономического состава донных беспозвоночных выполнялось по стандартным гидробиологическим методикам [Руководство..., 1992]. Отбор проб для изучения показателей количественного развития макрозообентоса, в основном, выполнялся полуколичественным методом. Исключение составили 2006 и 2015 гг., когда был использован дночерпатель Экмана-Берджа (площадь облова 1/40 м<sup>2</sup>). Число станций отбора проб определялось площадью поверхности озера и составляло от 3 до 8 станций. Оно обязательно включало станции с максимальной и доминирующими глубинами, а также станции в наиболее распространенной ассоциации макрофитов. В дальнейшем беспозвоночные идентифицировались до таксона максимального ранга. В 2015 г. для расширения фаунистических списков беспозвоночных Нижне-Свирского заповедника впервые была выполнена видовая идентификация *Oligochaeta* и *Chironomidae*.

На основе данных о таксономическом составе зообентоса за весь период исследования выполнено сравнение сходства фаун озер с использованием коэффициента сходства Жаккара. Отдельно выполнялся расчет этой метрики по данным 2015 г. для озер Николкина Кара и Канковское. Оценка видового разнообразия макробеспозвоночных выполнена по индексу Шеннона-Уивера. Для оценки качества вод с учетом особенностей видового состава *Oligochaeta* и *Chironomidae* были рассчитаны информационный индекс сапробности олигохет Попченко (*I<sub>s</sub>*), хирономидный индекс Балужкиной (*K*), а также биотический индекс Вудивисса (*W*) [Шитиков и др., 2003].

## Результаты и обсуждение

С 1999 по 2015 г. в составе зообентоса выявлено 147 таксонов водных беспозвоночных, относящихся к 16 систематическим группам. Таксономическое разнообразие макрозообентоса представлено в табл. 2.

**Таблица 2. Таксономическое разнообразие макрозообентоса малых озер юго-восточного Приладожья (НСГПЗ)**

Тип	Класс	Отряд	Кандоль-ское	Канков-ское	Николкина Кара
<i>Plathelminthes</i>	<i>Turbellaria</i>		1		
<i>Nematoda</i>	<i>Enoplea</i>			1	1
<i>Annelida</i>	<i>Hirudinea</i>		4	5	6
	<i>Oligochaeta</i>		1	13	6
<i>Mollusca</i>	<i>Gastropoda</i>		16	12	14
	<i>Bivalvia</i>		1	2	3
<i>Ostracoda</i>					1
<i>Arthropoda</i>	<i>Crustacea</i>	<i>Isopoda</i>	1	1	1
	<i>Arachnida</i>	<i>Aranei</i>	5	6	5
		<i>Hydracarina</i>	3	3	3
<i>Insecta</i>		<i>Odonata</i>	7	12	14
		<i>Coleoptera</i>	9	8	5
		<i>Trichoptera</i>	11	12	12
		<i>Ephemeroptera</i>	5	6	6
		<i>Diptera</i>		4	10
		<i>Heteroptera</i>	8	7	5
		<i>Megaloptera</i>	1	1	
		<i>Lepidoptera</i>			1
Всего			73	93	93

Наибольшее число видов отмечено для вторичноводных насекомых – 87 видов и родов, относящихся к следующим отрядам: *Trichoptera* (25 видов), *Odonata* (19 видов), *Coleoptera* и *Diptera* (по 12 видов соответственно), *Heteroptera* (9 видов), *Ephemeroptera* (8 видов), *Megaloptera* и *Lepidoptera* (по 1 виду соответственно). Следует отметить, что в 2015 г. в составе макрозообентоса малых озер юго-восточного Приладожья впервые были обнаружены 3 вида стрекоз (*Agrion splendens* (Harris), *Platycnemis pennipes* (Pallas), *Sympetrum danae* (Sulzer)) и 6 видов ручейников (*Glyphotaelius pellicidus* (Retzius), *Holocentropus picicornis* (Stephens), *Limnephilus exctricatus* MacLachlan, *Ithytrichia lamellaris* Eaton, *Enomus tenellus* (Rambur), *Agraylea multipunctata* Curtis).

Брюхоногие моллюски представлены 19 таксонами, малощетинковые черви и пиявки также отличались высоким видовым разнообразием – 13 и 7 видов соответственно.

Наибольшее число видов макрозообентоса в 1999–2015 гг. обнаружено в озерах Николкина Кара и Канковское (по 93 вида). Донная фауна оз. Николкина Кара сформирована, в основном, эврибионтными видами брюхоногих моллюсков, личинками разнокрылых стрекоз, личинками ручейников из подотряда *Annulipalpia*, для которых характерно массовое развитие в водоемах с низким уровнем загрязнения. В 2015 г. при неблагоприятных условиях для развития бентоса существенную роль в таксономическом разнообразии играли хирономиды подсемейства *Chironominae*. Особенностью зообентоса оз. Николкина Кара можно считать тесную приуроченность максимумов видового разнообразия к зарослям макрофитов (*Nuphar lutea* (L.), *Phragmites communis* Trin). Похожая агрегированность сообществ зообентоса малых озер была отмечена автором для нейтрально-щелочных озер Валаамского архипелага [Куличенко, 2009].

Равнопредставлены (по 12 видов) в составе фауны донных беспозвоночных оз. Канковское брюхоногие моллюски, личинки стрекоз и ручейников из подотряда *Integripalpia*, не отличающиеся высокой чувствительностью к уровню загрязнения поверхностных вод. Наибольшим числом видов характеризовались представители кл. *Oligochaeta* (13 видов), из которых подавляющее количество таксонов (8 видов) относилось к семейству *Naididae*, массово развивающихся в лимнических системах, не подверженных антропогенному воздействию.

В макрозообентосе оз. Кандольское (73 таксона) наибольшим разнообразием отличались эврибионтные брюхоногие моллюски (16 видов) из рода *Lymnaea* sp. и личинки ручейников (11 видов).

Анализ сходства видовых списков макрозообентоса по коэффициенту Жаккара (данные 1999–2015 гг.) показал, что изученные озера имеют значительные отличия ( $K_j = 0,41–0,44$ ). Отмеченная тенденция наблюдалась и в 2015 г. в условиях хронической низкой водности, когда коэффициент Жаккара не превышал 0,25. Отличия фаун озер связаны с вариабельностью таксономического состава малощетинковых червей и вторичноводных насекомых (двукрылых, стрекоз, ручейников). Вероятно, обособленность фаун исследуемых озер определяется не только гидрохимическим составом поверхностных вод, но и наличием постоянной связи с крупной лимнической (оз. Николкина Кара – оз. Ладожское) и лентической (оз. Канковское, оз. Кандольское – р. Свирь) системами.

Показатели количественного развития бентоса были подробно изучены в 2015 г. Наибольшая биомасса (12,8 г/м<sup>2</sup>) отмечена в центральной части оз. Николкина Кара и связана с развитием пиявок, стрекоз *Erytroma najas* (Hansemann), ручейников *Phryganea bipunctata* Retzius. Минимальная величина биомассы бентоса наблюдалась в зарослях

полушника озерного, составляла  $3,8 \text{ г/м}^2$  и определялась развитием *Erythronia najas* (Hansemann), олигохет *Stylaria lacustris* (L.) и *Tubifex newaensis* (Michaelson). Максимумы численности и видового разнообразия бентонтов в озерах связаны с биотопами тростника (оз. Николкина Кара,  $3600 \text{ экз./м}^2$ ,  $2,98 \text{ бит/экз.}$ ), кубышки желтой (оз. Канковское,  $3360 \text{ экз./м}^2$ ,  $2,48 \text{ бит/экз.}$ ), а минимумы – с биотопом полушника озерного (оз. Канковское,  $1920 \text{ экз./м}^2$ ,  $2,40 \text{ бит/экз.}$ ).

Результаты оценки качества вод изученных озер представлены в табл. 3.

**Таблица 3. Оценка качества вод малых озер юго-восточного Приладожья (НСГПЗ) на основе биотических индексов ( $I_s$ ,  $K$ ,  $W$ )**

Озеро	$I_s$ (балл, оценка)	$K$ (балл, оценка)	$W$ (балл, оценка)
Канковское	0,17–0,33 (чистые – слабо загрязненные)	3,69 (умеренно загряз- ненные)	6–7 (незначительное загрязнение)
Николкина Кара	0,14–0,40 (чистые – слабо загрязненные)	4,28–5,17 (умеренно загряз- ненные)	8 (чистый водоем)

Оценка состояния водоемов на основе биотических индексов позволяет отметить, что оз. Николкина Кара, имеющее постоянную связь со Свирской губой Ладожского озера, характеризуется как «чистый» или «слабо загрязненный» водоем. Озера Канковское и Кандольское, соединенные протоками с р. Свирью, крупным водотоком с высокой антропогенной нагрузкой, характеризуются как «умеренно загрязненные».

### Литература

*Водно-болотные угодья* России, имеющие международное значение / Ред. А. А. Сирин. М.: Российская программа Wetlands International, 2012. 48 с.

Куличенко А. Ю. Использование структурно-функциональных характеристик донных сообществ для оценки экологического состояния ряда малых озер Северо-Запада России // Водные экосистемы: трофические уровни и проблемы поддержания биоразнообразия: Материалы Всерос. конф. (Вологда, Россия, 24–28 ноября 2008 г.). Вологда, 2008. С. 180–183.

Куличенко А. Ю. Количественное развитие макрозообентоса четырех разнотипных озер о. Валаам // X Съезд Гидробиол. об-ва при РАН: Тез. докл. (г. Владивосток, 28 сент. – 2 окт. 2009 г.). Владивосток: Дальнаука, 2009. С. 224–225.

*Летопись природы*, книга 19, 1999 г. Лодейное Поле, 2000. 175 с.

*Летопись природы*, книга 28, 2008 г. Лодейное Поле, 2009. 207 с.

*Летопись природы*, книга 33, 2013 г. Лодейное Поле, 2014. 222 с.

*Летопись природы*, книга 35, 2015 г. Лодейное Поле, 2016. 298 с.

Результаты многолетних наблюдений в природных комплексах Нижне-Свирского заповедника. СПб., 2006. 152 с.

*Руководство по гидробиологическому мониторингу поверхностных экосистем* / Под ред. В. А. Абакумова. СПб.: Гидрометеоиздат, 1992. 318 с.

Сорокина И. А., Чиркова Г. А, Ефимов П. Г. Флора проектируемого заказника регионального значения «Устье реки Свирь» (Ленинградская область) // Вестник ТвГУ, сер. Биология и экология. 2013. Вып. 30, № 7. С. 43–76.

Ткачев Б. П., Булатов В. И. Малые реки: современное состояние и экологические проблемы. Аналитический обзор / ГПНТБ СО РАН. Новосибирск, 2002. 114 с.

Шутиков В. К., Розенберг Г. С., Зинченко Т. Д. Количественная гидроэкология: методы системной идентификации. Тольятти: ИЭВБ РАН, 2003. 463 с.

## **USING MACROZOOBENTHOS COMMUNITY STRUCTURE FOR ASSESSMENT OF THE ECOLOGICAL STATUS OF THREE LAKES IN NIZHNE-SVIRSKY STRICT NATURE RESERVE**

**A. Yu. Kulichenko**

*Nizhne-Svirsky Strict Nature Reserve*

The Ramsar site "Nizhne-Svirsky Strict Nature Reserve" is located in the lower reaches of the Svir River and Svirskaya Bay (Lake Ladoga). Three small lakes are connected to Lake Ladoga (Nikolkina Kara) and the Svir River (Kandolskoe, Kankovskoe) by passages.

The taxonomic composition and indices of quantitative development of macrozoobenthos were investigated. Using data for 1999–2015 the status of the water bodies was assessed by indicators of species diversity (Shannon-Weaver, Jaccard indexes) and traditional biotic indexes (Woodiwiss, Balushkina and Popchenko indexes). Lake Nikolkina Kara was characterized as "clean" or "slightly polluted". Kankovskoe and Kandolskoe lakes, connected to the Svir River – a major watercourse with high anthropogenic load, are characterized as "moderately polluted".

## **РОЛЬ ЧУЖЕРОДНЫХ ВИДОВ В ТРАНСФОРМАЦИИ ЭКОСИСТЕМЫ ЛАДОЖСКОГО ОЗЕРА**

**Е. А. Курашов, М. А. Барбашова, А. Г. Русанов, Д. С. Дудакова,  
М. С. Трифонова, Н. В. Родионова, Д. Г. Алешина**

*Институт озероведения РАН*

Представлена современная ситуация распространения в Ладожском озере чужеродных видов и их роль в трансформации экосистемы озера.

Одной из серьезных угроз экологической безопасности Северо-Запада РФ является биологическое загрязнение. Вселение чужеродных видов – один из основных факторов, воздействующих на структурно-функциональную организацию водных экосистем данного региона, причем значение

этого фактора постоянно возрастает по мере распространения и увеличения численности вселившихся инвазивных видов и по мере занесения новых видов-вселенцев. Успешные интродукции чужеродных видов приводят к серьезнейшим экологическим, социальным и экономическим последствиям. В настоящее время инвазивные чужеродные виды считаются одной из основных угроз биоразнообразию [CBD..., 2017]. Таким образом, данная проблема требует всестороннего внимания и исследования.

Крупнейшее в Европе озеро Ладожское в силу своей холодноводности и низкой минерализации воды до недавнего времени продолжало оставаться достаточно устойчивым в отношении вторжений чужеродных видов беспозвоночных, обладающих высоким инвазивным потенциалом. Так, из 45 чужеродных видов, известных для восточной части Финского залива и эстуария р. Невы к 2015 г. [В Финском заливе..., 2015], многие из которых могли бы теоретически проникнуть в Ладожское озеро, в озеро смогли вселиться совсем немногие. Из этого списка мы не учитываем байкальскую амфиподу *Gmelinoides fasciatus* (Stebbing), которая проникла в р. Неву и Финский залив именно из Ладожского озера, где этот вид после самопроизвольного вселения из озер Карельского перешейка в первой половине 80-х гг. XX столетия (акклиматизировался в них для повышения кормовой базы рыб) занял доминирующее положение в большинстве литоральных биоценозов [Курашов и др., 2012].

Несмотря на небольшое общее число чужеродных видов в Ладоге в настоящее время, их роль в трансформации экосистемы озера, особенно в литоральной зоне, чрезвычайно велика. Материалы данной публикации призваны в общих чертах описать общую картину, сложившуюся на сегодняшний день в связи с проникновением и обитанием в Ладожском озере чужеродных видов.

Особое внимание в составе вселенцев в Ладожское озеро должно быть уделено ракообразным, которых на данный момент в водоемах бассейна восточной части Финского залива зафиксировано 19 видов. Причем непосредственно за пределы восточной части Финского залива смогли проникнуть четыре вида ракообразных: *Pontogammarus robustoides* (Sars), *Chelicorophium curvispinum* (Sars), *Eriocheir sinensis* H. Milne-Edwards и *Nitocra spinipes* Voeck [Дудакова, 2011; Курашов и др., 2012]. Пятый вид-вселенец, обитающий за пределами восточной части Финского залива, – *G. fasciatus*. Благодаря, в основном, этому виду экосистема Ладоги претерпела серьезные изменения в литоральной зоне [Курашов и др., 2012].

Проведенные экспериментальные и полевые исследования и расчеты показывают, что в среднем около 10 % годовой продукции макрофитов в литоральной зоне потребляется популяцией *G. fasciatus* [Курашов и др., 2011]. Перераспределение потоков вещества и энергии в литоральной зоне за счет

функционирования амфипод вызвало своеобразный мелиоративный эффект, когда численность остального макробентоса не только не уменьшилась, но увеличилась в различных литоральных биотопах, в некоторых из них до вселения *G. fasciatus* макробентос практически отсутствовал. Также возросли суммарные показатели развития мейобентоса в различных растительных ассоциациях (численность – в 1,5–2,5 раза, биомасса – примерно в 2 раза) по сравнению с периодом конца 80-х – начала 90-х гг., когда *G. fasciatus* либо отсутствовал, либо только осваивал литоральные биотопы.

В 2012 г. выявлена инвазия в Ладожское озеро еще одного нового вида-вселенца из числа амфипод – *Micruropus possolskii* Sowinsky [Барбашова и др., 2013]. Этот байкальский вид был впервые встречен в пробах бентоса от 6 августа 2012 г. из залива Щучий (61°05' с. ш., 30°05' в. д.). Скорее всего, в результате случайной непреднамеренной интродукции *M. possolskii* был занесен в бассейн Ладожского озера вместе с *G. fasciatus* и в дальнейшем проник в озеро.

Исследования литоральной зоны по всему периметру озера позволили выявить новые местообитания *M. possolskii*. В 2013 г. за пределами Щучьего залива этот вид был обнаружен в устье р. Вуоксы в Приозерске, а в 2014 г. – вдоль западного побережья в бухтах Владимирская и Далекая. В августе 2014 г. численность и биомасса макробентоса в литорали этих бухт составили, соответственно, 4400 и 10 340 экз./м<sup>2</sup>, 16,69 и 22,42 г/м<sup>2</sup>. На обеих станциях доминировали амфиподы (72–86 % общей численности, 68–73 % общей биомассы). В бухте Владимирской биомассу амфипод почти в равных долях определяли *M. possolskii* (55,6 %) и *G. fasciatus* (43,6 %). В бухте Далекой среди амфипод по биомассе доминировал *G. fasciatus* (58,9 %), при этом 68,5 % общей численности макробентоса приходилось на трудноразличимую молодь амфипод. Результаты исследований 2013–2014 гг. подтвердили факт натурализации байкальской амфиподы *M. possolskii* в Ладожском озере.

Исследования 2013–2017 гг. показали, что в Щучьем заливе *M. possolskii* обитает совместно с другим чужеродным видом амфипод *G. fasciatus*. В различных биотопах залива максимальная биомасса *M. possolskii* достигала 25,84 г/м<sup>2</sup>, биомасса *G. fasciatus* – 63,36 г/м<sup>2</sup>. При этом в зарослях тростника доминировал *G. fasciatus* (86–100 % биомассы амфипод), а на песчаной литорали была существенна роль *M. possolskii* (18–81 % биомассы амфипод). На станции, расположенной вблизи насыпной каменной дамбы, отделяющей южную часть залива от основной акватории, на глубинах 0,7–2 м (грунт – заиленный песок с растительными остатками) за период исследований численность амфипод колебалась от 120 до 11 720 экз./м<sup>2</sup>, биомасса от 0,35 до 29,50 г/м<sup>2</sup>, что составляло 2–74 % численности и 2–82 % биомассы всего макрозообентоса. "Численность

*M. possolskii* варьировала от 20 до 700 экз./м<sup>2</sup>, биомасса – от 0,04 до 4,76 г/м<sup>2</sup>. Плотность популяции и биомасса *G. fasciatus* менялись в более широких пределах: 40–11 260 экз./м<sup>2</sup>, 0,06–27,23 г/м<sup>2</sup>. Средние значения численности и биомассы *M. possolskii* составили  $175 \pm 31$  экз./м<sup>2</sup> и  $0,97 \pm 0,18$  г/м<sup>2</sup>, соответственно, а *G. fasciatus* –  $1418 \pm 358$  экз./м<sup>2</sup> и  $5,39 \pm 1,17$  г/м<sup>2</sup>. Относительная представленность инвазивных амфипод в составе донных биоценозов залива различна. На долю *G. fasciatus* приходилось 26–100 % численности и 3–100 % биомассы всех амфипод. *M. possolskii* вносил значительный вклад в состав амфипод (до 74 % численности и 97 % биомассы) в летний период 2013 г. В дальнейшем (с октября 2013 г.) соотношение между *M. possolskii* и *G. fasciatus* было устойчивым, доля позднее вселившегося вида снизилась и не превышала 33 % численности и 37 % биомассы. С 2016 г. отмечалось увеличение роли амфипод, их численность в сообществе макрозообентоса в среднем выросла с 13 % (2013 г.) до 27 % (2016 г.). Причем на долю *M. possolskii* приходилось до 50 % численности и до 60 % биомассы ракообразных. Значительные изменения в уровне количественного развития видов-вселенцев свидетельствуют о еще не устоявшихся взаимоотношениях между ними и указывают на продолжающуюся трансформацию экосистемы Щучьего залива, в том числе под воздействием инвазивных амфипод.

Появление в озере представителей амфипод понто-каспийского комплекса, вероятно, связано с интенсификацией судоходства, климатическими изменениями, повышенной минерализацией воды в Волховской губе. В 2006 г. в этом районе озера был встречен *P. robustoides*, а в 2009 г. – *C. curvispinum*. Работы последующих лет подтвердили успешную натурализацию данных видов в Ладожском озере и не зафиксировали их распространения за пределы Волховской губы. Зона обитания этих чужеродных амфипод пока ограничена границами Волховской губы. Уровень количественного развития этих видов (2014 г.) достаточно высок: численность находится в пределах от 13 до 11 640 экз./м<sup>2</sup> у *C. curvispinum* и от 2580 до 11 240 экз./м<sup>2</sup> у *P. robustoides*, а биомасса, соответственно, – от 0,01 до 12,21 г/м<sup>2</sup> и от 35,71 до 82,56 г/м<sup>2</sup>. При этом эти показатели для *G. fasciatus* в различных биотопах Волховской губы при совместном обитании составляют 147–10 860 экз./м<sup>2</sup> и 0,16–26,41 г/м<sup>2</sup>.

Начиная с 2003 г. в составе мейобентосной фауны Ладожского озера встречается вид-вселенец – солоноватоводная гарпактицида *N. spinipes*. Исследования 2013–2014 гг. показали, что в условиях открытой скалистой литорали в заливах шхерного района рачок не встречался. Также в 2014 г. этот вид отсутствовал в мейобентосе у о. Мантинсаари, тогда как в 2006–2009 гг. он стабильно являлся компонентом гарпактицидного сообщества. Однако в 2013–2014 гг. обнаружено присутствие этого вида в

заливе Щучьем, где раньше он не встречался. Таким образом, на основании имеющихся данных выявлено перераспределение обнаруженных мест обитания вселенца – появление его в западной и исчезновение в восточной части озера. В южной части его присутствие в последние десять лет отмечается стабильно. В ходе исследования распределения *N. spinipes* в пределах литоральной зоны, в том числе суточных изменений распределения, было обнаружено, что *N. spinipes* предпочитает находиться в зарослях рдеста пронзеннолистного. Доля данного вида в сообществе гарпактицид в летний период в данном биотопе может достигать 33 %. Распространению *N. spinipes* по озеру может способствовать способность вида совершать периодические миграции в толщу воды. На нынешнем этапе *N. spinipes* не является серьезным конкурентом для других видов мейобентоса озера. Как правило, он встречается одновременно с другими аборигенными видами гарпактицид (чаще всего с массово распространенными по всему озеру видами *Attheyella crassa* (Sars G. O.) и *Paracampytus schmeili* (Mrazek)). В некоторых биотопах виду-вселенцу не удается закрепиться, происходит его вытеснение.

При исследовании зоопланктона Ладожского озера и его притоков обнаружено два инвазивных вида, один из которых – *Kellicottia bostoniensis* (Rousselet) – имеет свое происхождение из водоемов Северной Америки, второй – *Paraegasilus rylovi* Markewitsch – из Северного Каспия. *K. bostoniensis* также зарегистрирована нами в Охтинском водохранилище. Коловратка была обнаружена в зоопланктонных пробах всех сезонов на 17 станциях в 2 озерах (Ладожское, Онежское) и 6 реках (Свирь, Вуокса, Морье, Тулокса, Вытегра, Нева). Первоначально считалось, что коловратка предпочитает чистые минерализованные водоемы, однако находки *K. bostoniensis* в водоемах различной степени минерализации и качества вод не подтверждают этого предположения. В прибрежной зоне водоемов коловратка может занимать различные биотопы, а в пелагиали обитать на разных горизонтах. В 2011 и 2012 г. *K. bostoniensis* зарегистрирована на всей акватории Волховской губы, в 2013 г. она отмечена в центральной части Ладожского озера. Эпизодическое появление коловратки в планктоне, ее незначительное количественное развитие (0,1–34 тыс. экз./м<sup>3</sup>) свидетельствуют о неустойчивом положении данного чужеродного вида в Ладожском озере. В то же время для некоторых рек (Морье, Тулема, Вуокса, Свирь) вид уже является постоянным элементом фауны, но не выходит на доминирующий уровень. В теплое время года имеет устойчивые популяции в литоральной зоне Ладоги, но не оказывает значительного влияния на количественное развитие зоопланктона. Благодаря водному транспорту продолжает расселяться в водоемах европейской части России.

Второй зоопланктонный вселенец в Ладожском озере – *P. rylovi* – впервые был обнаружен на прибрежном мелководье Волховской губы в июле 2011 г. В июле 2012 и 2013 гг. он также присутствовал в пробах зоопланктона. Популяция была представлена копеподами и самцами и была малочисленной – 20 экз./м<sup>3</sup>.

Исследования перифитона Ладоги позволили выявить 22 ранее не обнаруженных вида: *Amphora fagediana* Krammer, *Aneumastus minor* Lange-Bertalot, *A. tusculus* (Ehrenb.) Mann & Stickle in Round, Crawford & Mann, *Ctenophora pulchella* (Ralfs ex Kützing) D. M. Williams & Round, *Didymosphenia geminata* (Lyngb.) Schmidt, *Encyonopsis subminuta* Krammer & Reichardt, *Gomphonema minutum* (Ag.) Ag., *Karayevia clevei* (Grunow) Round et Bukhtiyarova, *Luticola mutica* (Kützing) Mann, *Navicula tripunctata* (O. F. Müller) Bory, *Nitzschia acicularis* (Kützing) W. Smith, *N. clausii* Hantzsch, *N. paleacea* Grunow, *N. pusilla* Grunow, *Placoneis clemensis* (Grunow) Cox, *Plagiotropis lepidoptera* (Greg.) Kuntze, *Planothidium dubium* (Grunow) Round et Bukhtiyarova, *P. frequentissimum* (Lange-Bertalot) Round et Bukhtiyarova, *Psammothidium bioretii* (Germain) Round et Bukhtiyarova, *Pseudostaurosira parasitica* (W. Smith) Morales, *Tabularia fasciculata* (Agardh) Williams & Round и *Tryblionella levidensis* W. Smith. Многие из них отличаются повышенными требованиями к минерализации воды, приводятся в списках диатомей Балтийского моря [Snoeijs, Potarova, 1995] и могут считаться инвазивными видами. Среди наиболее обильных и часто встречаемых инвазивных диатомей Ладожского озера три вида – *D. geminata*, *G. minutum* и *P. lepidoptera*.

Наши данные показывают, что из чужеродных видов высшей водной растительности в Ладожском озере наибольшее значение имеют элодея канадская (*Elodea canadensis* Michx.) и рдест гребенчатый (*Potamogeton pectinatus* L.). В Ладожском озере элодея канадская имеет довольно широкое распространение (включая Валаамский архипелаг). На илистой литорали вид может формировать как монодоминантные, так и смешанные растительные ассоциации, часто произрастая совместно с рдестом травянистым, урутью очередноцветковой и урутью колосистой. Фитомасса элодеи канадской может достигать 32 г сух. в./м<sup>2</sup> (бухта Владимирская), а относительное участие в проективном покрытии литорали, как правило, не превышает 15 %. Степень развития и пространственное распределение элодеи канадской на литорали Ладожского озера обусловлены, прежде всего, морфологическими особенностями прибрежий, динамикой вод и характером донных отложений. Наиболее благоприятные сочетания этих факторов для развития элодеи канадской имеются в скрытых от волнобоя заливах и бухтах на илистых и мелкопесчаных грунтах. Сравнительный анализ современной пространственной структуры гидрофильной

растительности показывает, что элодея канадская не оказывает негативного влияния на аборигенную растительность. На примере межгодовой динамики структуры сообщества водных растений в Волховской губе выявлено увеличение обилия и распространения инвазивных видов макрофитов, таких как рдест гребенчатый (*P. pectinatus*) и рогоз узколистый (*Tupha angustifolia* L.).

Проведенные исследования показывают, что инвазионный процесс, выражающийся в проникновении чужеродных гидробионтов в водные экосистемы Северо-Запада европейской части РФ, в том числе в крупнейшее европейское озеро Ладожское, в последнее время протекает весьма интенсивно, и в ближайшие годы могут произойти серьезные экосистемные трансформации. Многие виды-вселенцы натурализуются в новых для них местообитаниях. Однако не все из них оказывают значимое влияние на аборигенные сообщества и трансформируют экосистемные потоки вещества и энергии, а также трофические взаимосвязи между отдельными компонентами биоценозов. В этом отношении наиболее значимое влияние оказывают чужеродные виды амфипод, функционирование популяций которых и расселение по новым биотопам и водоемам ведет к значительным экосистемным изменениям. В то же время полученные результаты показали отсутствие существенного отрицательного влияния вселенцев на разнообразие аборигенных сообществ гидробионтов озера в целом. Скорее, можно говорить об обогащении биоразнообразия за счет вселившихся видов, которые иногда могут оказывать даже мелиоративный эффект, повышая разнообразие и количественное развитие литоральных сообществ. Имеющиеся факты позволяют говорить о том, что вселившиеся в Ладогу виды занимают экологические ниши, в незначительной степени перекрывающиеся с таковыми аборигенных видов, например, по трофическим ресурсам. Оценка реальных последствий биологических инвазий в Ладоге и близком по генезису Онежском озере должна быть индивидуальна для каждого водоема с обязательным изучением биологии и экологии вселившихся видов.

Практические мероприятия по предупреждению и контролю биологического загрязнения водных экосистем Северо-Запада европейской части РФ в условиях глобализации экономики и изменений климата могут носить только превентивный характер и требуют принятия срочных, обязательных и согласованных мер как на национальном, так и международном уровне.

### Литература

Барбашова М. А., Малявин С. А., Курашов Е. А. Находка байкальской амфиподы *Micruropus possolskii* Sowinsky, 1915 (Amphipoda, Crustacea) в Ладожском озере // Рос. журн. биологических инвазий. 2013. № 3. С. 16–23.

В Финском заливе обнаружены новые виды чужеродных организмов. 2015. URL: <http://www.infoeco.ru/index.php?id=1636>.

Дудакова Д. С. Инвазия солоноватоводной гарпактициды *Nitocra spinipes* (Воеск, 1865) (Crustacea: Soropoda: Harpacticoida) в Ладожское озеро // Рос. журн. биологических инвазий. 2011. № 4. С. 2–16.

Курашов Е. А., Барков Д. В., Русанов А. Г., Барбашова М. А. Роль *G. fasciatus* в формировании трансграничного потока вещества и энергии в литоральной зоне Ладожского озера // Литоральная зона Ладожского озера / Под ред. Е. А. Курашова. СПб.: Нестор-История, 2011. С. 350–356.

Курашов Е. А., Барбашова М. А., Барков Д. В. и др. Инвазивные амфиподы как фактор трансформации экосистемы Ладожского озера // Рос. журн. биологических инвазий. 2012. Т. 5, № 2. С. 87–104.

CBD: Invasive Alien Species. 2017. URL: <https://www.cbd.int/invasive>.

Noeijis P., Potapova M. Intercalibration and distribution of diatom species in the Baltic Sea // The Baltic Marine Biologist Publication 3. Opulus Press, Uppsala, 1995. 126 p.

## THE ROLE OF ALIEN SPECIES IN THE TRANSFORMATION OF LAKE LADOGA ECOSYSTEM

E. A. Kurashov, M. A. Barbashova, A. G. Rusanov, D. S. Dudakova,  
M. S. Trifonova, N. V. Rodionova, D. G. Alezhina

*Institute of Lake Research, Russian Academy of Sciences, St. Petersburg*

The current distribution of alien species in Lake Ladoga and their role in the transformation of the lake's ecosystem are presented.

## ПИТАНИЕ РЕЧНОГО ОКУНЯ (*PERCA FLUVIATILIS* L.) В ЗОНЕ ФОРЕЛЕВОГО ХОЗЯЙСТВА КОНДОПОЖСКОЙ ГУБЫ ОНЕЖСКОГО ОЗЕРА

М. А. Лесонен, Ю. А. Шустов

*Петрозаводский государственный университет*

Представлен сравнительный анализ питания речного окуня (*Perca fluviatilis* L.) в зоне форелевого хозяйства Кондопожской губы Онежского озера. Выявлено, что в зоне садков речной окунь в большей степени потребляет рыбу из семейства окуневых и карповых, а в 100–200 м от садков в питании окуня доминирующее значение имеют бентосные организмы, это различные насекомые, чаще личиночные стадии. Установлено, что у речного окуня, питающегося у садков, индекс наполнения желудка был выше. Таким образом, результаты уловов и анализ содержимого желудка показали, что питание окуня у садков весьма разнообразно. Эти показатели объясняются большей долей в пище окуня именно рыбы.

## Материалы и методы

Исследования проводились весной, летом и осенью 2016 г. в Кондопожской губе Онежского озера, в 8 км от деревни Тулгуба – губа Вазарукса (Кондопожский район Республики Карелия), где с 2009 г. действует форелевое хозяйство ИП «Апроду» мощностью 400 т (РБО – до 400 т). От материка, основного берега, до скалистого острова 1 км. Садки расположены непосредственно в горловой части залива, где глубина не менее 15 м. Обследования проводились в непосредственной близости у садков (станция 1); в 100–200 м северо-западнее садков (станция 2).

Вылов рыбы проводился осенью, летом и весной 2016 г. с помощью донных удочек с подсадкой дождевых червей и спиннинга с использованием вращающихся блесен № 1 и 2 около садков и с помощью сетей с ячеей от 22 до 26 мм, которые устанавливались на расстоянии 100–200 м от садков.

Рыбу вылавливали два раза в сутки (утром и вечером). Затем рыбу на месте измеряли, взвешивали, извлекали желудок, этикировали и сразу фиксировали 4 % раствором формалина [Правдин, 1966]. Камеральная обработка проводилась согласно традиционным, а также современным методам исследования питания рыб в естественных условиях [Попова, Решетников, 2011]. Пищевой комок извлекали из желудка рыбы для определения общего индекса наполнения. Подсчитывалось количество организмов (N) – общее и для основных кормовых объектов. Определялась встречаемость (F) и доля основных кормовых объектов от массы всего корма (P). Для характера спектра питания использовали «индекс относительной значимости» (IR – index of relative significance), вычисляемый по формуле 1.

$$IR = \left( \frac{F_i P_i}{\sum F_i P_i} \right) \times 100 \%,$$

где  $F_i$  – частота встречаемости каждого вида корма,  $P_i$  – доля по массе,  $i$  – меняется от 1 до  $n$  ( $n$  – число видов кормовых организмов в пищевом комке) [Первозванский, 1986].

В последние годы этот индекс обязательно применяется во всех исследованиях по питанию рыб в естественных условиях. Например, Р. Р. Рафиков [2016] применял «индекс относительной значимости» при анализе питания рыб искусственных водоемов на территории Республики Коми. Общий индекс наполнения желудка рассчитывался в проциментах ( $^0/_{000}$ ), как отношение веса пищи (мг) к весу рыбы (г), умноженное на величину 10.

## Результаты и обсуждение

Многочисленные исследования показали, что окунь следует рассматривать как вид со смешанным типом питания. Изучение содержимого желудков окуня в зоне форелевого хозяйства показало, что как у садков, так и в 100–200 м от них в желудках рыб присутствовала рыба из семейства карповых и окуневых, а также набор организмов бентоса, зоопланктона и воздушные насекомые (табл. 1–2). Несмотря на большое разнообразие кормовых объектов (видов и форм) в питании окуня, их число в среднем все же не превышает одного организма (N, экз.) как в речных, так и в озерных условиях.

**Таблица 1. Питание речного окуня в Онежском озере, 100–200 м от садков, по сезонам 2016 г.**

Показатели	Онежское озеро (100-200 м от садков)											
	май-июнь (весна) 2016 года				июль-август (лето) 2016 года				сентябрь (осень) 2016 года			
	N	F	P	IR	N	F	P	IR	N	F	P	IR
Состав пищи												
Зоопланктон:												
Cladocera	< 1	19	12	16	< 1	13	8	8,3	-	-	-	-
Copepoda	< 1	15	2	2,1	< 1	10	1	1	-	-	-	-
Бентос:												
Asellus aquaticus	< 1	19	5	7	< 1	3	1	0,2	< 1	15	12	13,4
Chironomidae (L.)	< 1	12	3	2	< 1	13	12	12,4	< 1	15	11,5	13
Chironomidae (P.)	< 1	4	0,3	0,1	< 1	13	1	1	< 1	15	3	3
Coleoptera	< 1	19	14	18,4	< 1	10	10	8	< 1	8	4	2,3
Ephemeroptera (N.)	< 1	4	1	0,2	< 1	5	5	2	< 1	23	16	28
Heleidae	-	8	0,6	0,3	< 1	5	0,3	0,1	< 1	15	1	1,1
Mollusca	< 1	19	17	22,3	< 1	15	12	14	-	-	-	-
Odonata (L.)	< 1	12	13	11	< 1	3	3	0,7	-	-	-	-
Trichoptera	-	8	11,1	6,1	< 1	-	-	-	< 1	15	15	17
Воздушные насекомые	< 1	12	16	13,2	< 1	18	21,7	31	< 1	8	12,5	7,4
Рыба	< 1	-	-	-	< 1	3	3	0,7	-	-	-	-
Рыба (Карповые)	< 1	-	-	-	< 1	-	-	-	< 1	8	12,5	7,4
Рыба (Окунь)	< 1	-	-	-	< 1	13	15	15,6	-	-	-	-
Рыба (Сильно переваренная)	< 1	4	5	1,3	< 1	8	7	5	< 1	8	12,5	7,4
Длина рыбы M (lim), см	14,3 (9,3 - 17,1)				16 (10,2 - 22,2)				14,7 (10,2 - 20)			
Вес рыбы M (lim), г	27 (14 - 60)				24 (12 - 48,1)				22 (10,9 - 45,4)			
Пустые желудки, %	8				5				10			
Индекс наполнения M (lim), %	67 (69 - 162)				108,7 (81 - 600)				93 (66 - 221)			
n, экз.	26				39				26			
Возраст	от 2+ до 8+				от 2+ до 11+				от 2+ до 9+			

*Примечание.* Здесь и в табл. 2: F, % – частота встречаемости кормового объекта; P, % – доля каждого компонента по массе; IR, % – индекс относительной значимости; N, экз. – число пищевых организмов; L. – личинки; P. – куколки; N. – нимфы.

В питании окуня в 100–200 м от садков в весенний, летний и осенний периоды по частоте встречаемости кормовых объектов (F, %) преобладают бентосные организмы. В весенний и летний периоды вторым по частоте встречаемости кормовым объектом был зоопланктон,

больше попадались представители клadoцеры (*Bosmina*, *Daphniacristata*), в небольшом количестве встречались копеподы (*Cyclops*). Второстепенными по частоте встречаемости оказались воздушные насекомые и рыба. Рыба в желудке окуня в основном попала уже сильно переваренная (табл. 1).

Основным видом корма окуня на участке 100–200 м от садков был бентос, его доля по массе в весенний период составила 65 %, в летний – 44,3 %, в осенний – 62,5 %. Немаловажную роль в питании окуня играет рыба, ее доля по массе в летний и осенний периоды составила 25 %, а весной – 5 %; в желудке рыба была уже переварена. Такие кормовые объекты, как воздушные насекомые, наибольшую долю по массе составили летом (21,7 %) и весной (16 %), наименьший показатель – осенью (12,5 %). Доля зоопланктона в весенний период составила 14 %, в летний – 9 %, а осенью в питании окуня зоопланктон отсутствует.

Имеются отличия и в объеме потребления пищи окуня в весенний, летний и осенний периоды. Так, нами установлено, что в 100–200 м от садков в летний период существенно более высокая накормленность окуней – в среднем  $108,7 \text{ ‰}$  при колебаниях от 81 до  $600 \text{ ‰}$ , в осенний период индекс наполнения ниже – в среднем  $93 \text{ ‰}$  и варьирует от 66 до  $221 \text{ ‰}$ . В весенний период индекс еще ниже, в среднем  $67 \text{ ‰}$  при колебаниях от 69 до  $162 \text{ ‰}$ .

В питании окуня у садков в весенний период доминирующим объектом питания была рыба (окунь, ерш, карповые), в летний и осенний периоды преобладал бентос. В зоопланктоне преобладали представители клadoцеры (*Bosmina*, *Daphniacristata*), в небольшом количестве встречались копеподы (*Cyclops*). Менее значимыми оказались воздушные насекомые (табл. 2).

Основным видом корма у садков Онежского озера был бентос, его доля по массе составила весной 29 %, летом – 43,9 %, осенью – 48 %. Наибольшая доля рыб по массе в питании окуня в весенний период составила 52 %, окунь поедает окуней (14 %), ерша (12 %) и представителей из семейства карповых (13 %). Доля переваренной рыбы составила 13 % по массе, в летний период – 38,8 %; в осенний период – 34 %. Зоопланктон был в питании окуня второстепенным кормовым объектом: его доля по массе составила весной 13 %, летом – 12,5 %, осенью – 12 %. Наименьший показатель в питании окуня у воздушных насекомых: 6 % весной, 4,8 % летом и 6 % осенью.

Также имеются отличия и в объеме потребления пищи окуня у садков в весенний, летний и осенний периоды. Так, нами установлено, что в весенний период высокая накормленность – в среднем  $221,5 \text{ ‰}$  при

колебаниях от 47 до 1286 ‰, в летний период индекс наполнения ниже – в среднем 103 ‰ и варьирует от 43 до 442 ‰. В осенний период индекс ниже, в среднем составляет 98 ‰ при колебаниях от 32 до 303 ‰. Следует отметить, что индекс накормленности окуня, выловленного у садков, уменьшается от весны к осени.

**Таблица 2. Питание речного окуня в зоне садков Онежского озера по сезонам 2016 г.**

Показатели	Онежское озеро (в зоне садков)											
	май-июнь (весна) 2016 года				июль-август (лето) 2016 года				сентябрь (осень) 2016 года			
Состав пищи	N	F	P	IR	N	F	P	IR	N	F	P	IR
Зоопланктон:												
Cladocera	< 1	17	11	15	< 1	15	9	13	< 1	36	9	20
Copepoda	< 1	8	2	1	< 1	8	3,5	3	< 1	5	3	1
Бентос:												
Asellus aquaticus	< 1	3	2	0,5	< 1	8	4,8	4	< 1	10	7	4
Chironomidae (L.)	< 1	3	1	0,2	< 1	10	5,7	6	< 1	13	7	6
Chironomidae (P.)	< 1	3	1	0,2	< 1	10	3	3	< 1	13	3	2
Coleoptera	< 1	6	5	2	< 1	10	6	6	< 1	10	7	4
Ephemeroptera (N.)	< 1	11	4	3,6	< 1	15	9	13	< 1	31	21	39,6
Heleidae	-	-	-	-	< 1	5	0,4	0,2	< 1	10	0,5	0,3
Mollusca	< 1	3	1	0,2	< 1	3	2	0,6	< 1	3	2	0,4
Odonata (L.)	< 1	11	15	13,3	< 1	8	9	7	< 1	3	0,5	0,1
Trichoptera	-	-	-	-	< 1	5	4	2				
Воздушные насекомые	< 1	8	6	4	< 1	5	4,8	2	< 1	8	6	3
Рыба:	< 1											
Ерш	< 1	12	12	13	< 1	3	4	1,2	< 1	8	8	3,9
Карповые	< 1	12	13	13	< 1	10	12,8	13	< 1	13	13	10,3
Окунь	< 1	17	14	18	< 1	13	18	23	< 1	8	8	3,9
Сильно переваренная	< 1	15	13	16	< 1	8	4	3	< 1	5	5	1,5
Длина рыбы M (lim), см	14,7 (10 - 25,5)				15 (9,5 - 22)				15 (9,8 - 23,8)			
Вес рыбы M (lim), г	39 (9,8 - 238)				48 (12 - 100)				35 (10 - 100)			
Пустые желудки, %	11				10				3			
Индекс наполнения M (lim), ‰	221,5 (47 - 1286)				103 (43 - 442)				98 (32 - 303)			
п. экз.	65				39				39			
Возраст	от 2+ до 7+				от 2+ до 7+				от 2+ до 7+			

## Выводы

На основании сравнительного анализа питания речного окуня в разные сезоны года (весна, лето, осень) у садков и в 100–200 м от садков установлено, что у садков в весенний период окунь в большей степени потреблял рыбу, а летом и осенью – организмы бентоса и рыбу. В 100–200 м от садков в питании окуня доминирующее значение имеют бентосные организмы. Установлено, что наибольшие индексы накормленности у окуня, отловленного около садков. Эти показатели объясняются тем, что в питании окуня большая доля именно рыбы (окунь, ерш, карповые).

## Литература

Первозванский В. Я. Рыбы водоемов района Костомукшского железорудного месторождения (экология, воспроизводство, использование). Петрозаводск: Карелия, 1986. 216 с.

Попова О. А., Решетников Ю. А. О комплексных индексах при изучении питания рыб // Вопросы ихтиологии. 2011. Т. 51, № 5. С. 712–717.

Правдин И. Ф. Руководство по изучению рыб. М., 1966. 376 с.

Рафиков Р. Р. Формирование рыбного населения искусственных водоемов на территории Республики Коми: Автореф. дис. ... канд. биол. наук. Сыктывкар, 2016. 18 с.

### FEEDING HABITS A PERCH (*PERCA FLUVIATILIS* L.) IN THE TROUT FARMING OF THE KONDOPOGA BAY OF ONEGA LAKE

M. A. Lesonen, Yu. A. Shustov

*Petrozavodsk State University*

The comparative analysis of food of a perch (*Perca fluviatilis* L.) in the zone of the trout farm of the Kondopoga bay of Onega Lake is presented. It was revealed that in the zone of cages the river perch (*Perca fluviatilis* L.) consumes fish from the perch and carp family to a greater extent, and benthic organisms play a dominant role in the feeding of perch in 100-200 m from the cages. They are different insects, more often larval stages. It was found that the perch of the feeding of the cages had a higher filling index of the stomach. Thus, the results of the catches and analysis of the contents of the stomach showed that the feeding of perch in cages is very diverse. These figures are explained by the greater share in the food of the perch namely fish.

### НЕКОТОРЫЕ СВЕДЕНИЯ О «ЦВЕТЕНИИ» ВОДЫ ОЗЕРА СЕВАН СИНЕЗЕЛЕННЫМИ ВОДОРОСЛЯМИ

А. А. Овсепян<sup>1</sup>, Л. Р. Гамбарян<sup>1,2</sup>, А. С. Мамян<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Научный центр зоологии и гидрoэкологии НАН РА

<sup>2</sup>Ереванский государственный университет

В данной работе представлен краткий обзор о «цветении» воды оз. Севан потенциально токсичными видами синезеленых водорослей в разные периоды исследования озера. Отмечено, что впервые это негативное явление в озере, возникшее в результате бурного развития вида *Anabaena flos-aquae*, зарегистрировано в 1964 г. В дальнейшем, вплоть до 1977 г., наблюдалось «цветение» воды озера и другими видами-индикаторами эвтрофирования синезеленых водорослей – *Anabaena lemmermanii*, *Aphanizomenon flos-aquae*. При этом в течение последнего десятилетия нами периодически в разных частях озера регистрировалось аналогичное явление, связанное с такими видами, как *Aphanizomenon flos-aquae* и *Anabaena flos-aquae*.

Общеизвестно, что «цветение» воды – это биологический сигнал неблагоприятия в гидросфере, последствие антропогенного эвтрофирования водоемов, при этом значительно увеличиваются вторичное загрязнение и заиление водоема. Явление «цветения» синезелеными микроводорослями приобрело глобальный характер в условиях продолжающегося антропогенного загрязнения водных объектов. Во время «цветения» синезеленых микроводорослей в летне-осенний период в озерах и водохранилищах создается обстановка, которую можно характеризовать как чрезвычайную ситуацию, связанную с жизнедеятельностью водной биоты [Легович, 1979; <http://www.findpatent.ru/patent/235/2350569.html>; <http://www.biofine.ru/bfins-1050-8.html>; <http://ivdon.ru/magazine/archive/n4p2y2012/1289>].

Это негативное явление в оз. Севан (которое состоит из двух частей: более глобоководной – Малого Севана и сравнительно мелководной – Большого Севана) стало результатом необоснованного и длительного антропогенного воздействия на лимносистему [Легович, 1979]. С 1964 г. до 2-й половины 1970-х гг. «цветение» индикаторными видами эвтрофирования (*Anabaena flos-aquae*, *A. lemmermanii*, *Aphanizomenon flos-aquae*) синезеленых водорослей было повторяющимся явлением в оз. Севан [Легович, 1979; Парпаров, 1979]. До 1964 г. в озере данные виды обнаружены не были, что являлось одной из характерных черт естественного режима водоема [Владиминова, 1947; Стройкина, 1952; Мешкова, 1962].

В современный период, когда ведутся планомерные работы по повышению уровня воды озера с целью восстановления его естественного режима, помимо некоторых изменений в фитопланктонном сообществе, в пелагическом и/или прибрежных частях озера периодически наблюдается «цветение» синезелеными водорослями. Так, в 2006 г. в пелагической части Малого Севана регистрировалось «цветение» видом-эвтрофикатором *Aphanizomenon flos-aquae*, который впервые в озере был обнаружен в 1974 г. и вызвал бурное «цветение» [Парпаров, 1979]. Показатель численности фитопланктона в 2006 г. в поверхностном слое воды превышал 24 млн кл./л, подавляющее большинство (23,5 млн) которого выпало на долю *A. flos-aquae*. Позже, в 2010 г., в прибрежной зоне близ Чаечего острова нами регистрировалось «цветение» видом *Anabaena flos-aquae*, во время которого численность этого вида в поверхностном слое в литре воды достигала нескольких десятков миллионов клеток [Овсепян и др., 2010; Овсепян, 2013]. Кроме этого, по визуальным оценкам и устному общению специалистов ихтиологической экспедиции, в прибрежных районах озера «цветение» синезелеными водорослями носит периодический характер.

Следующий случай массового развития синезеленых водорослей в пелагиали озера наблюдался в октябре 2016 г. в Большом Севане, «цветение» инициировал вид *Anabaena flos-aquae*. В небольших количествах встречался также другой представитель этого рода – *A. circinalis*. Основная масса водорослей, как это присуще водоемам при «цветении», была сконцентрирована в верхних слоях воды – около 3 млн кл./л, из которых 2,6 млн кл./л – вклад *Anabaena*, в то время как средняя ее численность в столбе воды равнялась 750 тыс. кл./л. По всей видимости, нам не удалось проследить пик «цветения», о чем могут свидетельствовать полученные нами сравнительно не очень высокие количественные показатели, в то же время по визуальной оценке участников ихтиологической экспедиции в сентябре в том же районе озера поверхностный слой воды был полностью покрыт густой зеленой пленкой. Аналогичная картина в тот же период наблюдения регистрировалась и в прибрежных районах Большого Севана, причиной также являлся вид *Anabaena flos-aquae*. Примечательно также, что в другой части озера «цветение» не было зарегистрировано, а *A. flos-aquae* встречался эпизодически и не играл значимой роли в сообществе.

Таким образом, периодическое «цветение» воды оз. Севан видами-эвтрофикаторами синезеленых водорослей может служить сигналом неблагоприятного экологического состояния водоема в период 1960–1970-х гг. (высокопродуктивные годы), а также в течение последнего десятилетия (период повышения уровня воды). Можно предположить, что это реакция на многолетние колебания уровня воды озера, в результате чего происходят динамичные изменения как в его абиотическом, так и биотическом компоненте, что, в свою очередь, ведет к дестабилизации гидроэкосистемы.

Работа проведена в рамках программы «Исследование пресноводных экосистем Армении и Белорусии, имеющих национальную ценность (озеро Севан – Армения и озеро Нарочь – Беларусь) в условиях изменения климата», 2016 г.

### Литература

- Владимирова К. С. Фитопланктон оз. Севан // Тр. СГБС. 1947. Т. 9. С. 69–109.
- Легович Н. А. О «цветении» воды оз. Севан // Экология гидробионтов озера Севан. Ереван, 1979. № 17. С. 51–74.
- Мешкова Т. М. Современное состояние планктона в озере Севан // Тр. СГБС. 1962. Т. 16. С. 15–88.
- Овсепян А. А. Изменения фитопланктонного сообщества в условиях повышения уровня воды озера Севан: Дис. ... канд. биол. наук. Ереван, 2013. 149 с.
- Овсепян А. А., Гамбарян Л. Р., Оганесян Р. О., Гусев Е. С. Планктонные водоросли озера Севан // Экология озера Севан в период повышения его уровня. Махачкала: Наука ДНЦ, 2010. С. 90–104.

Парпаров А. С. Первичная продукция и содержание хлорофилла «а» в фитопланктоне оз. Севан // Экология гидробионтов озера Севан. Ереван, 1979. № 17. С. 89–99.

Стройкина В. Г. Фитопланктон пелагиали озера Севан // Тр. СГБС. 1952. Т. 18. С. 171–212.

<http://www.findpatent.ru/patent/235/2350569.html>.

<http://www.biofine.ru/bfins-1050-8.html>.

<http://ivdon.ru/magazine/archive/n4p2y2012/1289>.

## SOME INFORMATION ABOUT BLUE-GREEN ALGAL BLOOMS IN LAKE SEVAN

A. A. Ovsepyan<sup>1</sup>, L. R. Gambaryan<sup>1,2</sup>, A. A. Mamyan<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Scientific Center of Zoology and Hydroecology, National Academy  
of Sciences of Armenia

<sup>2</sup>Erevan State University

In this paper, a brief review of Lake Sevan water bloom with potentially toxic species of blue-green algae in different periods of the lake investigation is presented. It is noted that, for the first time, this negative phenomenon in the lake was recorded in 1964 as a result of the rapid development of the species *Anabaena flos-aquae*. Later, until 1977, lake water bloom with other eutrophication indicating blue-green algae species such as *Anabaena lemmermanii*, *Aphanizomenon flos-aquae* was observed. Herewith, during the last decade, our investigations on the lake have periodically recorded a similar phenomenon in different parts of the lake, initiated by the species *Aphanizomenon flos-aquae* and *Anabaena flos-aquae*.

## РОЛЬ ИНВАЗИОННОЙ АМФИПОДЫ *GMELINOIDES FASCIATUS* (STEBBING) НА РАЗНЫХ ТИПАХ ЛИТОРАЛИ ОНЕЖСКОГО ОЗЕРА

А. И. Сидорова

Институт водных проблем Севера КарНЦ РАН

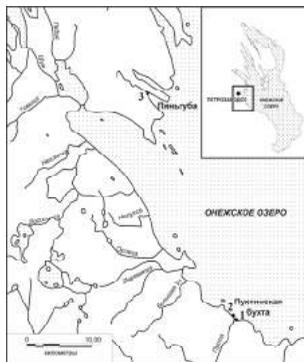
Инвазионный вид *Gmelinoides fasciatus* в последние десятилетия успешно натурализовался на всех типах литорали Онежского озера. Полученные нами результаты мониторинга в течение двух лет показывают, что среди трех типов литорали (песчаном, каменистом и зарослевом) максимальные значения биомассы чужеродного вида отмечены на каменистой литорали (3,4–6,6 г/м<sup>2</sup>), минимальные – на песчаной (0,1–0,2 г/м<sup>2</sup>). На каменистом типе биотопа *G. fasciatus* доминирует как по численности, так и по биомассе.

В связи с глобализацией с середины XX в. увеличивается число биологических инвазий [Strayer, 2010]. Чужеродные виды, согласно конвенции по биоразнообразию, являются второй по значимости угрозой, после

разрушения мест обитания видов [Алимов и др., 2004; Schlaepfer et al., 2010]. Онежское озеро находится под влиянием инвазии байкальской амфиподы *Gmelinoides fasciatus* (Stebbing 1899), в связи с этим возникает необходимость изучения роли инвазионного вида в сообществе донных организмов на разных типах литорали водоема-реципиента. Целью работы являлось исследование таксономического состава и обилия макрозообентоса на каменистой, песчаной и зарослевой литорали Онежского озера, в том числе доли инвазионного вида *G. fasciatus*.

### Материалы и методы

Исследования макрозообентоса проводили в прибойной незарастающей литорали в Пухтинской бухте в 2013 и 2014 гг. на станции 1 (каменистый биотоп) и на станции 2 (гравийно-песчаный биотоп) (рис.). Третья мониторинговая станция в Пиньгубе расположена в прибойной зоне с зарослями высшей водной растительности, здесь пробы были отобраны в 2014 г. На всех мониторинговых станциях в Пухтинской бухте и в Пиньгубе были выполнены сезонные съемки в период с мая по октябрь с периодичностью 1 раз в 14 дней, при средней глубине 0,4 м. Отбор проб производили модифицированным пробоотборником Панова-Павлова площадью захвата 707 см<sup>2</sup> и высотой 0,45 м [Панов, Павлов, 1986; Методические рекомендации..., 2005]. Всего собрано в 2013 г. 23 пробы, в 2014 г. – 33 пробы.



**Карта-схема расположения станций отбора проб в Онежском озере**

### Результаты и обсуждение

Результаты показали, что на мониторинговой станции 1 в 2013 г. в течение вегетационного сезона средняя численность макрозообентоса составила 7,6 тыс. экз./м<sup>2</sup>, при средней биомассе 6,6 г/м<sup>2</sup>. В 2014 г. средняя численность снизилась до 2,5 тыс. экз./м<sup>2</sup>, при средней биомассе 3,4 г/м<sup>2</sup> (табл. 1). Полученные нами данные согласуются с результатами Т. Д. Слепухиной [1975], автор указывает, что наивысший уровень развития бентоса без макрофитов наблюдали на валунах и крупных камнях литорали Онежского озера.

Как видно из полученных нами материалов, макрозообентос литоральной каменистой зоны озера достаточно разнообразен и представлен основными группами донных беспозвоночных. При далеко неполной

Таблица 1. Таксономическая структура и количественные характеристики сообществ макрозообентоса на приборной каменистой литорали (станция 1) Пухтинской бухты Онежского озера в 2013 и 2014 гг.

Таксон	2013 г.			2014 г.			2013 г.			2014 г.			2013 г., f, %	2014 г., f, %
	Численность		%	Численность		%	Биомасса		%	Биомасса		%		
	экз./м <sup>2</sup>	п		экз./м <sup>2</sup>	п		мг/м <sup>2</sup>	п		мг/м <sup>2</sup>	п			
Amphipoda	5920	2438	78	1328	322	52	5650	603	85	3040	628	90	100	100
Oligochaeta	366	129	5	95	38	4	37	16	1	4	2	0	90	82
Chironomidae	916	487	12	120	44	5	73	20	1	58	41	2	100	82
Gastropoda	101	36	1	0	0	0	714	373	11	0	0	0	80	0
Hydracarina	96	40	1	0	0	0	17	8	0	0	0	0	60	0
Turbellaria	4	4	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	10	0
Diptera, прочие	4	3	0	3	2	0	3	2	0	0	0	0	30	18
Ephemeroptera	99	34	1	170	97	7	39	13	1	90	39	3	70	82
Trichoptera	64	29	1	50	29	2	61	24	1	88	74	3	70	64
Coleoptera	13	7	0	0	0	0	9	7	0	0	0	0	40	0
Hirudinea	1	1	0	1	1	0	28	28	0	0	0	0	10	9
Plecoptera	3	2	0	5	2	0	2	1	0	10	9	0	30	36
Hydrozoa	8	6	0	777	616	30	5	4	0	107	90	3	30	64
Всего	7596	3216	100	2549	1151	100	6638	1099	100	3397	883	100		

Примечание. Здесь и в табл. 2–3: п – стандартная ошибка; f – частота встречаемости.

видовой обработке в его составе идентифицировано 13 групп различного таксономического ранга в 2013 г. Наиболее многочисленными группами в течение двух лет исследования являлись ракообразные, личинки хирономид, малощетинковые черви и личинки амфибиотических насекомых – поденок, ручейников.

Важно отметить, что для условий данной станции (прибойная каменистая литораль) доминирующей группой в течение двух лет наблюдений, как по численности (52–78 % от общей численности), так и по биомассе (85–90 % от общей биомассы) являлись амфиподы, представленные одним видом-вселенцем *Gmelinoides fasciatus*.

Как показали наши наблюдения и в 2013, и 2014 г., в течение вегетационного сезона динамика численности основных групп донных организмов на каменистой литорали имеет два пика: в конце июня и в конце июля – начале сентября. В 2013 г. максимальные значения численности были зафиксированы в конце июня – 29 тыс. экз./м<sup>2</sup>, когда основную долю составила группа ракообразных (26,5 тыс. экз./м<sup>2</sup>). Амфипода *G. fasciatus* доминировала по численности в биоценозе, достигая 50–91 % от общей численности всех групп организмов. Исключение составляет период начала августа, когда роль хирономид возросла – 5,5 тыс. экз./м<sup>2</sup>, или 55 %, при общей численности макрозообентоса 9,2 тыс. экз./м<sup>2</sup>. Минимальные значения численности макрозообентоса отмечены в конце июля – 1,5 тыс. экз./м<sup>2</sup>, что, возможно, связано с влиянием волн. В 2014 г. наибольшие показатели численности достигали 10,1 тыс. экз./м<sup>2</sup> в конце июля, при этом основной вклад составили Hydrozoa – 6,8 тыс. экз./м<sup>2</sup>. В это время доля амфипод была наименьшей в течение сезона (20 % от общей численности). Минимальные значения численности макрозообентоса зафиксированы в середине июля – 0,2 тыс. экз./м<sup>2</sup>.

Динамика биомассы на данной станции в 2013 и 2014 гг., как и изменение численности, имеет два пика (конец июня и август – начало сентября). Так, в 2013 г. максимальная биомасса в течение вегетационного сезона составила 12,3 г/м<sup>2</sup> в конце июня, минимальная – 3,6 г/м<sup>2</sup> в конце июля. В 2014 г. наибольшие значения биомассы отмечены на последней декаде августа, наименьшие – в середине июля, 6,4 г/м<sup>2</sup> и 0,2 г/м<sup>2</sup>, соответственно. В вегетационные периоды двух лет исследования с середины мая до первой декады октября по биомассе доминировала амфипода *G. fasciatus*, достигая в 2013 г. 70–100 %, в 2014 г. 38–100 % от общей биомассы донных гидробионтов.

*Прибойная гравийно-песчаная литораль Пухтинской бухты Онежского озера (станция 2).* Согласно полученным нами данным, на мониторинговой станции 2 на открытой гравийно-песчаной литорали количественные характеристики макрозообентоса были самыми низкими среди

Таблица 2. Таксономическая структура и количественные характеристики сообществ макрозообентоса на прибойной песчаной литорали (станция 2) Духтинской бухты Онежского озера в 2013 и 2014 гг.

Таксон	2013 г.		2014 г.		2013 г.		2014 г.		2013 г., f, %	2014 г., f, %
	Численность		Численность		Биомасса		Биомасса			
	экз./м <sup>2</sup>	%	экз./м <sup>2</sup>	%	мг/м <sup>2</sup>	%	мг/м <sup>2</sup>	%		
Amphipoda	96	93	57	40	199	92	63	43	70	45
Oligochaeta	1	1	8	4	9	0	1	0	1	10
Chironomidae	6	6	6	3	8	3	1	0	1	30
Hydrozoa	0	0	10	9	12	0	1	1	1	0
Diptera, прочие	0	0	3	3	3	0	0	0	0	0
Сальпютеры	0	0	1	1	2	0	15	15	19	0
Всего	103	100	85	59	100	202	81	60	100	100

изучаемых типов биотопов. Так, в течение двух лет исследований средняя численность донных организмов составила 103 экз./м<sup>2</sup> в 2013 г. и 85 экз./м<sup>2</sup> в 2014 г., при средней биомассе 202 и 81 мг/м<sup>2</sup>, соответственно (табл. 2). Согласно литературным данным, для песков литорали Онежского озера Б. М. Александров [1962] указывает средние биомассы бентоса 0,05–0,3 г/м<sup>2</sup>, Т. Д. Слепухина [1975] – 0,3 г/м<sup>2</sup>.

Количество групп макрозообентоса на данной станции наблюдения также было низким: в 2013 г. – 3 группы, в 2014 – 6 групп. В 2014 г. среди основных групп (ракообразные, малошетинковые черви и личинки хирономид) были обнаружены гидры, личинки двукрылых (Heleidae) и личинки жуков. Наиболее распространенными группами в течение двух лет исследования являлись амфиподы (45–70 % встречаемости). Ракообразные были представлены одним видом *G. fasciatus*, который доминировал как по численности (67–93 % от общей численности), так и по биомассе (78–99 % от общей биомассы).

Как показали наблюдения в 2013 и 2014 гг., на открытой песчаной литорали в течение вегетационного сезона динамика численности и биомассы основных групп макрозообентоса отличается. В 2013 г. первый пик численности и биомассы был отмечен в конце июня – начале июля, в 2014 г. – период резкого увеличения численности сдвинулось на месяц (конец июля). Второй пик численности в 2013 г. был зарегистрирован в августе, в 2014 – в начале сентября.

В 2013 г. максимальные значения численности были зафиксированы в конце августа – 0,4 тыс. экз./м<sup>2</sup>, когда основную долю составила группа ракообразных (96 %).

Амфипода *G. fasciatus* доминировала по численности в биоценозе, достигая доли 83–100 % от общей численности всех групп организмов. Исключение составляет период начала июля, когда роль хирономид возросла до 32 % и доля олигохет – до 30 %. В мае и середине июля на данном открытом песчаном биотопе не было обнаружено ни одного организма в пробе. По литературным данным зообентос в прибойной литорали с песком является бедным и в условиях Псковско-Чудского озера [Кангур и др., 2012]. Согласно наблюдениям Т. Д. Слепухиной [1975], отрицательным фактором для песчаного биотопа является динамика водных масс, обуславливающая подвижность песков, здесь часто отсутствуют организмы с нежными покровами тела, чувствительные к механическому воздействию волн (олигохеты).

По биомассе в вегетационный период 2013 г. с середины мая до первой декады октября доминировала амфипода *G. fasciatus*, достигая 97–100 % от общей биомассы донных гидробионтов. В 2014 г. по биомассе инвазионный вид играл существенную роль, только в отдельные даты (в конце июля – первой половине августа и в начале сентября). В остальное же время высокий процент по биомассе составляли хирономиды и гидры.

*Прибойная зарастающая песчаная литораль в Пиньгубе Онежского озера (станция 3).* Исследования, проведенные в Пиньгубе Онежского озера в 2014 г. на песчаной зарастающей литорали, показали, что средняя численность макрозообентоса составила 2,7 тыс. экз./м<sup>2</sup>, при средней биомассе 4,8 г/м<sup>2</sup> (табл. 3).

**Таблица 3. Таксономическая структура и количественные характеристики сообществ макрозообентоса на прибойной зарастающей песчаной литорали (станция 3) в Пиньгубе Онежского озера в 2014 г.**

Таксон	Численность			Биомасса			f, %
	экз./м <sup>2</sup>	г	%	мг/м <sup>2</sup>	г	%	
Amphipoda	1201	545	45	2217	951	47	100
Oligochaeta	295	243	11	100	47	2	100
Chironomidae	703	280	26	620	255	13	100
Bivalvia	75	24	3	163	57	3	82
Gastropoda	5	3	0	208	206	4	45
Hydracarina	3	3	0	0	0	0	27
Diptera, прочие	117	44	4	73	33	2	100
Ephemeroptera	10	3	0	109	103	2	82
Trichoptera	10	4	0	1	0	0	82
Coleoptera	8	3	0	2	1	0	82
Hirudinea	18	10	1	916	653	19	55
Plecoptera	4	3	0	0	0	0	18
Hydrozoa	100	100	4	13	13	0	36
Heteroptera	90	90	3	24	24	1	45
Isopoda	1	1	0	18	18	0	9
Odonata	51	50	2	296	296	6	36
Всего	2692	1406	100	4759	2657	100	

Как известно, высшая водная растительность положительно действует на видовое богатство и обилие донных животных [Schmieder, 2004]. Животные могут успешно скрываться от рыб среди растений, особенно между корнями [Кангур и др., 2012]. Благодаря разложению растений в зарослях постоянно возникает новый детрит, необходимый для питания беспозвоночных животных. Здесь они защищены и от волнения [Распопов и др., 1990]. Макрозообентос литоральной зарастающей песчаной зоны Онежского озера является самым разнообразным и представлен 16 группами различного таксономического ранга. Наиболее распространенными и многочисленными группами являлись ракообразные, личинки хирономид, малощетинковые черви, личинки двукрылых (главным образом Heleidae), личинки амфибиотических насекомых – поденок, ручейников, жуков и двустворчатых моллюсков. В отличие от других изученных типов биотопов были отмечены следующие группы: стрекозы, клопы и равноногие ракообразные.

В течение вегетационного сезона динамика численности и биомассы основных групп донных организмов имеет три пика: в начале июня, в середине августа и в сентябре. Максимальные значения численности были зафиксированы в середине июня – 12 тыс. экз./м<sup>2</sup>, когда основную долю составила группа амфипод (от 40–85 % от общей численности). В течение периода исследования на данной станции имели существенную роль, как по численности, так и по биомассе, хирономиды и двустворчатые моллюски.

**Вывод.** В целом полученные нами данные подтверждают результаты исследований А. В. Рябинкина, Т. Н. Поляковой [2008]: максимальные значения биомассы *G. fasciatus* отмечены на каменистой литорали (3,4–6,6 г/м<sup>2</sup>), минимальные – на песчаной (0,1–0,2 г/м<sup>2</sup>). В структуре сообществ во всех типах литоральных местообитаний играет существенную роль инвазионный вид *G. fasciatus*. Доминирует вид-вселенец как по численности, так и по биомассе на всех типах биотопов литорали.

### Литература

Александров Б. М. О донной фауне озер Карелии и ее кормовом значении для рыб // Биология внутренних водоемов Прибалтики. М.; Л.: Изд. АН СССР, 1962. С. 128–131.

Алимов А. Ф., Богутская Н. Г., Орлова М. И. и др. Антропогенное распространение видов животных и растений за пределы исторического ареала: процесс и результат // Биологические инвазии в водных и наземных экосистемах. М.: Товарищество научных изданий КМК, 2004. С. 16–43.

Кангур К., Тимм Т., Тимм Х. и др. Донная фауна (зообентос) // Псковско-Чудское озеро. Тарту, 2012. С. 306–333.

Методические рекомендации по сбору и обработке материалов при ведении мониторинга биологического загрязнения на Финском заливе / Под ред. А. Ф. Алимова, Т. М. Флоринской. СПб., 2005. 68 с.

Панов В. Е., Павлов А. М. Методика количественного учета водных беспозвоночных в зарослях камыша и тростника // Гидробиол. журн. 1986. Т. 22, № 6. С. 87–88.

Распопов И. М., Воронцов Ф. Ф., Слепухина Т. Д. и др. Роль волнения в формировании бентоса больших озер. Л.: Наука, 1990. 112 с.

Рябинкин А. В., Полякова Т. Н. Макрозообентос озера и его роль в питании рыб // Биоресурсы Онежского озера. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2008. С. 67–91.

Слепухина Т. Д. Зообентос литорали Онежского озера // Литоральная зона Онежского озера. Л.: Наука, 1975. С. 169–182.

Schlaepfer M. A., Sax D. F., Olden J. D. The Potential Conservation Value of Non-Native Species // Conservation Biology. 2010. N 25. P. 428–437.

Schmieder K. European lake shores in danger – concepts for a sustainable development // Limnologica. 2004. N 34. P. 3–14.

Strayer D. L. Alien species in fresh water: ecological effects, interactions with other stressors, and prospects for the future // Freshwater Biology. 2010. N 55 (Suppl. 1). P. 152–174.

## **ROLE OF THE INVASIVE SPECIES *GMELENOIDES FASCIATUS* (STEBBING) IN DIFFERENT TYPES OF THE LITTORAL ZONE OF LAKE ONEGO**

**A. I. Sidorova**

*Northern Water Problems Institute, KarRC RAS*

The Baikalian amphipod *G. fasciatus* has become successfully established in Lake Onego. Hydrobiological material was collected from the littoral zone of Lake Onego (rocky, gravel-sand and macrophytes habitats) to study the role of invasive amphipod *Gmelinoides fasciatus* in the community structure in 2013–2014. The results of the present study indicate that the amphipod *G. fasciatus* is dominant among macrozoobenthos in littoral rocky habitats.

## **МЕЖГОДОВЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ ОСНОВНЫХ КОМПОНЕНТОВ ЭКОСИСТЕМЫ (ФИТОПЛАНКТОН, ЗООПЛАНКТОН, МАКРОЗООБЕНТОС) ЮЖНОЙ ЛАДОГИ В ПЕРИОД 2000–2016 гг.**

**О. Н. Суслопарова, О. А. Ляшенко, В. А. Огородникова,  
Ю. А. Зуев, А. Ю. Тамулёнис**

*Государственный научно-исследовательский институт озерного и речного рыбного хозяйства им. Л. С. Берга, Санкт-Петербург*

Представлены результаты исследований фитопланктона, зоопланктона и макрозообентоса южной части Ладожского озера в 2000–2016 гг. В указанный период не отмечено устойчивой тенденции к повышению или понижению уровня количественных показателей развития фитопланктона, а также изменений в

составе доминирующего комплекса. Видовая структура, сравнительно высокие величины численности и биомассы зоопланктона, отмечавшиеся в основных зонах нагула рыб, где сообщество испытывало наиболее сильный пресс, отражали высокую степень продуктивности и устойчивости сообщества в разные годы. С 2000 г. наблюдается тенденция снижения количественных показателей донных сообществ, биомасса макрозообентоса на большинстве исследованных участков на протяжении почти десяти лет находится на низком уровне и соответствует значениям, характерным для малокормных водоемов.

## **Введение**

Ладожское озеро является основным промысловым пресноводным водоемом Ленинградской области. Именно на Ладоге, в ее южной части, ежегодно добывается около 90 % всей пресноводной рыбы области. Это обстоятельство обуславливает необходимость проведения регулярных гидробиологических исследований с целью оценки состояния кормовой базы рыб озера.

К основным компонентам экосистемы, которые прямо и косвенно обеспечивают формирование кормовой базы рыб, их условия воспроизводства и продуктивность, относятся планктонные (фито- и зоопланктон) и донные (зообентос) организмы.

Фитопланктон – первичный трофический уровень экосистемы, на котором синтезируется органическое вещество из неорганических соединений. Планктонные водоросли в живом виде и отмершие (в виде детрита) служат пищей для мирного зоопланктона и зообентоса, кроме того, они непосредственно потребляются некоторыми видами рыб. Зоопланктон составляет основу пищи молоди всех видов рыб и взрослых планктофагов. Зообентос служит пищей для молоди большинства видов рыб и обеспечивает рацион бентофагов. Кроме того, «мирный» зоопланктон, донные беспозвоночные, в первую очередь моллюски, обладающие мощными фильтрационными способностями, выполняют важную роль в процессах самоочищения водоема, т. е. в формировании качества воды.

## **Материал и методы**

Представлены результаты исследований, выполненных в июле 2016 г., в сравнении с данными за период с 2000 по 2015 г.

Объектами исследований являлись фитопланктон, зоопланктон и зообентос.

Отбор гидробиологических проб в указанные годы выполнялся на 19–25 станциях, охватывающих акваторию Ладожского озера, расположенную в пределах Ленинградской области: в Волховской, Свирской и Шлиссельбургской губах (с глубинами от 5 до 10 м), в западном

(глубины – от 13 до 134 м), склоновом (глубины – от 13 до 50 м) и глубоководном (центральном) (глубины – до 80 м) районах. Для отбора и обработки проб использовалось стандартное оборудование и общепринятые методики.

### Результаты и обсуждение

**Фитопланктон** исследованной части акватории озера в июле 2016 г. формировали водоросли восьми отделов: синезеленые, золотистые, диатомовые, криптофитовые, динофитовые, желтозеленые, эвгленовые, зеленые.

Численность фитопланктона варьировала от 964 до 28 723 млн кл/м<sup>3</sup>, биомасса – от 0,22 до 1,79 г/м<sup>3</sup>. Наибольшие численность и биомасса наблюдались в Волховской губе, наименьшая численность – в глубоководном районе, а биомасса – в Шлиссельбургской губе. Доминантами по численности на всех исследованных акваториях были синезеленые водоросли, в состав доминантов также входили криптонады. Основными доминантами по биомассе были криптофитовые и диатомовые, наряду с ними, доминирующий комплекс составляли золотистые, динофитовые, зеленые и желтозеленые водоросли.

По численности доминировали водоросли родов *Aphanizomenon*, *Woronichinia*, *Aphanothece*, *Oscillatoria*, *Anabaena*, *Snowella*, *Aphanocapsa*, *Planktothrix*, *Microcystis* (синезеленые), *Chroomonas* (криптофитовые), по биомассе – родов *Chroomonas*, *Cryptomonas* (криптофитовые), *Tabellaria*, *Asterionella*, *Fragilaria*, *Aulacoseira* (диатомовые), *Aphanizomenon*, *Anabaena*, *Planktothrix* (синезеленые), *Dinobryon* (золотистые), *Tribonema* (желтозеленые), *Peridinium* и *Ceratium* (динофитовые). Зеленые водоросли формировали полидоминантный комплекс с преобладанием хлорококковых. Доминировавшие в 2016 г. водоросли входят в состав известных по данным предыдущих исследований доминантов фитопланктона Ладожского озера [Терешенкова, Ляшенко, 2009; Суслопарова и др., 2014].

Средние величины биомассы летнего фитопланктона обследованных в 2016 г. районов Ладоги находились в пределах диапазона величин, отмеченных для этих районов в предыдущие годы наблюдений. Наибольшей продуктивностью фитопланктона в июле 2016 г., как и ранее, отличалась Волховская губа. Сходная величина средней биомассы фитопланктона (около 1 г/м<sup>3</sup>) в этом районе отмечалась в 1989, 2001, 2009, 2012 и 2014 гг. Аналогичная величина биомассы отмечалась в 2016 г. в Свирской губе и западном районе и была сходна с отмеченными на этих акваториях в 2001, 2007 и 2008 гг. Остальные три района в 2016 г. по продуктивности летнего фитопланктона были сходны с 2001, 2008, 2009, 2012–2014 гг.

В целом в текущем столетии для фитопланктона Ладожского озера можно отметить как достаточно стабильный состав доминирующего комплекса, так и уровень количественных показателей развития, варьирующий в пределах межгодовых изменений. Исключение составили только показатели 2010 г. ( $5 \text{ г/м}^3$  в Волховской губе, около  $2 \text{ г/м}^3$  – в Свирской губе и западном районе) в условиях исключительно высоких летних температур, что оказало значительное стимулирующее воздействие на вегетацию планктонных водорослей.

Тенденция повышения роли синезеленых в последние годы не наблюдается, что, наряду с низкими летними биомассами, может свидетельствовать об олиготрофизации озера. На признаки перехода озера из антропогенно-обусловленного мезотрофного состояния к ранее свойственной ему олиготрофии указывают и результаты исследования сезонной динамики полей распределения хлорофилла [Поздняков и др., 2009].

**Зоопланктон** в июле 2016 г. был представлен обычными для Ладожского озера видами. Количество видов (63) составило около 40 % общего числа видов (около 150 видов без учета простейших), отмеченных в пелагиали озера за период 2000–2016 гг.

Локальные величины численности зоопланктона составляли от 2,32 до 150,76 тыс. экз./м<sup>3</sup>, ее минимум был отмечен на одной из станций в Волховской губе, максимум – в Шлиссельбургской губе, а биомассы – от 0,033 в Волховской губе до  $1,401 \text{ г/м}^3$  в Свирской губе.

Наиболее высокие средние для районов показатели численности и биомассы были характерны для мелководных заливов озера: в Свирской, Шлиссельбургской и Волховской губах они составили 90,59, 78,94, 59,28 тыс. экз./м<sup>3</sup> и 1,008, 0,495, 0,550 г/м, соответственно. Низкими средними величинами численности характеризовались западный (24,57) и центральный (7,60 тыс. экз./м<sup>3</sup>) районы. Разница между максимальным и минимальным показателями составила 12 раз. Показатели биомассы различались в значительно меньшей степени: разница между максимальным ( $1,008 \text{ г/м}^3$ ) в Свирской губе и минимальным ( $0,240 \text{ г/м}^3$ ) в западном районе была кратна 4. На большей части акватории биомасса зоопланктона была сравнительно высокой и составляла около  $0,5 \text{ г/м}^3$ , что было обусловлено присутствием в зоопланктоне крупных копепоид: *Eurytemora lacustris*, *Eudiaptomus gracilis*, *Limnocalanus macrurus*.

Отмеченный в 2016 г. большой разброс локальных величин численности и биомассы характерен для зоопланктона Ладожского озера. Диапазон различий показателей на разных участках озера в конкретную дату исследований может перекрывать межсезонные различия. В годы сравнительно невысокой продуктивности (2005–2009 и 2011–2012 гг.)

локальные величины численности летне-осеннего зоопланктона варьировали от 1,93 до 92,84 тыс. экз./м<sup>3</sup>, биомассы – от 0,16 до 1,38 г/м<sup>3</sup>, в высокопродуктивные годы (2000, 2001, 2010, 2013, 2014 гг.) составляли 15,19–190,70 тыс. экз./м<sup>3</sup> и 0,50–2,00 г/м<sup>3</sup>, соответственно. Во всех случаях минимальные величины были свойственны глубоководным участкам западного и центрального районов озера, максимальные – мелководным Волховской, Шлиссельбургской и Свирской губам [Огородникова, 2009; Суслопарова и др., 2014].

Основная зона нагула планктоноядных рыб (молодь всех видов и взрослые планктофаги) включает три южных залива и часть прилегающей к ним акватории. Так, средняя численность летне-осеннего зоопланктона составляла в Свирской губе в период спада (2005–2009 гг.) 36,62, в Волховской – 45,18, в Шлиссельбургской – 34,49 тыс. экз./м<sup>3</sup>, а биомассы – 0,476, 0,651 и 0,505 г/м<sup>3</sup>, соответственно. В период подъема (2010–2014 гг.) эти показатели в среднем, соответственно, равнялись: численность – 110,63, 115,12 и 103,68 тыс. экз./м<sup>3</sup>, биомасса – 1,200, 1,522 и 0,962 г/м<sup>3</sup>.

Основу численности сообщества в период исследования обеспечивали (в разных соотношениях) коловратки и копеподы, биомассы – копеподы и кладоцеры, первые чаще всего составляли не менее 50 %, а в холодные годы – до 90 %, вторые обычно около 30 %, в теплые годы – до 70 %.

**Макрозообентос** Ладожского озера характеризуется высокой пространственной вариабельностью как видового состава и структуры донных сообществ, так и их количественных показателей.

В составе зообентоса Ладожского озера в 2016 г. было выявлено 39 видов, из них 50 % приходилось на долю олигохет, 36 % – хирономид, прочие группы были представлены 1–3 видами. Число видов в рассматриваемых районах озера варьировало от 4 (в глубоководном районе) до 22 – в Шлиссельбургской и Волховской губах.

Средние значения численности зообентоса исследованных районов Ладожского озера в 2016 г. находились в пределах от 0,28 до 3,13 тыс. экз./м<sup>2</sup>.

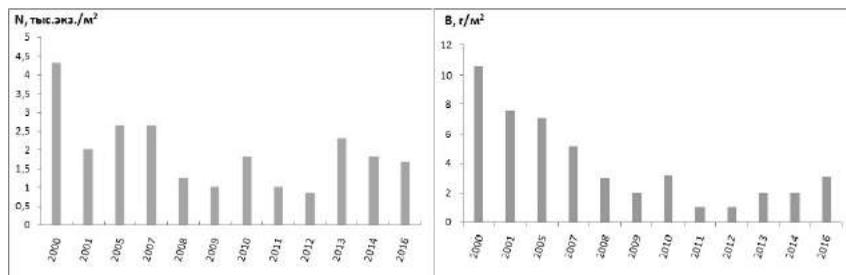
Средние по районам значения биомассы зообентоса на большей части акватории озера: Свирская и Шлиссельбургская губы, западный, глубоководный и склоновый районы – составляли от 0,47 до 3,08 г/м<sup>2</sup>. По классификации, используемой для рыбохозяйственной оценки кормовой базы рыб [Пидгайко и др., 1968], данные районы озера по показателям зообентоса характеризуются как малокормные. Только один район – Волховская губа – характеризовался сравнительно высокими величинами биомассы (средняя биомасса – 10,75 г/м<sup>2</sup>), что позволяет отнести его к высококормным. В Волховской губе происходит смешение водных масс

двух крупных рек – Волхова и Сяси. Сток в губу обеспечивает поступление биогенных элементов, что вместе с хорошей прогреваемостью создает благоприятные условия обитания донных беспозвоночных.

Практически во всех районах основу биомассы составляли олигохеты, в частности реликтовый вид *Lampodrilus isoporus*. Исключение составила Волховская губа, в которой доминировали олигохеты *Lumbriculus variegatus* – более устойчивые к изменениям внешней среды.

Для макрозообентоса исследованных районов озера характерны значительные межгодовые флуктуации количественных показателей, более выраженные в губах, обусловленные в первую очередь изменением гидрометеорологических условий года и антропогенным воздействием.

В период наблюдений с 2000 г. до настоящего времени наблюдается тенденция снижения количественных показателей донных сообществ. Летом 2008, 2009, 2011 и 2012 гг. отмечались особенно низкие значения плотности поселения и биомассы зообентоса на большей части акватории (в центральном и западном районах, Свирской губе), на остальных акваториях обилие также было невысоким. Так, в 2012 г. средняя для исследованной части озера плотность поселения зообентоса составляла 1,17 тыс. экз./м<sup>2</sup>, биомасса – 1,2 г/м<sup>2</sup> (рис.).



**Многолетняя динамика численности (N, тыс. экз./м<sup>2</sup>) и биомассы (B, г/м<sup>2</sup>) макрозообентоса южной части Ладожского озера в 2000–2016 гг.**

С 2013 г. наблюдается небольшое повышение количественных показателей зообентоса в исследуемой части озера. Наиболее высокая биомасса в последние пять лет отмечена в 2016 г.

В последние годы в некоторых районах увеличилась доля в зообентосе личинок комаров-хинономид и ракообразных, которые являются более ценными объектами питания рыб, чем олигохеты. В 2014 г. в Свирской губе и в Западном районе эти группы стали доминирующими по биомассе. В 2015 г. в Волховской губе в заметном числе появились мелкие моллюски рода *Euglesa*.

## Выводы

В текущем столетии для всех исследованных районов акватории Ладожского озера не отмечено устойчивой тенденции к повышению или понижению уровня количественных показателей развития фитопланктона, а также изменений в составе доминирующего комплекса.

Величины численности и биомассы зоопланктона в различных районах озера летом 2016 г. соответствовали среднемуголетнему уровню показателей. Видовая структура, сравнительно высокие показатели численности и биомассы зоопланктона, а также преобладание по биомассе ракообразных создавали благоприятные условия для нагула молоди всех видов рыб и взрослых планктофагов.

Количественные показатели макрозообентоса, как кормовой базы для промысловых бентосоядных рыб, в южной части Ладожского озера в 2016 г. были на низком уровне и на большинстве исследованных участков соответствовали их значениям, характерным для малокормных водоемов. Средняя для обсуждаемой части Ладожского озера биомасса зообентоса в 2016 г. была существенно ниже, чем в период 2000–2007 гг., сопоставимой с ее величинами в 2008 и 2010 гг. и наиболее высокой за последние пять лет.

## Литература

*Огородникова В. А.* Современное состояние зоопланктона южной части Ладожского озера как кормовой базы рыб-планктофагов // Сб. науч. тр. ФГБУ «ГосНИОРХ». 2009. Вып. 334. С. 75–95.

*Пидгайко М. Л., Александров Б. М., Иоффе Ц. И. и др.* Краткая биолого-продукционная характеристика водоемов Северо-Запада СССР // Изв. ГосНИОРХ. 1968. Т. 67. С. 205–228.

*Поздняков Д. В., Коросов А. А., Петрова Н. А. и др.* Исследование «гистерезисного» характера возвращения Ладожского озера из мезотрофного состояния // Исследование земли из космоса. 2009. № 1. С. 1–15.

*Суслонярова О. Н., Терешенкова Т. В., Огородникова В. А. и др.* Изменения летних гидробиоценозов южной Ладоги по материалам многолетних исследований ГосНИОРХ // Рыбохозяйственные исследования на водных объектах Европейской части России: Сб. науч. работ, посвящ. 100-летию ГосНИОРХ. СПб., 2014. С. 238–258.

*Терешенкова Т. В., Ляшенко О. А.* Современное состояние летнего фитопланктона южной части Ладожского озера (по данным рыбохозяйственного мониторинга) // Сб. науч. тр. ФГБУ «ГосНИОРХ». 2009. Вып. 334. С. 5–32.

**INTERANNUAL CHANGES OF THE MAIN ECOSYSTEM COMPONENTS  
(PHYTOPLANKTON, ZOOPLANKTON, MACROZOOBENTHOS) IN THE  
SOUTHERN LADOGA IN 2000–2016**

**O. N. Susloparova, O. A. Liashenko, V. A. Ogorodnikova,  
Yu. A. Zuyev, A. Yu. Tamulenis**

*Berg State Research Institute on Lake and River Fisheries*

The results of phytoplankton, zooplankton and zoobenthos studies in the southern part of Lake Ladoga in 2000–2016 are presented. No consistent trend of increase or decrease in the level of quantitative parameters of phytoplankton, or changes in the composition of the dominant complex were revealed for this period. The species structure, relatively high values of abundance and biomass of zooplankton observed in the areas where the community was under a particularly strong pressure from fish reflected the high degree of productivity and stability of the community in different years. Since 2000 a downward trend has been observed for quantitative indicators of benthic communities. The macrozoobenthos biomass at most sites has for almost ten years been at a low level and corresponded to the values typical of waters with poor foraging resources.

**СЕЗОННАЯ ДИНАМИКА ЗООПЛАНКТОНА  
И ЕЕ МЕЖГОДОВАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ  
В ПЕТРОЗАВОДСКОЙ ГУБЕ ОНЕЖСКОГО ОЗЕРА**

**Ю. Ю. Фомина**

*Институт водных проблем Севера КарНЦ РАН*

В статье приведено описание сезонной динамики зоопланктона Петрозаводской губы Онежского озера. Представлено изменение видового состава, соотношения основных таксономических групп, количественные показатели по сезонам. Описаны особенности состояния зоопланктона в августе 2014–2015 гг.

Онежское озеро – один из крупнейших водоемов, расположенный на северо-западе европейской части России. В нем содержится огромный запас пресной воды высокого качества. Озеро характеризуется хорошо выраженной лимнической гетерогенностью, неравномерным распределением приточности и различной степенью антропогенной нагрузки. Петрозаводская губа служит источником питьевого водоснабжения г. Петрозаводска и приемником его промышленно-бытовых и ливневых стоков. В залив впадает один из крупных притоков озера – р. Шуя [Онежское озеро, 2010]. В последние десятилетия на территории Карелии отмечены климатические изменения: повышение среднегодовой температуры воздуха на 1 °С, увеличение годового количества атмосферных осадков на

20–70 мм (по сравнению с климатической нормой 1960–1990-х гг.), увеличение температуры поверхностного слоя воды и продолжительности безледоставного периода (в Онежском озере возросла на 12 дней) [Климат Карелии, 2004; Филатов и др., 2012; Назарова, 2014]. Изменение климата влияет на гидрологию, термический режим озера и вызывает ответную реакцию планктона.

Первые материалы по зоопланктону Онежского озера были собраны в 1866 г. К. Кесслером [Кесслер, 1868]. За 150 лет гидробиологических исследований накоплен большой объем информации о видовом составе, структуре, численности, биомассе, экологии, сезонных изменениях зоопланктона, его кормовой ценности и др. Несмотря на это сезонная динамика зоопланктона изучена недостаточно, поэтому ее исследование является актуальным.

Петрозаводская губа – один из наиболее крупных (123,48 км<sup>2</sup>) заливов озера. Залив этот имеет лопастную форму и ориентирован с северо-запада на юго-восток. Длина 19 км, ширина 7 км. Максимальная глубина 35 м, средняя – 18,3 м [Молчанов, 1946].

В работе использовались данные комплексных съемок в Петрозаводской губе Онежского озера 2014–2016 гг. и архивных материалов с 1988 по 2010 г. [Сярки, Куликова, 2012]. Отбор и обработка проб проводились стандартными методами [Методические рекомендации..., 1984]. Обычно сезонную динамику зоопланктона разделяют на пять периодов: весенний, раннелетний, позднелетний, осенний и зимний, которые не совпадают с календарными сроками. В годовом цикле зоопланктонного сообщества происходит изменение состава, структуры и количественных показателей. По структуре зоопланктона с помощью методов многомерной статистики были определены сроки и продолжительность сезонов, переходные периоды [Сярки, Фомина, 2014, 2015]. Определение для получения среднесезонной траектории сезонной динамики величин производилось с помощью модифицированного метода скользящих средних [Сярки, 2013].

Зоопланктон пелагиали Петрозаводской губы Онежского озера представлен 81 видами и родами (Rotifera – 27, Copepoda – 20, Cladocera – 34). Среди них 35 % относятся к видам-космополитам, 23 % – к голоарктическим видам, 21 % – к палеарктическим видам, 21 % – к бореальным видам. По шкале встречаемости [Баканов, 2005], доминантный комплекс зоопланктонного сообщества состоит из 15–30 видов. От 30 до 50 % доминантов – это круглогодичные виды (табл.).

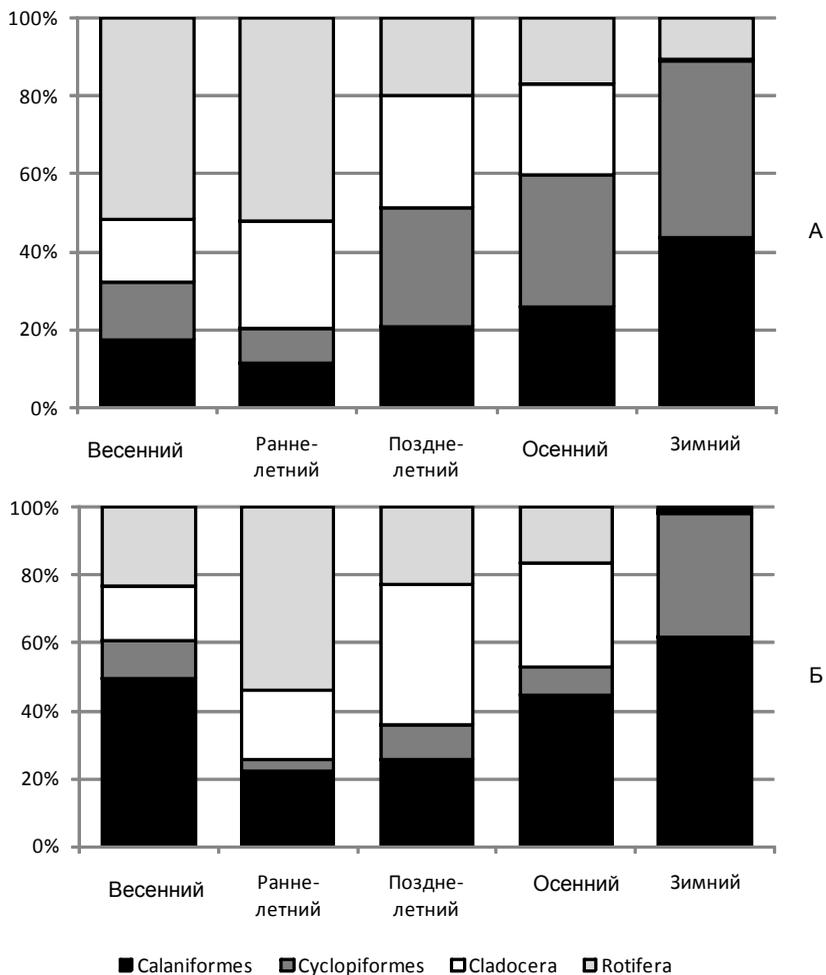
Весной по численности преобладают коловратки, по биомассе – каляноиды, в раннелетний период более половины от общей численности и биомассы составляют коловратки. Поздним летом количество коловраток снижается, по численности увеличивается количество циклопид

и кладоцер, по биомассе преобладают кладоцеры. Осенью численность и биомасса ветвистоусых рачков снижается, а веслоногих рачков увеличивается, зимой циклопид и каляниды доминируют по численности и биомассе (рис.).

#### Доминантный комплекс пелагического зоопланктона Петрозаводской губы Онежского озера по сезонам

Вид	Весенний	Ранне-летний	Поздне-летний	Осенний	Зимний
<i>Limnocalanus macrurus</i> Sars 1863	+	+	+	+	+
<i>Eudiaptomus gracilis</i> (Sars 1863)	+	+	+	+	+
<i>Thermocyclops oithonoides</i> (Sars 1863)	+	+	+	+	+
<i>Mesocyclops leuckarti</i> (Claus 1857)	+	+	+	+	+
<i>Daphnia cristata</i> Sars 1862	+	+	+	+	+
<i>Bosmina coregoni lacustris</i> Sars 1862	+	+	+	+	+
<i>Keratella cochlearis</i> (Gosse 1851)	+	+	+	+	+
<i>Kellicottia longispina</i> (Kellicott 1879)	+	+	+	+	+
<i>Holopedium gibberum</i> (Zaddach 1855)	+	+			
<i>Polyarthra dolichoptera</i> Idelson 1925	+	+			
<i>Notholca cinetura</i> Skorikov 1914	+	+			
<i>Bosmina longirostris</i> (Müller 1785)		+			
<i>Polyphemus pediculus</i> (Linnaeus 1761)		+			
<i>Euchlanis dilatata</i> Ehrenberg 1832		+			
<i>Notholca caudata</i> Carlin 1943		+			
<i>Cyclops abyssorum</i> Sars 1863	+	+	+		
<i>Leptodora kindtii</i> (Focke 1844)		+	+		
<i>Daphanosoma brachyurum</i> (Lievin 1848)			+		
<i>Bipalpus hudsoni</i> (Imhof 1891)	+	+	+	+	
<i>Eurytemora lacustris</i> (Poppe 1887)	+	+	+	+	
<i>Chydorus sphaericus</i> (Müller 1785)	+	+	+	+	
<i>Bosmina coregoni</i> Baird 1857		+	+	+	
<i>Asplanchna herricki</i> Guerne 1888		+	+	+	
<i>Asplanchna priodonta</i> Gosse 1850		+	+	+	
<i>Heterocope appendiculata</i> Sars 1863		+	+	+	
<i>Limnosida frontosa</i> Sars 1862			+	+	
<i>Daphnia longispina</i> Müller 1785			+	+	
<i>Megacyclops gigas</i> (Claus 1857)					+

Самые низкие в годовом цикле зоопланктона количественные показатели зимой, подо льдом, в среднем численность 11–18 тыс. экз./м<sup>2</sup>, биомасса 0,1–0,5 г/м<sup>2</sup>. С начала мая численность и биомасса увеличиваются и достигает максимума в конце июля – начале августа (до 530 тыс. экз./м<sup>2</sup>, биомасса до 14 г/м<sup>2</sup>), осенью показатели снижаются, зоопланктонное сообщество готовится к зиме.



**Соотношение основных таксономических групп зоопланктона по численности (А) и по биомассе (Б) в различные сезоны**

Интересно, что количественные показатели зоопланктона в августе 2014 и 2015 гг. ниже среднееголетних данных в 2,5 раза. В 2014 г. значения численности – 109 тыс. экз./м<sup>2</sup> и биомассы – 3,9 г/м<sup>2</sup>, в 2015 г. – 105 тыс. экз./м<sup>2</sup> и 4,6 г/м<sup>2</sup>, соответственно. В исследованиях зоопланктона Петрозаводской губы в 1976 г. была отмечена похожая ситуация, численность и биомасса зоопланктонов в конце июля – начале августа

74,5 тыс. экз./м<sup>2</sup>, 4,9 г/м<sup>2</sup> [Куликова, Щурова, 1980]. Снижения показателей может быть вызвано уменьшением антропогенной нагрузки, а также влиянием гидродинамической или синоптической ситуации в заливе, что требует дальнейшего анализа.

### Литература

*Баканов А. И.* Количественная оценка доминирования в экологических сообществах // Количественные методы экологии и гидробиологии. Тольятти: СамНЦ РАН, 2005. С. 37–67.

*Биоресурсы Онежского озера* / Отв. ред. В. И. Кухарев, А. А. Лукин. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2008. 272 с.

*Водные объекты города Петрозаводска: Учебное пособие* / Под ред. А. В. Литвиненко, Т. И. Регеранд. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2013. 109 с.

*Кесслер К. Ф.* Материалы для познания Онежского озера и Обонежского края, преимущественно в зоологическом отношении: Приложение к трудам Первого съезда русских естествоиспытателей. СПб.: Тип. Императорской Академии Наук, 1868. 148 с.

*Климат Карелии: Изменчивость и влияние на водные объекты и водосборы* / Отв. ред. Н. Н. Филатов. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2004. 224 с.

*Куликова Т. П., Сярки М. Т.* Размерно-весовая характеристика массовых видов ракообразных и коловраток Онежского озера (справочно-информационный материал). Петрозаводск: КарНЦ РАН, 1994. 16 с.

*Куликова Т. П., Кустовлянкина Н. Б., Сярки М. Т.* Зоопланктон как компонент экосистемы Онежского озера. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 1997. 112 с.

*Методические рекомендации по сбору и обработке материалов в гидробиологических исследованиях на пресноводных водоемах. Зоопланктон и его продукция* / Ред. Г. Г. Винберг, Г. М. Лаврентьева. Л.: ГосНИОРХ, 1984. 33 с.

*Молчанов И. В.* Онежское озеро. Л.: Гидрометеорол. изд-во, 1946. 208 с.

*Назарова Л. Е.* Изменчивость средних многолетних значений температуры воздуха в Карелии // Изв. Русск. геогр. об-ва. 2014. Т. 146, вып. 4. С. 27–33.

*Онежское озеро. Атлас* / Под ред. Н. Н. Филатова. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2010. 151 с.

*Сярки М. Т.* Изучение траектории сезонной динамики планктона с помощью метода двойного сглаживания // Принципы экологии. 2013. № 1 (5). С. 61–67.

*Сярки М. Т., Куликова Т. П.* «Зоопланктон Онежского озера». База данных [Database "Zooplankton of the Lake Onego"]. Рег. номер 2012621150 (9/11/2012). Правообладатель Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт водных проблем Севера Карельского научного центра РАН (ИВПС КарНЦ РАН) (RU).

*Сярки М. Т., Фомина Ю. Ю.* Особенности сезонных явлений в зоопланктоне Петрозаводской губы Онежского озера // Принципы экологии. 2014. Т. 3, № 3. С. 36–43.

*Сярки М. Т., Фомина Ю. Ю.* Сезонные изменения в зоопланктоне Петрозаводской губы Онежского озера // Тр. КарНЦ РАН, сер. Экологические исследования. 2015. № 1. С. 63–68.

Филатов Н. Н., Назарова Л. Е., Георгиев А. П. и др. Изменения и изменчивость климата европейского Севера России и их влияние на водные объекты // Арктика: экология и экономика. 2012. № 2 (6). С. 80–93.

## SEASONAL DYNAMICS OF ZOOPLANKTON AND ITS INTERANNUAL VARIABILITY IN PETROZAVODSKAYA BAY OF LAKE ONEGO

Yu. Yu. Fomina

*Northern Water Problems Institute, KarRC RAS*

Seasonal dynamics of zooplankton was studied. Seasonal changes in the species composition, community structure, abundance and biomass of zooplankton in Petrozavodskaya Bay of Lake Onego were described. Special conditions for zooplankton in August 2014-2015 were observed.

## ВЛИЯНИЕ ВЕТРА НА РАСПРЕДЕЛЕНИЕ БИОМАСС ПЛАНКТОНА В ПЕРИОД ПРОГРЕВАНИЯ ВОДОЕМА

Б. О. Цыденов

*Томский государственный университет*

Методами математического моделирования показано влияние ветра на распределение биомасс фито- и зоопланктона в период весеннего прогрева водоема на примере озера Камлупс (Британская Колумбия, Канада). Изменение концентрации биологических компонентов численно воспроизведено на основе модели «нутриент – фитопланктон – зоопланктон – детрит» Паркера.

Известно, что планктон является важным индикатором для оценки качества воды в озере, продуктивности и жизнеспособности водной экосистемы. Кроме того, планктон – основа пищевой базы для многих видов рыбы, поэтому информация о распространении планктона и времени его роста и убыли в определенных районах водоема важна в планировании и выборе оптимальных сроков вылова рыбы рыбопромысловыми организациями.

Целью настоящей работы является численное исследование влияния ветрового воздействия на распределение планктона в весенний период с помощью модели «нутриент – фитопланктон – зоопланктон – детрит» [Parker, 1991] на примере канадского озера Камлупс.

Транспорт биомасс планктона в математической модели описывается конвективно-диффузионными уравнениями вида

$$\frac{\partial \Psi}{\partial t} + \frac{\partial u \Psi}{\partial x} + \frac{\partial w \Psi}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left( D_x \frac{\partial \Psi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( D_z \frac{\partial \Psi}{\partial z} \right) + S_{\Psi},$$

**Таблица 1. Взаимодействие фитопланктона (P), зоопланктона (Z), нутриента (N) и детрита (D)**

Обозначение	Расчетная формула
$S_P$	$P(G - m_P - IZ)q$
$S_Z$	$Z[(1 - \gamma_N - \gamma_D)IP - m_Z]q$
$S_N$	$(-GP + \gamma_N IPZ + C_0 D)q$
$S_D$	$(m_P P + \gamma_D IPZ - C_0 D + m_Z Z)q$

где  $\Psi$  – концентрация биологического компонента (нутриента, фитопланктона, зоопланктона и детрита);  $S_\psi$  – источниковый член для соответствующей составляющей, которая представляет результат взаимодействия с остальными компонентами биологической модели. Для численного

исследования динамики планктонных популяций в данной работе используется модель «нутриент (N) – фитопланктон (P) – зоопланктон (Z) – детрит (D)» [Parker, 1991]. Расчетные формулы, определяющие значения источниковых членов в  $N-P-Z-D$  модели, представлены в табл. 1.

Переменная  $G$  представляет скорость первичного продуцирования фитопланктона и вычисляется по формуле

$$G = V_m [(L_d/s_d) \exp\{1 - (L_d/s_d)\}] [N/(N+k_s)].$$

Свет, проникающий на определенную глубину, рассчитывается по экспоненциальной зависимости с учетом затенения планктоном и детритом в водной толще между поверхностью ( $z = L_z$ ) и глубиной  $z = d$ :

$$L_d = L_s \exp\left\{-\eta d - S_s \int_d^{L_z} (P + Z + D) dz\right\}.$$

Согласно [Sverdrup, 1953] фотосинтетически активная радиация составляет 20 % от общей солнечной энергии. Исходя из этого предположения определяется суточная поверхностная инсоляция  $L_s$ .

Смертность фитопланктона и множитель температурного ограничения вычисляются соответственно:

$$m_P = M \exp\{-(n_1 N)^2\};$$

$$q = 2.5^{(T-15)/10}.$$

Параметры, входящие в расчетные формулы биологических компонентов в модели планктона, приведены в табл. 2 [Holland et al., 2003].

Сдвиговое напряжение ветра на поверхности озера описывается законом

$$\tau_{surf}^u = c_{10} \rho_a \sqrt{v_{10}^2 + u_{10}^2} \cdot u_{10};$$

$$\tau_{surf}^v = c_{10} \rho_a \sqrt{v_{10}^2 + u_{10}^2} \cdot v_{10},$$

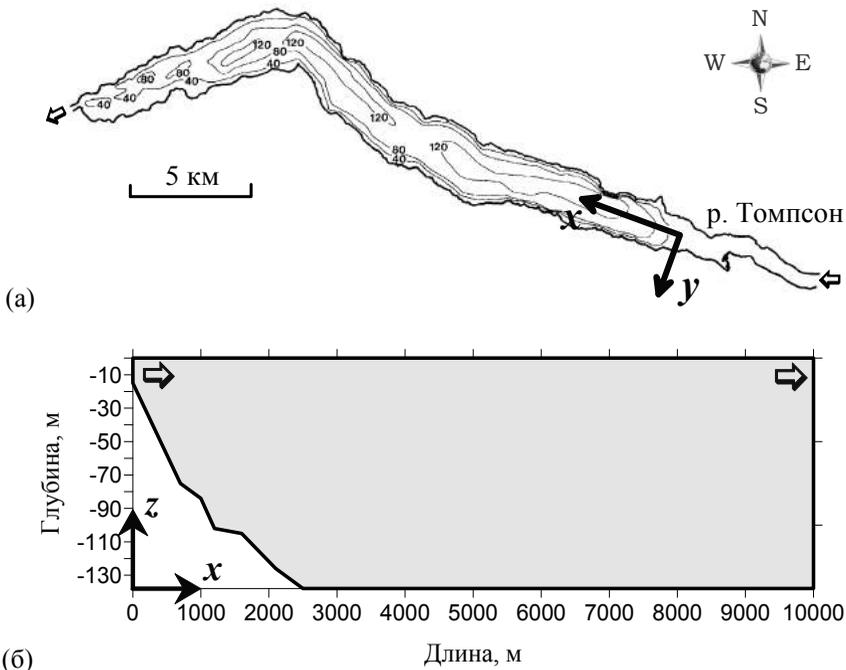
где  $\rho_a$  – плотность воздуха у поверхности воды;  $c_{10} = 1,3 \times 10^{-3}$  [Goudsmit et al., 2002];  $u_{10}$ ,  $v_{10}$  – составляющие скорости ветра над поверхностью озера.

**Таблица 2. Значения параметров модели «нутриент – фитопланктон – зоопланктон – детрит»**

Параметр	Наименование	Значение
$V_m$	Максимальная скорость роста фитопланктона	$2,8 \text{ сут}^{-1}$
$\eta$	Коэффициент ослабления света	$0,15 \text{ м}^{-1}$
$k_s$	Константа полунасыщения поглощения нутриентов	$0,6 \text{ ммоль N м}^{-3}$
$m_z$	Смертность зоопланктона	$0,1 \text{ сут}^{-1}$
$I$	Интенсивность питания зоопланктона	$0,2 \text{ сут}^{-1}$
$M$	Максимальная скорость смертности фитопланктона	$0,5 \text{ сут}^{-1}$
$n_I$	Коэффициент скорости смертности фитопланктона	$1 \text{ (ммоль N м}^{-3}\text{)}^{-1}$
$\gamma_N$	Доля неусвоенного питания зоопланктона под нутриент	0,4
$\gamma_D$	Доля неусвоенного питания зоопланктона под детрит	0,3
$C_D$	Скорость превращения детрита в нутриент	$0,02 \text{ сут}^{-1}$
$S_S$	Коэффициент самозатенения	$0,02 \text{ (ммоль N м}^{-3}\text{)}^{-1} \text{ м}^{-1}$
$s_c$	Коэффициент светового насыщения	$60 \text{ Э м}^2 \text{ сут}^{-1}$

Математическое моделирование нестационарного течения в глубоководном озере проводится путем численного решения системы уравнений (уравнений неразрывности, количества движения, энергии, турбулентных характеристик) термогидродинамической модели [Tsydenov et al., 2016]. Пространственно-временное распределение планктона рассчитывается посредством сопряжения термогидродинамической модели с биологической моделью, представленной выше. Решение задачи основано на методе конечного объема, согласно которому скалярные величины (концентрация фито-, зоопланктона, нутриента, детрита; теплофизические характеристики воды и т. д.) определяются в центре сеточной ячейки, в то время как компоненты вектора скорости – в средних точках на границах ячеек. Численный алгоритм нахождения поля течения и температуры опирается на разностную схему Кранка – Николсон. Конвективные слагаемые в уравнениях аппроксимируются по противопотоковой схеме QUICK [Leonard, 1979] второго порядка. Системы разностных уравнений на каждом шаге по времени решаются методом релаксации.

В качестве исследуемой области выбрано вертикальное сечение озера Камлупс [John et al., 1976], соответствующее направлению впадения реки Томпсон, начало системы координат совпадает с устьем реки (рис. 1, а). Озеро Камлупс находится на юго-западе Канады (провинция Британская Колумбия) в 340 км северо-восточнее Ванкувера и расположено между  $50^{\circ}26' - 50^{\circ}45'$  с. ш. и  $120^{\circ}03' - 120^{\circ}32'$  з. д. Расчетная область имеет протяженность 10 км и глубину 138 м (рис. 1, б).



**Рис. 1. Морфометрия оз. Камлупс:**

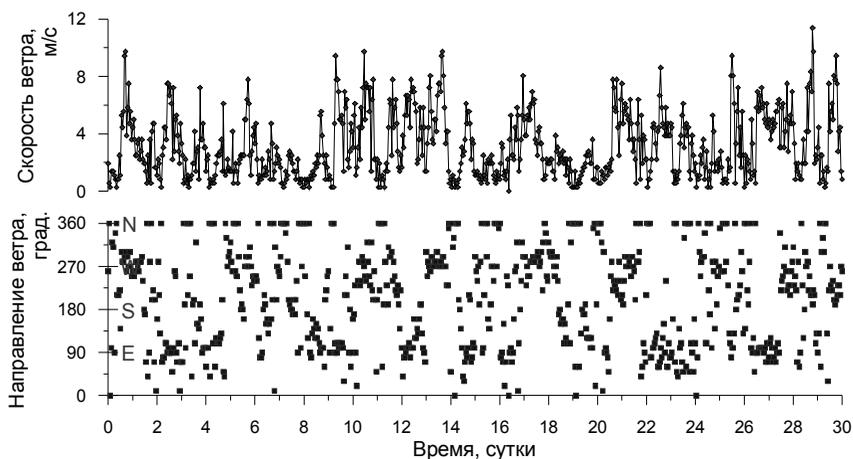
а – батиметрия оз. Камлупс; б – вычислительная область (продольное сечение)

Начальное распределение температуры в озере Камлупс имеет постоянное значение, равное  $2,4\text{ }^{\circ}\text{C}$ , температура воды в реке в начальный момент времени соответствует  $3,6\text{ }^{\circ}\text{C}$  и увеличивается на  $0,2\text{ }^{\circ}\text{C}$  в сутки [Holland et al., 2003]. Река Томпсон впадает в озеро со скоростью  $0,01\text{ м/с}$ , минерализация воды в озере и реке имеет постоянное значение  $0,1\text{ г/кг}$ . Начальная концентрация нутриента, фитопланктона, зоопланктона и детрита составляет  $4,0, 1,0, 1,0$  и  $1,0\text{ ммоль N м}^{-3}$ , соответственно [Holland et al., 2003]. Расчетная область (рис. 1, б) покрыта равномерной ортогональной сеткой с шагами  $h_x = 25\text{ м}$  и  $h_z = 3\text{ м}$ . Шаг по времени –  $60\text{ с}$ .

Математическая модель учитывает суточную изменчивость метеорологических факторов, воздействующих на водную поверхность озера. В качестве атмосферных данных выступает информация о температуре воздуха, относительной влажности, атмосферном давлении, облачности, скорости и направлении ветра из архива погодных условий

метеостанции г. Камлупс в период с 01.04.2015 по 30.04.2015 г. (<http://climate.weather.gc.ca>). На основе этих сведений рассчитаны значения коротковолновой и длинноволновой радиации, потоков скрытого и чувствительного тепла [Tsydenov, 2016].

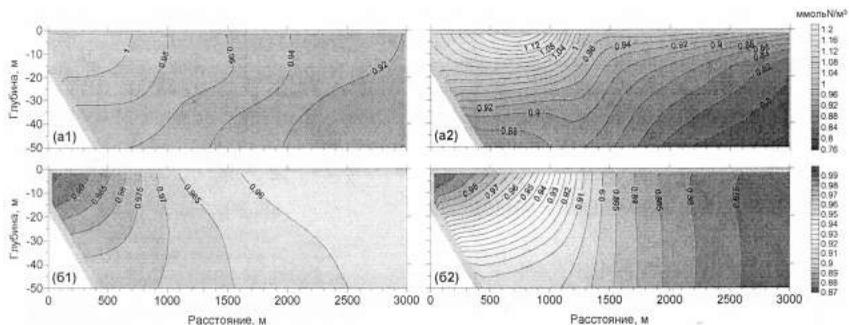
Анализ данных по ветровому режиму показывает, что с 01.04.2015 по 30.04.2015 г. порывы ветра могут достигать 10–12 м/с (рис. 2). Активная ветровая нагрузка на поверхность водоема приходится на 10–14-й дни месяца. При этом на данном временном интервале преобладают ветра западного направления.



**Рис. 2.** Скорость и направление ветра согласно данным метеорологической станции г. Камлупс в период с 01.04.2015 по 30.04.2015 г. (местное стандартное время)

С помощью численного моделирования установлено значительное влияние ветра на распределение биомасс фито- и зоопланктона. При наличии ветрового напряжения на поверхности озера наблюдаются слабые градиенты концентрации планктона (рис. 3, *a1*, *б1*). Причина этого заключается в смешивании водных масс в результате возникновения горизонтальных течений в приповерхностном слое водной толщи под действием ветрового трения. При таком условии концентрация зоопланктона в озере увеличивается благодаря переносу из приустьевой области циркуляционными потоками (рис. 3, *б1*), а концентрация фитопланктона сокращается ввиду понижения температуры воды в прибрежной акватории за счет поступления холодных вод из центральной части озера (рис. 3, *a1*). Безветренный режим благоприятно

влияет на рост популяции фитопланктона: на 12 сутки моделирования максимальная концентрация ( $1,2 \text{ ммоль N м}^{-3}$ ) сосредоточена на расстоянии 700 м от устья реки Томпсон (рис. 3, а2).



**Рис. 3. Концентрация фито- (а) и зоопланктона (б) на 12 сутки моделирования при наличии (1) и отсутствии (2) ветра**

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 16-31-60041 мол\_а\_дк.

### Литература

*Goudsmit G.-H., Burchard H., Peeters F., Wüest A.* Application of  $k-\epsilon$  turbulence models to enclosed basin: The role of internal seiches // *J. Geophys. Res.* 2002. N 107 (C12). P. 23-1–23-13.

*Holland P. R., Kay A., Botte V.* Numerical modelling of the thermal bar and its ecological consequences in a river-dominated lake // *J. Mar. Syst.* 2003. Vol. 43, N 1–2. P. 61–81.

*John B. E. St., Carmack E. C., Daley R. J. et al.* The limnology of Kamloops Lake. B.C. Vancouver. 1976. 167 p.

*Leonard B.* A stable and accurate convective modeling procedure based on quadratic upstream interpolation // *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering.* 1979. Vol. 19, N 1. P. 59–98.

*Parker R. A.* Eddy diffusion of phytoplankton and nutrients: Estimating coefficients from simulated and observed vertical distributions // *J. Plankton Res.* 1991. Vol. 13, N 4. P. 815–830.

*Sverdrup H.* On conditions for the vernal blooming of phytoplankton // *Journal du Conseil International pour l'Exploration de la Mer.* 1953. N 18. P. 287–295.

*Tsydenov B. O.* The impact of surface heat fluxes on plankton population dynamics during the thermal bar in a freshwater lake // *Proc. SPIE.* 2016. Vol. 10035. P. 1–9.

*Tsydenov B. O., Kay A., Starchenko A. V.* Numerical modeling of the spring thermal bar and pollutant transport in a large lake // *Ocean Modelling.* 2016. Vol. 104. P. 73–83.

## THE EFFECT OF WIND ON PLANKTON DISTRIBUTION DURING THE HEATING OF A LAKE

**B. O. Tsydenov**

*Tomsk State University*

By the methods of mathematical modeling, the impact of wind on distribution of phytoplankton and zooplankton biomasses during the spring heating of Kamloops Lake, British Columbia, Canada has been shown. Numerical study of hydrobiological processes in the lake is accomplished by using the nutrient–phytoplankton–zooplankton–detritus model of Parker.

## ОСОБЕННОСТИ РЫБОПРОМЫСЛОВОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СИГА И СУДАКА В НЕКОТОРЫХ ВОДОЕМАХ РЕСПУБЛИКИ КАРЕЛИЯ

**Н. С. Черепанова<sup>1</sup>, В. А. Широков<sup>1</sup>, А. П. Георгиев<sup>2</sup>**

*<sup>1</sup>Северный научно-исследовательский институт рыбного хозяйства  
Петрозаводского государственного университета  
<sup>2</sup>Институт водных проблем Севера КарНЦ РАН*

Промысел сига и судака в основных водоемах Карелии высокоинтенсивный, что связано, во-первых, с относительной легкостью и высокой результативностью лова в разные сезоны, во-вторых, с высокой рыночной стоимостью, благодаря которой даже при сравнительно небольших объемах добычи она оказывается экономически выгодной. В этих условиях возникает необходимость регламентировать интенсивность использования запасов этих ценных видов рыб путем введения квот вылова на основании расчетов допустимого вылова с использованием современных расчетов численности и биомассы, отражающих состояние популяций облавливаемых рыб.

Современная ихтиофауна карельских озер включает почти все виды рыб, свойственные водоемам Карело-Кольской лимнологической области, – здесь зафиксировано около 50 видов и разновидностей рыб, принадлежащих к 15 семействам. Говоря об особенностях биологии промысловых рыб (практически в эту категорию попадает лишь 12–13 видов рыб карельских водоемов), следует учесть, что они охватывают широкий круг вопросов, связанных с различными дисциплинами этой науки (морфологией, систематикой, физиологией, экологией и др.). В данной работе мы обращаем ваше внимание на наиболее ценные виды рыб – сига и судака. По данным Л. А. Кудерского [2005], появление сига, к примеру, в котловине Онежского озера причисляется к ее южной части от ледника в позднем плейстоцене, судака – в пливиальный этап атлантического времени в

среднем голоцене. В зоогеографическом отношении виды первой группы являются реликтами микулинского времени, второй группы волго-каспийскими иммигрантами.

На современном этапе сиг и судак являются теми видами, которые испытывают основную рыбопромысловую нагрузку на озерах Карелии. В связи с этим ежегодно проводится сбор и обработка ихтиологического материала с последующим прогнозом общего допустимого улова (ОДУ). Прогноз величины промзапаса сига и судака некоторых озер Карелии составлен на основе анализа динамики численности, биомассы и вылова популяций главных промысловых объектов в многолетнем аспекте, эколого-биологической характеристики видов по материалам 2006–2011 гг., расчетов численности, биомассы и продукции по когортной модели [Рикер, 1979; Pope, Shepherd, 1982].

Сиг (*Coregonus lavaretus* L.) – одна из наиболее ценных промысловых рыб, дающая до 20 % общего улова на внутренних водоемах Карелии. Вид представлен рядом разновидностей (форм), каждой из которых присущи свои морфологические и экологические особенности. Разнообразие форм предопределяет и существование различия в биологических показателях (размерно-весовой состав, темп роста, возрастной ряд, сроки половой зрелости и др.). В то же время можно отметить и ряд общих биологических особенностей, характерных для этого вида в целом.

Сига можно отнести к рыбам со средней продолжительностью жизни. На крупных водоемах (озера Ладожское, Онежское) предельный возраст сига в промысловых уловах последнего десятилетия не превышал 15 лет, в прочих водоемах сиг характеризовался еще более коротким жизненным циклом. Наименьшей продолжительностью жизни отличается многотычинковый озерный сиг из Сямозера – он живет всего 6 лет, а половозрелым становится уже в возрасте 2–3 года. Большинство других сигов созревает на четвертом-пятом году жизни, а ряд проходных форм (шуйский, водлинский) – еще в более позднем возрасте (шестом-восьмом году). Самцы обычно созревают на год раньше самок во всех формах сигов.

Как и у ряпушки и корюшки, темпы снижения численности и ихтиомассы сига происходят с увеличением возраста. Здесь также характерно отставание темпов снижения ихтиомассы от численности. Так, у проходных сигов (шуйского, водлинского) к моменту наступления возраста массовой половозрелости численность снижается в 11,8–15,5 раза, в то время как ихтиомасса – только в 1,2–5,5 раза.

Говоря о специфике полового созревания и нереста сигов северных водоемов, необходимо упомянуть присущую им особенность – пропуски нерестовых сезонов в отдельные годы. В подавляющем большинстве случаев это проявляется только у самок. При этом с продвижением к северу

проявление этой особенности возрастает – если у ладожских сегов нерестовые пропуски в целом носят единичный характер, то у сегов Топо-Пяозерского водохранилища в некоторые годы число таких производителей может доходить до 5–10 % нерестового стада. По мнению Ю. С. Решетникова [1967], пропуски нерестовых сезонов у сегов в наших водоемах – обычное явление, которое следует рассматривать как один из механизмов адаптации вида к короткому вегетационному периоду в северных широтах.

Другой особенностью полового созревания сегов является более поздний срок наступления половозрелости у сегов проходных форм по сравнению с озерными. Так, шуйский проходной сиг в массе достигает половозрелости в возрасте 6+...7+ лет, в то время как озерная лудога созревает в основном уже в пятилетнем (4+) – шестилетнем (5+) возрасте.

Расчеты по численности и биомассе сига в популяциях разных лет и разных водоемов обнаруживают в целом сходную с ряпушкой и корюшкой картину – максимум ихтиомассы приходится на начальные возрастные группы, представляющие неполовозрелую или частично половозрелую часть популяции, т. е. предшествует возрасту массовой половой зрелости (табл. 1).

**Таблица 1. Среднегодовалая численность и биомасса популяций сига водоемов Карелии** (расчетные данные, Архивы СевНИИРХ ПетрГУ)

Возраст	Топо-Пяозерское вдхр		Выгозерское вдхр		Онежское озеро		Ладожское озеро		Сямозеро	
	N	B	N	B	N	B	N	B	N	B
1+	1781,9	33,1	791,8	3,7	5572,2	76,0	738,2	30,7	419,3	4,9
2+	718,9	41,9	244,4	5,6	2304,4	110,4	314,8	34,7	153,2	5,9
3+	368,8	42,0	100,3	5,8	1235,3	123,4	163,5	31,9	70,2	5,5
4+	211,2	38,6	47,3	5,3	740,5	124,6	92,6	27,1	34,9	4,5
5+	128,1	33,9	24,1	4,5	466,7	117,7	54,6	21,9	17,8	3,4
6+	79,8	28,5	12,8	3,6	298,2	104,7	32,7	17,0	8,9	2,3
7+	50,1	23,1	7,0	2,8	188,4	87,4	19,6	12,6	4,2	1,5
8+	31,3	18,0	3,8	2,1	115,2	68,1	11,6	9,0	1,9	0,8
9+	19,2	13,4	2,1	1,5	66,9	49,0	6,8	6,2		
10+	11,4	9,5	1,1	1,0	36,3	32,1	3,8	4,0		
11	6,5	6,3	0,6	0,7	18,0	18,9	2,1	2,5		
12			0,3	0,4	7,9	9,8	1,1	1,5		

*Примечание.* Здесь и в табл. 2: N – численность, тыс. шт.; B – биомасса, т.

Судак (*Sander lucioperca* L.) является, наряду с сегом, одной из наиболее ценных промысловых рыб в крупных озерах и водохранилищах, причем повсеместно интенсивность использования его запасов высока. В Онежском озере на долю судака в последние годы приходилось до 2,8 % общего вылова, в Ладожском озере – до 34,5 %.

Судак относится к рыбам с длительным жизненным циклом. В промысловых уловах встречаются особи до 28-летнего возраста, но в старших возрастных группах численность рыб резко снижается. Темпы прироста ихтиомассы и возраст ее кульминации у судака существенно отличаются от таковых у рыб с коротким жизненным циклом, что является следствием особенностей экологии этого вида. Как хищник с довольно широким спектром питания, судак имеет более стабильную кормовую базу в течение всего многолетнего жизненного цикла. К тому же даже в первые годы жизни он лишь в незначительной степени подвержен прессу хищников. Поэтому возраст кульминации ихтиомассы в популяциях судака в значительной степени определяется уровнем урожайности отдельных поколений. Высокоурожайное поколение может оставаться на положении кульминирующей группы на протяжении нескольких лет, при этом возраст этой группы будет ежегодно увеличиваться. Как следствие этой особенности, возраст кульминации ихтиомассы у судака может варьировать в широком диапазоне – от младших возрастных групп (3+, 4+) до средневозрастных и старших (7+...11+).

Половой зрелости судак достигает в основной массе в шестилетнем (Ладожское озеро) – восьмилетнем (Онежское озеро) возрасте. Таким образом, возраст кульминации ихтиомассы у судака может опережать возраст полового созревания, совпадать с ним и наступать после него (табл. 2).

**Таблица 2. Среднегодовалая численность и биомасса популяций судака водоемов Карелии (расчетные данные, Архивы СевНИИРХ ПетрГУ)**

Возраст	Выгозерское вдхр		Онежское озеро		Ладожское озеро		Сязозеро		Водлозское вдхр	
	N	B	N	B	N	B	N	B	N	B
1+	1012,7	35,4	684,0	50,1	1913,2	480,7	285,9	3,5	715,2	28,7
2+	429,9	46,6	324,4	62,6	1298,8	616,0	96,8	5,3	315,1	39,9
3+	227,2	47,8	186,0	63,2	949,3	652,9	46,2	6,1	183,7	45,5
4+	133,6	45,0	116,9	59,4	715,6	640,6	26,2	6,5	123,4	49,2
5+	83,6	40,5	77,4	53,7	547,5	601,4	16,5	6,6	88,6	51,1
6+	54,3	35,4	52,9	47,4	421,7	547,5	11,1	6,6	61,4	47,9
7+	36,0	30,3	36,9	40,9	325,4	486,6	7,7	6,5	41,2	41,5
8+	24,2	25,3	25,9	34,7	250,8	423,8	5,5	6,2	27,5	34,6
9+	16,3	20,7	18,3	28,8	192,5	362,4	4,0	5,7	18,9	28,8
10+	11,0	16,5	12,9	23,5	147,0	304,9	2,8	5,1	14,7	26,7
11+	7,3	12,9	9,0	18,8	111,6	252,4	2,0	4,4	10,6	22,6
12+	4,8	9,8	6,2	14,6	84,0	205,9	1,4	3,7	7,7	18,9
13+	3,1	7,2	4,2	11,2	62,8	165,5			5,7	16,0
14+			2,8	8,3	46,5	131,1			4,0	12,7
15+			1,9	6,0	34,1	102,4			2,4	8,4
16+			1,2	4,3	24,7	78,9				
17+			0,8	2,9	17,8	59,9				

Непостоянство в соотношении возрастов кульминации ихтиомассы и массовой половой зрелости характерно как для разных поколений судака одного водоема, так и для одновозрастных поколений разных водоемов. Эта особенность возрастной структуры судака резко отличает его от короткоцикловых рыб (ряпушка, корюшка). Снижение численности и ихтиомассы судака с возрастом не меняет общей картины, как и сига, – здесь также проявляется отставание темпов снижения ихтиомассы от численности, но темпы этого снижения у судака значительно ниже, чем у сига.

Таким образом, в структуре исследуемых рыб (сига и судака) половозрелой части популяции прирост ихтиомассы обеспечивается небольшим числом возрастных групп, в основном биомасса падает. Это связано с тем, что на этих возрастах потери ихтиомассы от смертности особей не компенсируются приростом выживших рыб. Однако эти возрастные половозрелые части популяций рыб выполняют основную роль – обеспечивают воспроизводство численности. Существующая интенсивность их промысла не наносит ощутимого ущерба популяциям сига и судака в исследуемых водоемах. На основании полученных расчетов численности и биомассы оцениваются рыбопродукционные возможности исследуемых рыб, определяются ежегодные объемы вылова (ОДУ), обеспечивающие оптимальное их использование в современных условиях рыбодобычи.

### Литература

*Кудерский Л. А.* Пути формирования ихтиофауны Онежского озера // Тр. КарНЦ РАН. 2005. Вып. 7. С. 147–163.

*Решетникова Ю. С.* Периодичность размножения сегов // Вопросы ихтиологии. 1967. Т. 7, № 6. С. 1019.

*Рикер У. Е.* Методы оценки и интерпретации биологических показателей популяций рыб. М.: Пищевая пром-ть, 1979. 408 с.

*Pope J. G., Shepherd J. G.* A simple method for the consistent interpretation of catch-at-age data // J. Cons. Intern. Explor. 1982. Mer. 40. P. 176–184.

### SPECIFIC CHARACTERISTICS OF WHITEFISH AND ZANDER FISHERIES IN SOME WATER BODIES OF THE REPUBLIC OF KARELIA

N. S. Cherepanova<sup>1</sup>, V. A. Shirokov<sup>1</sup>, A. P. Georgiev<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*Northern Fisheries Research Institute, Petrozavodsk State University*

<sup>2</sup>*Northern Water Problems Institute, KarRC RAS*

Fishery for whitefish and zander in Karelia's major water bodies is very intensive, firstly because fishing in different seasons is relatively effortless and effective, and secondly due to high market prices, which make the fisheries economically profitable

even for comparatively low harvesting volumes. Under these conditions, it becomes necessary to regulate the intensity of the use of stocks of these valuable fish species by introducing catch quotas based on calculations of allowable catch using estimates of abundance and biomass reflecting the current state of the harvested populations.

## **ФИТОПЛАНКТОН КРУПНЫХ ОЗЕР СЕВЕРО-ЗАПАДА РОССИИ В УСЛОВИЯХ КЛИМАТИЧЕСКОЙ ИЗМЕНЧИВОСТИ**

**А. Н. Шаров**

*Санкт-Петербургский научно-исследовательский Центр экологической безопасности РАН*

Работа посвящена анализу выявления текущих изменений (последние десятилетия) региональных климатических переменных (температура воды, продолжительность периода без льда, биогенные вещества и др.) на примере Онежского озера (Петрозаводская губа) и Чудско-Псковского озера, их взаимосвязи с глобальными климатическими индексами Североатлантического колебания (NAO, AO) и структурными характеристиками фитопланктона (концентрация хлорофилла *a*, численность/биомасса). Ранговый корреляционный анализ Спирмена обнаружил достоверные ( $p < 0,05$ ) связи между климатическими параметрами и фитопланктоном. Многофакторный регрессионный анализ показал, что глобальные изменение климата определяет в первую очередь региональные климатические переменные и уровень продуктивности в экосистеме озера, тогда как большая часть биотических характеристик реагирует на изменчивость региональных климатических.

На Севере Европы в течение XX и первого десятилетия XXI в. отмечается положительная тенденция изменения средней годовой температуры воздуха. Коэффициенты линейных трендов за период 1951–2009 гг. составляют 0,20–0,34 °C/10 лет для территории Карелии [Филатов и др., 2013]. Потепление климата в регионе последние 20 лет приводит к смещению дат начала и окончания климатических сезонов года. Наибольшее отклонение от климатических норм характерно для дат наступления и окончания теплого периода года (выше 0 °C). За последние 10 лет повысилась средняя годовая температура воды Великих озер Европы. Так, температура водной массы Онежского озера в течение 2000–2009 гг. превышала среднее многолетнее значение, равное 4,3 °C, на 0,3–0,7 °C, а продолжительность безледоставного периода на Онежском озере возросла в среднем от 215 дней за год в конце XIX в. до 227 дней к началу XXI столетия [Филатов и др., 2013]. Аналогичный тренд выявлен для Чудско-Псковского озера [Шаров, Андреева, 2016]. Озера стали очищаться ото льда на 8–10 дней раньше. Анализ данных за 50 лет для

периода открытой воды позволяет выявить наличие положительных климатических трендов  $0,05\text{--}0,07\text{ }^\circ\text{C}/\text{год}$ , температуры поверхности воды Ладожского озера [Гузиватый, 2008]. Тенденции к увеличению температуры воды озер, продолжительности безледоставного периода отмечаются и для разнообразных озер Финляндии, Швеции, Норвегии [Finland's..., 2010].

В последние десятилетия одним из основных приоритетов научных исследований во всем мире является изучение изменчивости климата на планете и их возможных последствий для водных экосистем. Несмотря на ряд публикаций, свидетельствующих о текущих изменениях климатических переменных для различных европейских водных экосистем [Nöges 2004; Markensten 2006; Филатов и др., 2013], об ответных реакциях фитопланктона на изменение климата известно немного.

Исследования Г. И. Летанской (1992–2009 гг.) показали, что несмотря на меняющиеся условия среды, продуктивность фитопланктона Ладожского озера относительно стабильна. В период 1992–2009 гг. не выявлено четкой направленности в изменении средних и максимальных летних величин биомассы фитопланктона и концентрации хлорофилла. В прибрежном районе средняя биомасса составляла  $2,30 \pm 0,24\text{ г}/\text{м}^3$ , концентрация хлорофилла –  $5,62 \pm 0,65\text{ мг}/\text{м}^3$ , на основной акватории –  $0,50 \pm 0,15\text{ г}/\text{м}^3$  и  $0,78 \pm 0,16\text{ мг}/\text{м}^3$ , соответственно [Летанская, Протопопова, 2012].

Для выявления возможных изменений биоты в качестве реакции на климат мы проанализировали отношения между климатическими индексами и переменными (NAO, индексы АО, температура воды, продолжительность периода ледяного покрова и количество осадков) и структурные характеристики биоты (концентрация хлорофилла в воде, обилие/биомасса фитопланктона и их отдельные таксоны) на основе данных долгосрочного мониторинга Петрозаводской губы Онежского озера [Sharov et al., 2014].

Анализ результатов многолетних исследований видового состава, сезонных и годовых колебаний численности и биомассы фитопланктонных сообществ в Онежском озере, показал общую тенденцию увеличения их среднего количества, несмотря на высокую сезонную и пространственную изменчивость. Биомасса фитопланктона изменялась в течение года от  $0,1$  до  $5\text{ г}/\text{м}^3$  с максимумом в начале лета. Климатическая изменчивость влияет на сезонную динамику планктонных комплексов, определяет сроки и интенсивность развития массовых видов [Sharov et al., 2014]. Количество осадков в августе находится в обратной зависимости от продолжительности солнечного сияния ( $r = -0,77$ ,  $p < 0,01$ ) и имеет корреляционную связь с содержанием хлорофилла  $a$  и интенсивностью первичного продуцирования фитопланктона.

На Чудско-Псковском озере в 2012–2015 гг. наблюдалась значительная межгодовая изменчивость биомассы фитопланктона – от 0,3 до 34 г/м<sup>3</sup>, что, возможно, связано с антропогенными и с природными факторами. Это подтверждает результаты более ранних наблюдений [Лаугасте, 1966], в которых отмечались межгодовые различия сезонной динамики биомассы в зависимости от климатических особенностей года.

По данным Кангура с соавторами [Kangur et al., 2003], структура фитопланктона значительно изменилась, и его биомасса (в частности, цианобактерии) имела тренд к увеличению в оз. Чудском в период 1992–2001 гг. По нашим данным, характерной особенностью фитопланктона в 2015 и 2014 гг. было массовое развитие цианобактерий *Aphanizomenon flos-aquae*. Высокие значения численности клеток фитопланктона в 2015 г. по сравнению с предыдущими исследованиями связаны с обилием мелких колониальных видов цианобактерий *Aphanocapsa delicatissima* и *Aphanocapsa planctonica*, на долю которых приходилось до 55 % от суммарной численности.

В период исследования 2012–2015 гг. выявлены близкие корреляционные связи между Chl *a*, биомассой фитопланктона ( $R = 0,63$   $p = 0,001$ ) и прозрачностью воды ( $R = -0,83$   $p = 0,000$ ). Биомасса диатомовых водорослей в августе имеет отрицательную связь с температурой воды ( $R = -0,80$   $p = 0,001$ ) и глубиной станций мониторинга ( $R = -0,76$   $p = 0,002$ ). Среднегодовое содержание N связано с уровнем воды в озере ( $R = 0,74$   $p = 0,002$ ). Очевидно, что в маловодные годы с водосбора поступает меньше биогенных веществ в озеро, чем в многоводные годы. Однако для P достоверная связь с уровнем воды не обнаружена [Шаров, Андреева, 2016].

Отмечены тесные положительные связи ( $R = 0,64-0,83$   $p < 0,002$ ) между концентрацией P в воде в августе и летним индексом NAO, а отрицательные с NAO в марте ( $R = -0,82$   $p = 0,001$ ). Индекс NAO отражает крупномасштабный атмосферный процесс, определяющий климатическую изменчивость в Северном полушарии. При положительных значениях индекса преобладают сильные западные ветры, несущие теплый и влажный воздух на север Европейского континента, что особенно ярко проявляется в зимнее время. При положительном индексе NAO увеличиваются осадки, которые повышают сток в озеро с водосбора. Ясная погода в марте (отрицательный индекс NAO) приводит к интенсивному таянию снега и выносу биогенов. Уровень воды в Чудском озере связан ( $R = 0,54$   $p = 0,003$ ) со среднемесячным индексом NAO в августе [Шаров, Андреева, 2016].

Таким образом, наблюдаются климатические изменения, которые могут привести к трансформации структурных и количественных характеристик водных сообществ. В водоемах Севера России изменения климата

сказываются в первую очередь на ледовом режиме. Это может влиять на длину вегетационного периода и на сезонные циклы водных организмов. В то же время мы не обнаружили достоверных корреляционных связей между климатическими переменными и биомассой фитопланктона из-за сильных сезонных колебаний и влияния других факторов на экосистемы Онежского озера. Антропогенное воздействие (эвтрофикация) увеличивает продуктивность и изменчивость планктонных сообществ. Глубоководные районы Онежского озера характеризуются высокой стабильностью. Наиболее значительные реакции гидробионтов на изменение климата могут ожидать в литоральной зоне.

Наличие достоверных связей между климатическими, гидрохимическими, гидрологическими и биологическими показателями свидетельствует о заметных влияниях климатических колебаний на экосистемы озера. Климатические изменения влияют на фитопланктон Чудско-Псковского озера преимущественно опосредованно через изменение концентрации биогенных веществ и температуры воды.

Антропогенное влияние (эвтрофирование и загрязнение) в локальных районах значительно сильнее оказывает влияние на гидробионтов по сравнению с климатической изменчивостью. В ряде случаев антропогенный фактор усиливается климатической изменчивостью, в результате чего могут кратковременно измениться физико-химические условия среды обитания, увеличиваются сезонные колебания количественных показателей планктона, формируются условия с низким содержанием растворенного кислорода в воде, наблюдается «цветение» воды в безветренную погоду и т. д.

### Литература

*Гузватый В. В.* Особенности изменчивости сезонной структуры термодинамических полей Ладожского озера: Дис. ... канд. геогр. наук. СПб., 2008. 133 с.

*Лаугасте Р. А.* Данные об альгофлоре и сезонной динамике водорослей Чудско-Псковского озера // Гидробиология и рыбное хозяйство Псковско-Чудского озера. Таллин, 1966. С. 49–68.

*Летанская Г. И., Протопопова Е. В.* Современное состояние фитопланктона Ладожского озера (2005–2009 гг.) // Биол. внутр. вод. 2012. № 4. С. 17–24.

*Филатов Н. Н., Руховец Л. А., Назарова Л. Е. и др.* Влияние изменений климата на экосистемы озер // Вестн. РФФИ. 2013. № 2 (78). С. 43–50.

*Шаров А. Н., Андреева И. В.* Пространственно-временная организация фитопланктона Чудско-Псковского озера // Принципы экологии. 2016. Т. 5, № 5. С. 87–99.

*Finland's V National Communication under the United Nations Framework Conventions on Climate Change.* Helsinki, 2010. 282 p.

*Kangur K., Möls T., Milius A., Laugaste R.* Phytoplankton response to changed nutrient level in Lake Peipsi (Estonia) in 1992–2001 // *Hydrobiologia*. 2003. Vol. 506–509. P. 265–272.

*Markensten H.* Climate effects on early phytoplankton biomass over three decades modified by the morphometry in connected lake basins // *Hydrobiologia*. 2006. Vol. 559. P. 319–329.

*Noges T.* Reflection of the changes of the North Atlantic Oscillation Index and the Gulf Stream Position Index in the hydrology and phytoplankton of Voirtsjarv, a large, shallow lake in Estonia // *Boreal Environ. Res.* 2004. Vol. 9. P. 401–407.

*Sharov A. N., Berezina N. A., Nazarova L. E. et al.* Links between biota and climate-related variables in the Baltic region using Lake Onega as an example // *Oceanologia*. 2014. Vol. 56, N 2. P. 291–306.

## **PHYTOPLANKTON OF LARGE LAKES OF NORTHWEST RUSSIA UNDER CLIMATE VARIABILITY**

**A. N. Sharov**

*Scientific Research Center for Ecological Safety, Russian Academy of Sciences*

This paper aims to reveal current changes (last decades) in regional climatic variables such as water temperature, ice-free period, nutrients using the example of Lake Onego (Petrozavodsk Bay) and Lake Peipus and to analyze their relationships with the NAO global climatic indices and structural characteristics of phytoplankton. Spearman's rank correlations found significant ( $p < 0.05$ ) relationships between the climatic variables and phytoplankton. At the same time, multiple regression analysis confirmed that the global climate determines primarily the regional climatic variables and productivity level in a lake ecosystem, while a bulk of biotic characteristics responds to variability of the regional climate.

# **ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ И ПАЛЕОЛИМНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ОЗЕР**

## **КОЛЕБАНИЯ УРОВНЯ ОНЕЖСКОГО ОЗЕРА ЗА ПОСЛЕДНИЕ 600 ЛЕТ (ПО ДЕНДРОХРОНОЛОГИЧЕСКИМ ДАННЫМ)**

**С. П. Гриппа**

*Петрозаводский государственный университет*

Палеогеографические реконструкции природных процессов и параметров природных комплексов опираются на сведения, которые могут ретроспективно дополнить данные современных инструментальных наблюдений. Это важно для понимания динамики развития как отдельных геокомплексов, так и географической оболочки в целом. В статье представлены результаты применения дендрохронологических методов исследований живой и ископаемой древесины для восстановления уровня режима Онежского озера на период до инструментальных наблюдений. Установлены основные крупномасштабные уровни водоема со второй половины XIV в.

### **Введение**

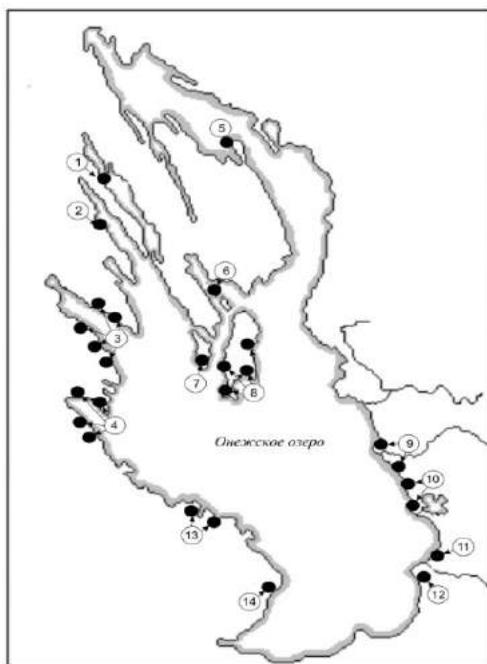
Инструментальные измерения гидрометеорологических параметров имеют относительно непродолжительную историю – в пределах первых сотен, а чаще десятков лет. Применение палеогеографических индикаторов проявления природных процессов в различных геокомплексах позволяет установить вектор и параметры их изменений. Такими индикаторами являются, например, торфяники, содержащие пыльцу и споры растений, слои ленточных глин во флювиогляциальных отложениях, донные осадки озер, разные слои льда в ледниках и др. Точные датировки изменений природной среды, до одного года и даже до сезона, дает дендрохронологический метод (дендроиндикационный [Ловелиус, 1979]).

Деревья являются биоиндикаторами, которые реагируют на изменения окружающей среды колебанием прироста годовичных слоев. Древостои, произрастающие вблизи водоемов или непосредственно на урзе

воды, реагируют на изменения гидрологического режима синхронно или с некоторым запаздыванием в реакции изменения прироста годовых слоев. Методы дендрохронологии дают возможность получить данные по колебанию уровня режима водоема на период, охватываемый дендрохронологическими рядами, полученными как по живой, так и по ископаемой древесине, найденной в пределах береговой линии исследуемого водоема.

### Материалы и методы

В течение 1995–2010 гг. нами проводились полевые и лабораторные исследования хвойных древостоев прибрежных геокомплексов Онежского озера. При этом отбирались образцы в виде древесных кернов с живых деревьев (сосна обыкновенная (*Pinus sylvestris* L.), произрастающих в различных природных комплексах: на урезах воды, на береговых валах, дюнах, озерных террасах, примыкающих к озеру заболоченных древостоев. Всего было отобрано и проанализировано более 150 кернов. Также делались спилы с ископаемой древесины, погребенной в береговых валах, дюнах и прибрежных мелководьях. Данные с ископаемой древесины имеют неопределенные хронологии, поэтому их называют



**Рис. 1. Места отбора дендрохронологических образцов на побережье Онежского озера:**

1 – острова Соколы, залив Уницкая губа; 2 – западный берег залива Лиж-губа; 3 – побережье залива Кондопожская губа; 4 – побережье залива Петрозаводская губа; 5 – о. Палеостров; 6 – о. Волк-остров, залив Великая губа; 7 – о. Большой Леликов; 8 – о. Большой Клименецкий; 9 – ландшафтный заказник «Заозерский»; 10 – ландшафтный заказник «Муромский»; 11 – устье р. Курурека; 12 – устье р. Андомы, урочище Андома-гора; 13 – залив Заячья губа (Янис-лахта) и о. Брусно; 14 – урочище Щелейки

«плавающими». Их увязывали с построенной ранее дендрохронологической шкалой (ДХШ) по среднетаежным древостоям Восточной Финноскандии [Гриппа, 1999] методом перекрестного датирования. Таким способом определялся период жизни и год гибели этих деревьев по последнему годовому кольцу.

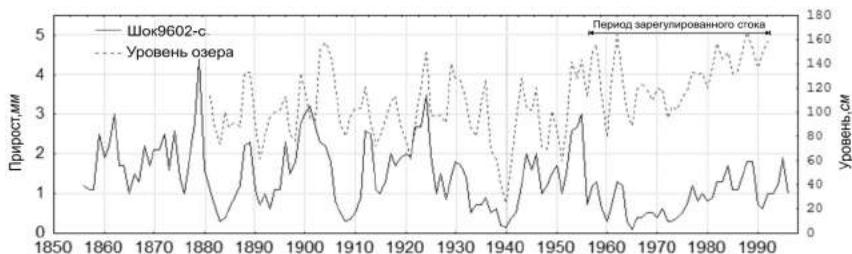
Применялись традиционные методики отбора, просмотра и анализа дендробразцов [Шиятов, 1970]. Дендрохронологические ряды сопоставлялись с инструментальными данными колебания уровня Онежского озера по гидрологическому посту г. Петрозаводска (1881–1993 гг.). Для установления связи между анализируемыми рядами применялись стандартные статистические методы, а также прямое совмещение графиков прироста древесины и колебания уровня воды озера. Полигоны модельных деревьев находятся в пределах западного и восточного побережий, а также некоторых крупных островов Онежского озера (рис. 1).

### Результаты и обсуждение

Дендроиндикационным исследованиям по определению влияния уровня режима водоемов на прирост древесины посвящено немало работ [Рудаков, 1953, 1964; Нарышкин, 1961; Галазий, 1967; Пакальнис, 1971; Alestalo, 1971; Дьяконов, 1975; Ловелиус, 1979; Ларин, 1988; Brinkmann, 1992; Филатов, Гриппа, 1997 и др.]. В наших исследованиях основное внимание уделялось древостоям, произрастающим в условиях избытка или недостатка увлажнения: вблизи уреза воды, на песчаных или галечных реликтовых береговых валах, заболоченных берегах и т. п. Для деревьев такие условия являются экстремальными и ведущим фактором, влияющим на прирост, является один – избыток или недостаток увлажнения. Анализ показал, что деревья, произрастая в неблагоприятных для них местообитаниях, оказываются чувствительнее к изменению внешних условий.

Наиболее яркими примерами зависимости прироста от изменения уровня воды являются образцы сосен, растущие на первых реликтовых береговых валах, сложенных мелкой и средней галькой, а также на абразионно-аккумулятивных озерных террасах. Нами было установлено, что сосны, произрастающие в непосредственной близости от воды, могут испытывать недостаток влаги в грунте, так как галечные и песчаные береговые валы хорошо дренируются и при низких горизонтах воды растительность не получает достаточного количества минерального питания из раствора. При повышении уровня озера корни деревьев достигают водоносного горизонта, и прирост древесины увеличивается. Коэффициенты корреляции ширины годичных колец с

уровнем воды озера составляют  $|0,65| - |0,80|$ , для отдельных периодов –  $|0,90|$ . Графики этих процессов в сходных условиях произрастания носят синхронный характер, в том числе и по амплитуде. Отмечаются совпадения колебаний, как в период естественного режима, так и в период зарегулированного стока – с 1952 г., когда Онежское озеро стало водохранилищем (рис. 2).



**Рис. 2.** Ход среднего многолетнего уровня Онежского озера и прироста годичных колец образца Шок-9602-с сосны, произрастающей на реликтовом береговом валу

Нами отмечено сходство хода кривых прироста годичных колец у деревьев, произрастающих в сходных прибрежных геоконплексах: на галечных береговых валах или скальниках, но удаленных друг от друга на 50–100 км. Наблюдается высокая степень синхронности в ходе кривых и достаточно высокий коэффициент корреляции –  $|0,80|$ . Кроме того установлено, что сосны, растущие на хорошо дренированных грядах примыкающих к озеру болот, также чутко реагируют на колебания уровня водоема: при подъеме воды возрастает радиальный прирост колец. Такая закономерность отмечена у деревьев, произрастающих в основании реликтовых береговых валов и дюн юго-восточного побережья Онежского озера. С другой стороны, деревья, произрастающие в условиях гидроморфных почв прибрежной полосы, имеют обратную реакцию на повышение уровня воды в озере, коэффициенты корреляции варьируются от  $|0,65|$  до  $|0,75|$ . В спектральной области выделяется высокая степень когерентности исследуемых процессов.

С помощью дендрохронологического метода было установлено время укоренения древостоя на реликтовых береговых валах, образовавшихся после понижения среднего уровня воды в озере. Учитывая методику Г. И. Галазия [1967], проанализировав керны деревьев с первого реликтового вала, можно предположить, что он образовался не позднее

1825–1828 гг. Средний уровень воды в этот период был на 0,4–0,5 м выше современного среднего. Второй береговой вал мог сформироваться в начале 1590-х гг. Подъем воды повлиял на прирост деревьев, укоренившихся в 1520-х гг., и, учитывая их местоположение, мы считаем, что средний уровень Онежского озера в конце XVI в. был выше на 1,8–2,0 м.

В районе Муромского ландшафтного заказника были обнаружены остатки деревьев, находящихся в прибрежной зоне – на глубине 0,5 м. Они были описаны Д. Д. Квасовым и Б. И. Кошечкиным [1990]. С трех таких пней и двух погребенных в первом реликтовом береговом валу стволов были отобраны спилы. Кросскорреляционный анализ показал полную идентичность данных образцов, что подтвердило гипотезу их местного происхождения. Вероятно, деревья были сломаны во время сильных штормов и вынесены на отлогий берег, на котором позднее образовался береговой вал высотой 1,8–2,2 м над современным уровнем воды. Поэтому был сделан вывод о достаточности низких уровней воды Онежского озера в период произрастания модельных деревьев. Время их жизни было установлено методом перекрестного датирования по ДХШ. В результате получены даты укоренения (1375 г.) и гибели модельных деревьев (1599 г.), что позволяет установить период низкого уровня воды Онежского озера и время начала ее подъема. Таким образом, можно с большой степенью уверенности говорить о том, что в 1370-е гг. уровень Онежского озера был не менее чем на 0,5–1,0 м ниже современного. В последующие века уровень воды в озере поднимался и достиг высоты 1,8–2,0 м от современного в конце XVI в. Доказательством высокого уровня воды Онежского озера в XIV–XVI вв. является упоминание в писцовой книге Заонежской половины Обонежской пятины о том, что Муромский монастырь во время своего возникновения – в XIV в. – находился на острове Муромском [Энциклопедический словарь..., 1906; История Карелии..., 1993, с. 263]. Время строительства церкви Лазаря Муромского по дендрохронологическим данным приходится на 1520 г. [Zettenberg, 1990]. Это соответствует периоду, когда церковь была на острове.

### **Выводы**

Дендрохронологические исследования сосновых древостоев в районе западного и восточного побережий Онежского озера позволяют утверждать, что существует зависимость прироста годичных слоев древесины от колебания уровня воды озера: деревья откликаются на это увеличением или уменьшением прироста в зависимости от эдафических факторов местообитания. Определены периоды крупномасштабных изменений



**Рис. 3. Профиль дюны и реликтовых береговых валов на восточном побережье Онежского озера**

уровня Онежского озера со второй половины XIV в.: 1) уровень озера в конце XIV в. был примерно на 1 м ниже современного; 2) в конце XVI в. – выше современного примерно на 2 м; 3) в начале XIX в. – выше современного примерно на 1 м (рис. 3).

### Литература

*Галазий Г. И.* Динамика роста древесных пород на берегах Байкала в связи с циклическими изменениями уровня воды в озере // Геоботанические исследования на Байкале. М., 1967. С. 44–301.

*Группа С. П.* Дендроиндикация естественных и антропогенных изменений природных условий Восточной Финноскандии: Автореф. дис. ... канд. геогр. наук. СПб., 1999. 19 с.

*Дьяконов К. Н.* Влияние крупных равнинных водохранилищ на леса прибрежной зоны. Л.: Гидрометеоздат, 1975. 127 с.

*История Карелии* в документах. III / Под ред. И. Черняковой и К. Катаяла. Петрозаводск; Июэнсуу, 1993. 510 с.

*Квасов Д. Д., Кошечкин Б. И.* Геоморфология береговой зоны / Онежское озеро // История Ладожского, Онежского, Псковско-Чудского озер, Байкала и Ханки (Серия: История озер СССР). Л.: Наука, 1990. С. 83–85.

*Ларин С. И.* Дендроиндикация изменений уровней озер Мондинской котловины (Восточный Саян) // Изв. ВГО. 1988. Т. 120, вып. 2. С. 178–181.

*Ловеллус Н. В.* Изменчивость прироста деревьев: дендроиндикация природных процессов и антропогенных воздействий. Л.: Наука, 1979. 231 с.

*Нарышкин М. А.* Прирост ели в зависимости от уровня грунтовых вод и некоторых метеорологических факторов // Тр. Лаборатории лесоведения АН СССР. 1961. Т. 3. С. 24–36.

*Пакальнис Р.* Применение методов дендроклиматологии при изучении влияния подтопления на ширину годовых колец прибрежных насаждений // Радиоуглерод. Вильнюс, 1971. С. 103–105.

*Рудаков В. Е.* Возможность восстановления хода колебаний стока рек по годовым кольцам деревьев на примере реки Волги // Изв. АН СССР, сер. Геогр. 1953. № 4. С. 101–103.

*Рудаков В. Е.* Годичный прирост деревьев как показатель колебаний стока рек // Известия ВГО. 1964. Т. 96, вып. 6. С. 96–98.

*Филатов Н. Н., Грунна С. П.* Дендрохронологический анализ и колебания уровня крупнейших озер Европы // Филатов Н. Н. Изменения климата Восточной Фенноскандии и уровня воды крупнейших озер Европы. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 1997. С. 33–39.

*Шиятов С. Г.* К методике расчета индексов прироста деревьев // Экология. 1970. № 3. С. 85–87.

*Энциклопедический словарь.* Дополнительные главы. II. СПб., 1906. 480 с.

*Alestalo J.* Dendrochronological interpretation of geomorphic processes // Fennia. 1971. N 105. 140 p.

*Brinkmann W.* Local tree-rings and teleconnections: Way to improve the reconstruction of lake Superior water supplies // J. Great Lakes Res. 1992. Т. 18, N 3. P. 357–363.

*Zetterberg P.* Applications of tree-ring dating in architectural history and archeology in Karelia // Sessiones sectionum. Dissertationes. Historica, archaeologica et anthropologica. Congressus septimus internationalis fenno-ugristarum. Debrecen, 27. VIII.-2. IX. 1990. Debrecen, 1990. P. 326–330.

## **WATER LEVEL FLUCTUATIONS OF LAKE ONEGO DURING THE LAST 600 YEARS ACCORDING TO DENDROCHRONOLOGICAL PROXY RECORDS**

**S. P. Grippa**

*Petrozavodsk State University*

Paleogeographic reconstruction of the natural processes and ecosystem parameters are based on retrospective data that can complement the findings of contemporary instrumental monitoring. It is a significant point in understanding the development dynamics of both individual geocomplexes and the geographical environment as a whole. The article offers the results of the investigation of both living and fossil wood by dendrochronological methods applied to reconstruct Lake Onego level fluctuations before instrumental monitoring. Major large-scale levels of the lake since the second half of the 14th century were determined.

**ИЗМЕНЕНИЕ СОСТАВА СООБЩЕСТВ CLADOCERA  
(BRANCHIOPODA, CRUSTACEA) В ОЗЕРЕ АНТЮХ-ЛАМБИНА  
(КОЛЬСКИЙ ПОЛУОСТРОВ, МУРМАНСКАЯ ОБЛАСТЬ)  
В ГОЛОЦЕНЕ**

**А. Г. Ибрагимова<sup>1</sup>, Л. А. Фролова<sup>1</sup>, И. М. Греков<sup>2</sup>, Л. С. Сырых<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>*Казанский (Приволжский) федеральный университет*

<sup>2</sup>*Российский государственный педагогический университет  
им. А. И. Герцена*

<sup>3</sup>*Институт водных проблем Севера КарНЦ РАН*

Исследование выполнено в целях восстановления климатических и экологических условий прошлого на территории Кольского полуострова. Озеро Антюх-Ламбина некогда было частью крупного озера Колвицкого, следовательно, его донные «архивы» содержат информацию о его развитии, смене природных обстановок на водосборе, изменении климатических условий региона в целом. В работе представлены результаты палеобиологического анализа сообществ Cladocera в донных отложениях озера Антюх-Ламбина. Установлено, что в водоеме преобладают палеарктические и голарктические таксоны. В работе использованы индексы, определяющие степень видового богатства, разнообразия и доминирования сообществ ветвистоусых ракообразных, выполнены статистический и стратиграфический анализы.

Реконструкции климатических и экологических обстановок прошлого привлекают все больше внимания в связи с изменениями климата, сопровождающимися повышением уровня Мирового океана, таянием ледников и вечной мерзлоты, усилением неравномерности выпадения осадков, изменением режима стока рек и другими глобальными изменениями, связанными с неустойчивостью климатической системы [Алексеев, 2009]. Со второй половины XX в. создаются глобальные климатические модели, которые включают в себя описание физических, химических и биологических процессов, происходящих в гидросфере, литосфере, атмосфере, криосфере, и позволяют понять, какие изменения происходят в климате сейчас и что ожидает нас в будущем [Назарова, Нурғалиев, 2011].

Палеоэкологические исследования, направленные на более точную реконструкцию условий прошлого исследуемых регионов, способствуют выявлению трендов развития климата Земли и проверяют достоверность глобальных климатических моделей [Назарова, Нурғалиев, 2011]. Данные исследования представляют собой комплекс методов изучения особенностей состава, морфологии, образа жизни различных систематических групп организмов и их фациальной приуроченности [Чернов, 2004].

Донные отложения озер, которые накапливаются с момента образования озера с различной скоростью осадконакопления, хранят в своих толщах остатки различных организмов растительного и животного происхождения (диатомовые водоросли, споры и пыльца растений, остатки насекомых (хируномид, кулицид) и ветвистоусых ракообразных), кремниевые и хитиновые структуры которых имеют высокую степень сохранности [Kienast et al., 2011; Frolova et al., 2014; Фролова, Ибрагимова, 2015]. Стоит отметить, что некоторые таксоны, используемые в палеоиндикации, такие как представители семейства *Chironomidae* и *Cladocera*, реагируют на изменения климата быстрее, чем другие индикаторы, например пыльца деревьев [Pawłowski, 2012].

Среди палеоиндикаторов все большую популярность приобретает анализ донных отложений на основе остатков ветвистоусых ракообразных. Хитиновые части экзоскелета *Cladocera* (карапаксы, постабдомены, постабдоменальные коготки, мандибулы, головные щиты и пр.) позволяют идентифицировать обнаруженные остатки до различных таксономических рангов [Frolova, 2016]. Биоиндикация проводится на основе приуроченности видов к различным биотопам, проявления разной степени толерантности к биотическим и абиотическим факторам окружающей среды [Фролова, 2011; Frolova et al., 2016; Ibragimova et al., 2016].

Объектом исследования было выбрано оз. Антюх-Ламбина, расположенное в юго-западной части Кольского полуострова (N 67°07'; E 33°31'), восточнее г. Кандалакши, на одних абсолютных отметках (59,4 м над современным уровнем моря) с оз. Колвицким, с которым оно соединено узким проливом. Озеро вытянутой формы имеет площадь примерно 200 м<sup>2</sup> и максимальную глубину 4 м.

Суровый климат Кольского полуострова находится под влиянием положения региона на крайнем северо-западе России. Средняя температура июля составляет 10–12°, средняя температура января около –9,5°. Годовая сумма осадков 350–400 мм [Мильков, Гвоздецкий, 1986]. Среднегодовая температура воздуха в г. Мурманске за десятилетие 2004–2013 гг. возросла на 1,4 °C [Демин и др., 2014].

Летом 2015 г. произведен отбор колонки донных отложений оз. Антюх-Ламбина длиной 3 м [Греков, Колька, 2015]. Колонка отобрана для радиоуглеродного, литологического и биоиндикаторных анализов (диатомовый, споро-пыльцевой, хируномидный и кладоцерный). Радиоуглеродное датирование выполнялось в лаборатории геоморфологических и палеогеографических исследований полярных регионов и Мирового океана Института наук о Земле СПбГУ г. Санкт-Петербурга. Анализ установил, что возраст исследуемой колонки составляет около 11 000 кал. лет.

Обработка проб проводилась по стандартной методике, для идентификации остатков использовались специализированные определители. Пробы просматривали под световым стереомикроскопом AxioStar Plus Carl Zeiss при увеличении  $\times 100$ – $400$ . В каждой пробе было идентифицировано минимум 100 остатков. Для идентификации использовали как современные специализированные определители рецентных и субфоссильных Cladocera [Szeroczyńska, Sarmaja-Korjonen, 2007; Фролова, 2011; Korosi, Smol, 2012], так и определители современных Cladocera [Smirnov, 1971; Alonso, 1996; Flössner, 2000; Kotov et al., 2010]. При подсчете остатков карапаксов за один экземпляр Cladocera принимались две обнаруженные в грунте створки раковины.

Анализ изменения разнообразия биотических групп выполнен с использованием индексов, определяющих степень видового богатства, разнообразия и доминирования сообществ ветвистоусых ракообразных: индекса Шеннона-Уивера [Shannon, Weaver, 1963], индекса выравнинности экологических групп Пиелу [Pielou, 1966]. Статистический и стратиграфический анализы выполнены в программе C2 С. Джаггенса [Juggins, 2007], фаунистические зоны выделены с помощью кластерного анализа CONISS программы TILIA version 2.0.b.4 [Grimm, 2004]. В стратиграфический анализ включены таксоны, относительная численность которых составила не менее 1 % от общей численности Cladocera в пробе.

Согласно литостратиграфическому анализу разреза в нижней части колонки осадки представлены зеленовато-серыми глинами (6,95–6,37 м), далее сменяющимися четкой переходной зоной, сформированной алевритом с гиттией (6,37–6,1 м). Далее выделяется мощный слой гиттии с большим количеством алеврита, уменьшающегося вверх по разрезу, с отчетливыми крупными макроостатками.

В составе субфоссильного кладоцерного сообщества выявлено 34 таксона. В водоеме преобладают виды, свойственные зонам палеарктики и голарктики. Явным доминантом кладоцерного сообщества озера является типичный представитель открытой пелагической части водоемов – *Bosmina (Eubosmina) cf. longispina*. Однако стоит отметить, что значительного развития в озере достигают виды-филофилы и виды-обитатели литоральной зоны водоема, что свидетельствует о наличии в нем мелководных зон и участков, заросших макрофитами.

На основе состава субфоссильных сообществ ветвистоусых ракообразных были выделены четыре статистически значимые стратиграфические зоны.

Зона I (10 800–8700 кал. л. н.). Богатое таксономическое разнообразие сочетается с количественной представленностью остатков хитиновых структур Cladocera. Доминируют представители рода *Bosmina* sp.

Многочисленны виды, предпочитающие мелководные заросшие макрофитами участки водоема. Развитие *Chydorus sphaericus* в начальные этапы образования водоема может быть следствием высокой степени трофности озера.

Зона II (8700–7470 кал. л. н.). Происходит уменьшение относительно количества *Bosmina* cf. *longispina* с дальнейшим увеличением его на верхней границе зоны. Уменьшается представленность *Chydorus sphaericus*, *A. guttata/rectangula*. Фиксируется пик развития северных видов – *Camptocercus rectirostris*, *Eurycercus lamellatus*, *Alonella nana*. Изменение качественного состава обнаруженных остатков Cladocera свидетельствует о похолодании климата.

Зона III (7470–4400 кал. л. н.). Число остатков северных видов снижается. Изменения в составе Cladocera могут свидетельствовать о некотором потеплении с середины обозначенного периода.

Зона IV (4400 кал. л. н. до настоящего времени). Происходит уменьшение количества *Bosmina* cf. *longispina*. Отмечается увеличение значимости *Chydorus sphaericus*, что свидетельствует о начальных этапах эвтрофикации.

Анализ субфоссильного сообщества Cladocera оз. Антюх-Ламбина установил, что на протяжении более 11 000 непрерывного осадконакопления в озере происходили изменения, связанные с колебаниями климата и сменой экологических условий. Среднее значение индекса Шеннона исследуемого озера составило  $1,99 \pm 0,09$ , что позволяет классифицировать озеро как умеренно-загрязненное. Значения индекса Пиелу варьировали в пределах от 0,02 до 0,53 (в среднем – 0,31), что свидетельствует о недостаточно устойчивой и выровненной структуре сообщества.

Работа выполнена за счет средств субсидии, выделенной Казанскому федеральному университету для выполнения государственного задания в сфере научной деятельности, и при финансовой поддержке РФФИ (проект № 15-05-04442).

## Литература

Алексеев Г. В., Добролюбова Ю. С., Конищев В. Н. и др. Тающая красота. Изменение климата и его последствия. М.: Фонд им. Генриха Бёлля, Российский региональный экологический центр, 2009.

Греков И. М., Колька В. В. Палеогеография северного побережья Кандалакшского залива Белого моря (долина р. Колвицы) в позднеледниковье и голоцене по данным изучения донных отложений малых озер (предварительные данные) // Геология морей и океанов: Материалы XXI Междунар. науч. конф. (Школы) по морской геологии / Отв. ред. акад. А. П. Лисицын. Т. III. М.: ГЕОС, 2015. С. 153–155.

Демин В. И., Священников П. Н., Иванов Б. В. Изменения крупномасштабной циркуляции атмосферы и современное потепление климата на Кольском полуострове // Вестн. Кольского научного центра. 2014. № 2 (17). С. 102–106.

Мильков Ф. Н., Гвоздецкий Н. А. Физическая география СССР. Общий обзор. Европейская часть. Кавказ. М.: Просвещение, 1986.

Назарова Л. Б., Нургулиев Д. К. Методические подходы к использованию биологических индикаторов в палеоэкологии: Ветвистоусые ракообразные в палеоэкологических исследованиях. Казань: Казан. гос. ун-т, 2011. С. 280.

Фролова Л. А. Методические подходы к использованию биологических индикаторов в палеоэкологии: Ветвистоусые ракообразные в палеоэкологических исследованиях / Под ред. Л. Б. Назаровой. Казань: Казан. гос. ун-т. 2011. С. 280.

Фролова Л. А., Ибрагимова А. Г. Карцинологический анализ донных отложений озер Километровое и Котово Харбейской системы (Большеземельская тундра) // Тр. КарНЦ РАН, сер. Лимнология. 2015. № 5. С. 5–17.

Чернов А. В. Историческое земледение (палеогеография) / Под ред. И. С. Воскресенского. Учебное пособие для студентов географических факультетов педагогических вузов. М.: МГПУ, 2004. 154 с.

Alonso M. Crustacea Branchiopoda Fauna Iberica. Madrid: Museo Nacional de Ciencias Naturales CSIC, 1996. Vol. 7. 486 p.

Flössner D. Die Naplopoda und Cladocera (ohne Bosminidae) Mitteleuropas. Backhuys Publishers, Leiden, 2000. 428 p.

Frolova L. Subfossil Cladocera (Branchiopoda, Crustacea) in climatic and palaeoenvironmental investigations in Eastern Siberia (Russia) // 16th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2016, Conference Proceedings. 2016. Book 4, Vol. 2. P. 601–606.

Frolova L., Ibragimova A., Fedorova I. Stratigraphy of Cladocera in a core from A Yamal Peninsula lake (Arctic Russia) // Ibid. P. 579–587.

Frolova L., Nazarova L., Pestryakova L., Herzs Schuh U. Subfossil cladoceran remains from sediment in thermokarst lakes in northeastern Siberia, Russia // Journal of Paleolimnology. 2014. Vol. 52, Issue 1. P. 107–119.

Grekov I. M., Kolka V. V. Paleolimnological study of lake sediments on SW Kola peninsula // Paleolimnology of Northern Eurasia. Experience, Methodology, Current Status: Proceedings of the International Conference. Yakutsk, 22–27 August, 2016 / Eds.: S. Levina, R. Gorodnichev, I. Yadrinkhinski, P. Davydova. Yakutsk: North-Eastern Federal University, 2016. P. 44–47.

Grimm E. C. TG View 2.0.2 (Software), United States, 2004.

Ibragimova A. G., Frolova L. A., Grekov I. M. Results of subfossil Cladocera (Branchiopoda, Crustacea) analyses from bottom deposits of Lake Antyukh-Lambina (Kola Peninsula, Murmansk region) // Research Journal of Pharmaceutical, Biological and Chemical Sciences. 2016. Vol. 7, N 6. P. 3201–3206.

Juggins S. C2 Version 1.5 User guide. Software for ecological and palaeoecological data analysis and visualization. Newcastle University, Newcastle upon Tyne, UK, 2007.

*Kienast F., Wetterich S., Kuzmina S. et al.* Paleontological records prove boreal woodland under dry inland climate at today's Arctic coast in Beringia during the last interglacial // *Quaternary Science Reviews*. 2011. Vol. 30, N 17/18. P. 2134–2159.

*Korosi J. B., Smol John P.* An illustrated guide to the identification of cladoceran subfossils from lake sediments in northeastern North America / *The Chydoridae*. Springer Science+Business Media B.V. 2012.

*Kotov A. A., Sinev A. Ju., Glagolev S. M., Smirnov N. N.* Cladocera in Identification Key of zooplankton and zoobenthos of European Russia freshwater // Vol. 1. Zooplankton / V. R. Alekseeva, S. Ja. Calolihina (Eds.). Moscow: Partnership of scientific publications KMK, 2010. P. 151–276.

*Pawłowski D.* Younger Dryas Cladocera assemblages from two valley mires in central Poland and their potential significance for climate reconstructions / *Institute of Geology, Adam Mickiewicz University, Maków Polnych 16, 61-606 Poznań, Poland, Geologos* 18, 4 (2012). P. 237–249.

*Pielou E. C.* The measurement of diversity in different types of biological collections // *J. Theor Biol.* 1966. Vol. 13. P. 131–144.

*Shannon C., Weaver W.* The mathematical theory of communication. Univ. Illinois Press. Illinois, 1963.

*Smirnov N. N.* Chydoridae of the world fauna. The fauna of the USSR. Crustaceans. L.: Nauka, 1971. Vol. 1, N 2. 531 p.

*Szeroczyńska K., Sarmaja-Korjonen K.* Atlas of Subfossil Cladocera from Central and Northern Europe. Friends of the Lower Vistula Society, 2007. 84 p.

**THE CHANGE IN CLADOCERA (BRANCHIOPODA, CRUSTACEA)  
COMPOSITION OF THE LAKE ANTYUKH-LAMBINA  
(KOLA PENINSULA, MURMANSK REGION)  
IN THE HOLOCENE**

**A. G. Ibragimova<sup>1</sup>, L. A. Frolova<sup>1</sup>, I. M. Grekov<sup>2</sup>, L. S. Syrykh<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>*Kazan (Volga region) Federal University*

<sup>2</sup>*Herzen State Pedagogical University*

<sup>3</sup>*Northern Water Problems Institute, KarRC RAS*

The aim of the study was to reconstruct the history of past climatic and ecological conditions in the Kola Peninsula. Lake Antyukh-Lambina was once a part of the large Lake Kolvitskoye and, consequently, its sedimentary "archives" bear information about its development, shifts of natural environments in the catchment, and changes in climatic conditions in the region at large. The paper presents the results of the palaeobiological analysis of the cladoceran community in sediments of Lake Antyukh-Lambina. It was established that Palaeartic and Holarctic taxa prevail in the lake. Indices of the degree of specific richness, diversity and dominance in cladoceran communities were used; statistical and stratigraphic analyses were performed.

# СОЗДАНИЕ ПАЛЕОЛИМНОЛОГИЧЕСКОЙ БАЗЫ ДАННЫХ СЕВЕРА ЕВРАЗИИ КАК ОСНОВЫ ДЛЯ РЕКОНСТРУКЦИИ ПРИРОДНО-КЛИМАТИЧЕСКИХ ИЗМЕНЕНИЙ ПРОШЛОГО

Н. А. Мясникова<sup>1</sup>, Д. А. Субетто<sup>1,2</sup>, Л. С. Сырых<sup>2,3</sup>, И. М. Греков<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*Институт водных проблем Севера КарНЦ РАН*

<sup>2</sup>*Российский государственный педагогический университет  
им. А. И. Герцена*

<sup>3</sup>*Казанский (Приволжский) федеральный университет*

С целью систематизации и анализа информации о развитии озерных экосистем Севера Евразии в неоплейстоцене и голоцене разрабатывается палеолимнологическая база данных (БД). В настоящей работе авторами рассмотрены структура, формат и графическое представление БД. Формат базы удобен для экспорта и обработки данных в различных ГИС и статистических программах.

Нехватка пресной воды на нашей планете – одна из актуальных проблем, с которой столкнулось человечество в конце XX – начале XXI в. При этом интерес к данному вопросу усиливается как в связи с ростом численности населения, так и в связи с развитием сельского хозяйства и промышленности. Оценка современного состояния водных объектов, в том числе и озер, подразумевает мониторинговые наблюдения. Однако мониторинг озер требует не только экологического, но и исторического подхода, т. е. оценки их развития во времени. Несмотря на то что активные палеолимнологические исследования северных территорий России проводятся на протяжении длительного времени, целостной базы данных по озерам не существует [Субетто и др., в печати]. На северо-западе России созданы отдельные базы данных для Мурманской [Быдин, 1962; Кашулин и др., 2010], база данных «Q-KOLA» [Субетто, Греков, 2014; Греков, Субетто, 2015]; Псковской [Лесненко, Абросов, 1973; Лесненко, 1989]; Ленинградской областей [Рянжин и др., 2015] и Республики Карелия [Григорьев, 1959; Озера Карелии..., 1959; Каталог..., 2001]. Палеолимнологические исследования на территории Восточно-Европейской равнины систематизированы в базе данных «PaleoLake» [Субетто, Сырых, 2014; Syrykh et al., 2014]. С целью сбора и систематизации литературных источников по палеогеографии России и мира создана база данных, содержащая научные публикации по палеогеографическим исследованиям [Греков и др., 2016]. При проведении реконструкции исторического развития водных экосистем, разработке компьютерной имитационной модели поведения экологической системы водоема под влиянием изменяющихся климатических и антропогенных воздействий необходимы знания о долговременных изменениях озерных экосистем. Создание

палеолимнологической базы данных для Севера Евразии является необходимым условием для проведения подобных работ [Субетто, 2016].

В Институте водных проблем Севера (ИВПС КарНЦ РАН) с целью систематизации накопленных научных данных по северным озерам Евразии проводятся работы по созданию палеолимнологической базы в формате MS Excel, что делает ее удобной для интеграции в различные ГИС-оболочки и статистические программы. В дальнейшем планируется разработка на ее основе карты-справочника. База данных содержит сведения об озерах Северной Европы (Норвегия, Финляндия, Швеция, Эстония) и Российской Федерации.

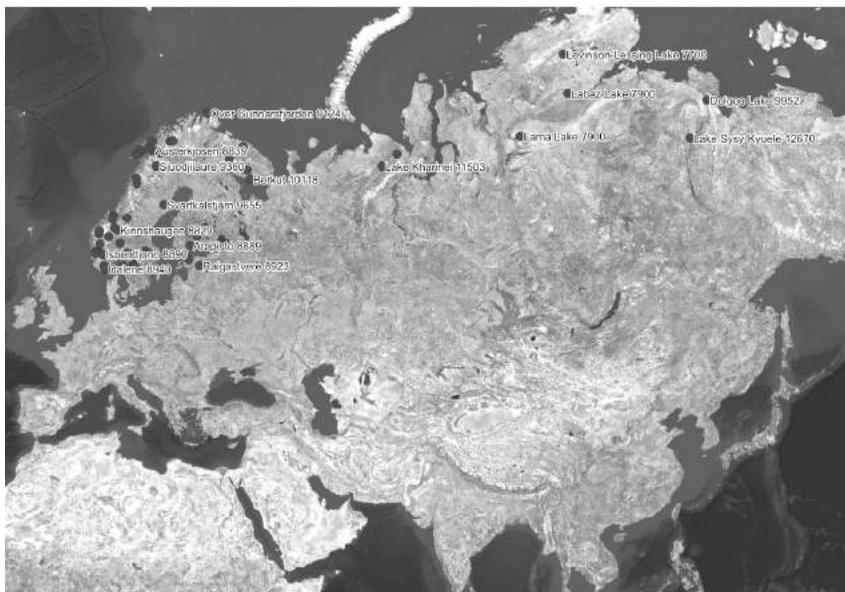
Структура палеолимнологической базы данных (рис. 1) включает в себя следующие разделы:

- 1) географические сведения (название озера, страна, географический район, географические координаты, высота над уровнем моря);
- 2) виды анализов донных отложений (литологический, геохимический, хирономидный, спорово-пыльцевой, диатомовый и др.);
- 3) результаты датирования донных отложений (самый древний возраст, самый молодой возраст, радиоуглеродное датирование, изученный интервал времени осадконакопления);
- 4) источники информации (ссылки, источники сведений).

Site Name	Country	General location	Latitude (N)	Longitude (E)	Elevation (m)	Analysis type 1	Analysis type 2	Analysis type 3	Analysis type 4	Other age	Youngest age	14C age	14C age range	14C age range	Dating 14C	Chronology	Citation	Location
1		озерная часть	60,58	24,80	133	false	true	false	false	8889	0		110	3	1,3		Serrin Korhonen and Serrin (2007)	Финляндия озерная часть
2	Финляндия	озерная часть	68,53	17,27	135	false	true	false	false	8839	19		294	3	-2,8		Serrin et al. (2009)	Финляндия озерная часть
4	Россия	Кольский полуостров	66,35	36,67	25	true	false	false	false	10118	0		235	3	1,1		Brobak et al. (2004)	Финляндия озерная часть
5	Норвегия	озерная часть	68,43	18,07	510	false	true	false	false	8960	45		182	1	-1,5		Serrin et al. (2009); Brooks (2006)	Финляндия озерная часть
6	Норвегия	озерная часть	61,42	8,87	1709	true	false	false	false	10900	27		182	1	-1,5		Vaio et al. (2005)	Финляндия озерная часть
7	Россия	Кольский полуостров	67,95	32,48	475	false	true	false	true	9300	10		63	3	0,8		Salonen et al. (2005)	Финляндия озерная часть
8	Норвегия	озерная часть	38,24	8,00	40	false	true	false	false	8940	-87		184	3	-1,8		Serrin et al. (2009)	Финляндия озерная часть
9	Норвегия	озерная часть	69,17	20,72	355	false	true	false	false	10514	0		148	3	1,7		Blane et al. (2004)	Финляндия озерная часть
10	Норвегия	Флогфонн	60,03	6,07		false	false	false	true	11532	-51		56	2	-1,6		Bakke et al. (2005)	Финляндия озерная часть

Рис. 1. Фрагмент палеолимнологической базы данных Севера Евразии

Для систематизации и облегчения поисковых запросов необходимой информации объекты палеолимнологической базы данных Севера Евразии представлены на картосхеме (рис. 2).



**Рис. 2. Пример картосхемы объектов палеолимнологической базы данных Севера Евразии**

На текущий момент база данных содержит 63 объекта и продолжает пополняться новыми сведениями.

Последующие систематизация и анализ информации БД озер Севера Евразии позволит выполнить реконструкцию исторического развития водных экосистем на больших территориях и объективно оценить степень антропогенного вмешательства в развитие экологической системы водоема, проводить достоверную оценку состояния водных ресурсов по качественным и количественным показателям.

### **Литература**

*Быдин Ф. И.* Каталог озер Мурманского региона. Л.; М.: Изд-во АН СССР, 1962. 146 с.

*Греков И. М., Субетто Д. А.* Применение базы палеогеографических данных Кольского полуострова «Q-KOLA» в палеолимнологических исследованиях // Тр. КарНЦ РАН, сер. Лимнология. 2015. № 5. С. 48–407.

*Греков И. М., Сырых Л. С., Субетто Д. А.* База данных литературы по палеогеографии России и мира «PaleoBook». Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2016621003, 22.07.16.

*Григорьев С. В.* Каталог озер Карелии. М.; Л.: Изд-во АН СССР, 1959. 239 с.

*Каталог озер и рек Карелии* / Под ред. Н. Н. Филатова и А. В. Литвиненко. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2001. 290 с.

*Кашулин Н. А., Сандимиров С. С., Даувальтер В. А. и др.* Аннотированный экологический каталог озер Мурманской области (Восточная часть. Бассейн Баренцева моря). Апатиты: КНЦ РАН, 2010. Ч. 1. 249 с.; Ч. 2. 128 с.

*Лесенко В. К.* Мир озер. М.: Просвещение, 1989. 158 с.

*Лесенко В. К., Абросов В. Н.* Озера Псковской области. Псков: Псковский изд. дом, 1973. 155 с.

*Озера Карелии.* Справочник / Под ред. Г. Д. Рихтер. Петрозаводск: Госиздат, 1959. 620 с.

*Рянжин С. В., Субетто Д. А., Кочков Н. В. и др.* База данных SPBLAKES для естественных озер Ленинградской области Российской Федерации: структура, состав, результаты первых анализов // *Водные ресурсы*. 2015. Т. 42, № 1. С. 13–25.

*Субетто Д. А.* Палеолимнологические исследования в Северной Евразии // Сб. тр. Междунар. конф. «Палеолимнология Северной Евразии. Опыт, методология, современное состояние». 22–27 авг. 2016 г. Якутск: Изд. дом Северо-Восточного федерального ун-та, 2016. С. 10–13.

*Субетто Д. А., Греков И. М.* База палеогеографических данных «Q-KOLA» // Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2014620843. 16.06.14.

*Субетто Д. А., Сырых Л. С.* База палеолимнологических данных «PaleoLake» // Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2014621070. 31.07.14.

*Субетто Д. А., Назарова Л. Б., Пестрякова Л. А. и др.* Палеолимнологические исследования в российской части северной Евразии: обзор // *Сибирский экологический вестник* (в печати).

*Syrykh L., Subetto D. A., Grekov I.* Paleolimnological database for lakes of Russian plain // *Proceedings of the II PAST Gateways International Conference and Workshop*. 2014. P. 74–75.

## **NORTH EURASIA PALEOLIMNOLOGICAL DATABASE AS THE BASIS FOR PAST CLIMATE AND ENVIRONMENTAL RECONSTRUCTIONS**

**N. A. Myasnikova<sup>1,2</sup>, D. A. Subetto<sup>1,2</sup>, L. S. Syrykh<sup>2,3</sup>, I. M. Grekov<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>*Northern Water Problems Institute, KarRC RAS*

<sup>2</sup>*Herzen State Pedagogical University*

<sup>3</sup>*Kazan (Volga Region) Federal University*

A palaeolimnological database is being constructed to enable systematization and analysis of information on the development of lake ecosystems in Northern Eurasia in the Middle and Upper Pleistocene and Holocene. Here, the authors consider the structure, format and graphic representation of the database. Its format is convenient for data export and processing in various GIS and statistical packages.

# ХРОНОСТРАТИГРАФИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ОЗЕРНОГО ОСАДКОНАКОПЛЕНИЯ РЕГИОНА БАЛТИЙСКИХ ПООЗЕРИЙ В ПОСЛЕЛЕДНИКОВЫЙ ПЕРИОД

**А. А. Новик**

*Белорусский государственный университет*

Анализ палеогеографических данных региона Балтийских Поозерий позволил восстановить целостную картину динамики озерных уровней как индикатора эволюции природной среды региона в течение последних 14 000 лет. Общие закономерности озерного осадконакопления и колебания уровней в первую очередь связаны с глобальной тенденцией потепления климата в начале послеледниковой эпохи, исчезновением многолетней мерзлоты. Дальнейшие изменения в характере осадконакопления определялись климатическими циклами голоцена и степенью изменения континентальности.

## **Введение**

Палеоклиматические выводы, полученные в результате исследований локальных европейских осадочных архивов палеогеографическими методами, показывают, что на одних и тех же временных срезах голоцена в разных частях континента или даже отдельных регионов нередко реконструируются разнонаправленные температуры и режим увлажнения [Novik et al., 2010]. По этой причине при реконструкции изменений природных условий важно использовать единый методический подход, а также стратиграфические схемы расчленения отложений в комплексном исследовании аккумуляций литологическими, палеофлористическими, радиоуглеродными и изотопно-геохимическими методами диагностики.

В пределах проходящего через Беларусь, Латвию и Эстонию меридионального трансекта с ярко выраженным градиентом степени континентальности современного климата изменения природных условий позднеледниковья и голоцена особенно четко регистрируются в осадочных разрезах. В связи с этим в результате исследования белорусско-латвийско-эстонских телеконнекций сделана попытка проследить и объяснить синхронность/асинхронность изменения озерных уровней как индикатора преобразования климата, растительности, ландшафтов в довольно крупном регионе Европы – Балтийских Поозерьях.

## **Объекты и методы исследований**

Тенденции в изменении озерных уровней были определены согласно общепринятой методологии сравнительного анализа. В качестве опорных объектов исследования выбраны оз. Юуса в пределах возвышенности Отепя южной Эстонии, оз. Кюжи в пределах Видземской возвышенности

центральной Латвии и оз. Долгое в пределах Свенцянской краевой гряды Белорусского Поозерья. Выбор указанных объектов обусловлен единым ледниковым генезисом и схожими особенностями местоположения озер в пределах различных краевых стадий отступления вюрмского ледника, а также комплексом палеогеографической изученности истории развития самих водных объектов и прилегающих к ним водосборов на основе литолого-стратиграфических, палеофлористических, радиоуглеродных и изотопно-геохимических методов диагностики [Зерницкая и др., 2001; Makhnach et al., 2004; Koff et al., 2005; Punning et al., 2005; Новик, 2010, 2013, 2017; Novik et al., 2010; Puusepp, Kangur, 2010; Koff, Terasmaa, 2011]. Важно отметить, что водосборные территории исследуемых озер образованы преимущественно водоупорными моренными суглинками, которые наименее чувствительны к ослаблению процессов инфильтрации. Этот фактор, наряду с их положением в четко выраженных глубоковрезанных ледниковых котловинах, а также возвышенные водосборы создавали наиболее чувствительный к климатическим изменениям (снижение испарения, увеличение количества осадков) режим колебания уровней, что отражалось и в преобразовании характера озерного осадконакопления [Новик, 2017].

При стратификации отложений была использована европейская континентальная стратиграфическая схема позднеледниковья и голоцена [Mangerud et al., 1974]. В качестве показателей фаз развития водоемов задействовались данные о распределении основных осадкообразующих пород, а также органического вещества (ОВ), микро- и макроэлементов.

### **Результаты исследования и их обсуждение**

Анализ представленных данных свидетельствует о том, что начало озерного седиментогенеза в позднем дриасе (DR-3) на водосборе оз. Юуса было связано с активизацией гляциокарстовых процессов [Punning et al., 2005]. Наиболее интенсивно расконсервация озерных котловин протекала на возвышенных участках водосбора. Холодные климатические условия того времени способствовали аккумуляции карбонатного сапропеля с высокой долей терригенного материала. Карбонаты в озеро поступали с талой водой в результате интенсивного выщелачивания морены. О нестабильности уровня водоема в начале пребореального периода (PB) свидетельствуют слои торфа в карбонатном сапропеле. Конец PB характеризовался повышением уровня озера [Punning et al., 2005]. В осадках разреза водосбора это событие фиксируется накоплением поверх торфа карбонатного сапропеля с включением большого количества песка, поступавшего со склонов в озеро в результате оттаивания мерзлотных грунтов. Данный процесс совпал с началом карбонатного осадконакопления в

наиболее глубоких частях гляциокарстовых понижений водосбора, что свидетельствует об активном поступлении карбонатного материала с водосборных территорий [Новик, 2013]. Следующее понижение уровня водоема отмечено в середине бореального периода (ВО) очередным накоплением торфа, повышением концентрации содержания ОБ в карбонатном сапропеле и ростом спор сухолюбивых представителей флоры в осадках того времени [Koff et al., 2005]. Новый подъем уровня последовал в конце ВО – начале атлантического этапа (АТ), что подтверждается увеличением минеральной составляющей в осадках. Наметившийся подъем воды в то время уже не доходил до предыдущих отметок водосбора, где начавшийся в ВО процесс торфообразования продолжается и по настоящее время. В суббореале (SB) преобладали высокие уровни, однако начиная со второй половины периода появилась тенденция к понижению, отразившаяся в уменьшении минерального и увеличении органического и карбонатного веществ в осадках озера. Очередное непродолжительное повышение сменилось падением уровня водоема в начале субатлантики (SA). В то время в результате постепенного понижения уровня и заболачивания в озере стали накапливаться высокоорганические сапропели.

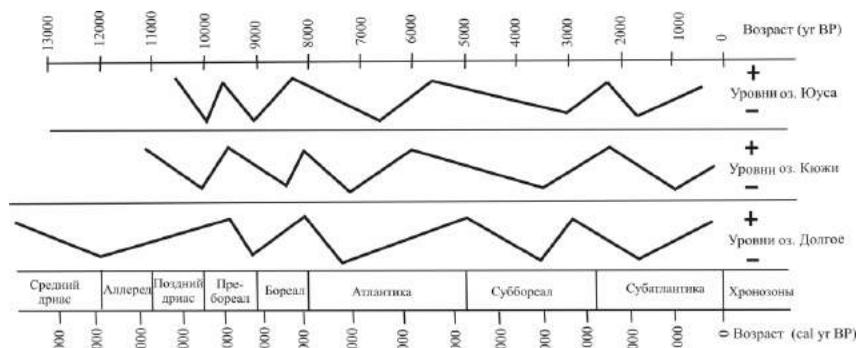
Озерное осадконакопление на водосборе оз. Кюжи началось в аллереде (AL) в результате активизации процессов гляциокарста [Koff, Terasmaa, 2011]. В начале PB наблюдались низкие уровни вследствие интенсивной инфильтрации талых вод. С середины PB увеличилось общее обводнение территории, что привело к росту песчаного материала в озерных осадках. По мере оттаивания незакрепленных грунтов на склонах моренных гряд в начале голоцена активно протекали солифлюкционные и делювиальные процессы, способствовавшие общему выглаживанию рельефа и перекрытию сносимым вниз делювиальным материалом озерных осадков у основания склонов [Новик, 2017]. К середине ВО уровень в озере стабилизировался с тенденцией к понижению, однако к концу периода наметился очередной подъем, закончившийся к началу АТ. Первая половина этого периода характеризуется низкими уровнями, что отражается в высокой концентрации доли содержания ОБ в карбонатном сапропеле [Puusepp, Kangur, 2010]. Со второй половины АТ вплоть до середины SB уровень в озере повышался, о чем свидетельствует накопление в нем высокоминеральных сапропелей. Последние сменились выше тонкодетритовыми сапропелями, которые аккумулировались с середины SB до SA, чему способствовала динамика низких уровней. В SA начался новый подъем уровней, характеризующийся накоплением кремнеземистых сапропелей, однако на современном этапе отмечается незначительное увеличение органики в осадках, как тенденция к снижению уровня.

Согласно пыльцевым и радиоуглеродным данным формирование базального горизонта торфа в водосборных понижениях оз. Долгого происходило в начале позднеледниковья (BÖ – DR-2) [Зерницкая и др., 2001]. В AL и DR-3 проявилась тенденция к понижению уровня, что усилило интенсивность карбонатакопления. Повышение уровня озера и начало формирования карбонатных осадков с высоким содержанием терригенного материала обнаружены в конце РВ. В течение ВО в этих отложениях уменьшилась роль терригенных компонентов, что свидетельствует о слабой проточности озерного бассейна и стабилизации либо понижении уровня. Изотопные и палинологические данные в карбонатных осадках также фиксируют повышение уровня во второй половине ВО и постепенное понижение с начала АТ, что отражается в составе карбонатного сапропеля, где возрастает содержание ОВ [Makhnach et al., 2004]. С середины АТ карбонатоосаждение в озере резко прекратилось. В результате понижения уровня литоральные зоны превратились в прибрежные части озерной котловины, где аккумуляровался песчаный материал [Зерницкая и др., 2001]. В озере стал накапливаться тонкодетритовый сапропель с высоким содержанием органики. Начало SB ознаменовалось новым кратковременным этапом подъема уровня, что отражается в водосборных разрезах, где фиксируется горизонт тонкодетритового торфосапропеля. Выше он сменяется торфом, что отражает последовавший очередной спад. Чередование торфа с прослоями тонкодетритового сапропеля говорит о неустойчивости водного режима [Новик, 2010]. Со второй половины SB в озерном разрезе поверх песка стали накапливаться глинистые илы, сменяющиеся кремнеземистыми сапропелями, что отражают результаты трансгрессии. В течение ранней и средней SA на водосборе продолжилось формирование древесного торфа, сменившегося в конце этого этапа сфагновым.

### **Выводы**

На основании анализа проведенных палеогеографических исследований выполнена реконструкция изменения уровней озер Эстонии, Латвии и Беларуси в послеледниковый период, в ходе которой выявлен ряд общих закономерностей (рис.).

В первую очередь фиксируется четко выраженный минимум уровней, характерный для ранних этапов позднеледниковья, в оз. Долгом. Низкие отметки уровней, по всей видимости, были обусловлены резким похолоданием и незавершенностью процесса расконсервации гляциокарста [Novik et al., 2010]. Незначительное увеличение обводненности территории, происходившее в AL – начале DR-3, наблюдается в озерах Кюжи и Долгое, что связано с потеплением климата того времени и активизацией



### Динамика изменения уровней озер Балтийских Поозерий в последлениковье

процессов гляциокарста. Наиболее глубокие понижения озерных котловин южной Эстонии в тот период оставались законсервированными льдом [Новик, 2013]. Усилившееся похолодание в DR-3, вероятно, сопровождалось повышением влажности климата и подъемом уровней озер. Интенсивное грунтовое питание в водоемах Юуса и Кюжи обусловило поступление карбонатного и терригенного материала и начало формирования озерных отложений. Однако уже в первой половине РВ наметилась тенденция к понижению уровней для всех трех озер, что было связано с уменьшением влажности климата и спадом флювиальной активности. К этому периоду относятся находки маломощных слоев древнего торфа во всех изученных озерах. Формированию торфа способствовали начало потепления климата и активизация процессов разгрузки талых вод многолетней мерзлоты за счет усиления процессов инфильтрации. Со второй половины РВ в исследованных озерных разрезах наблюдается общерегиональная динамика повышения уровней озер, обусловленная глобальной тенденцией потепления и увлажнения климата в начале голоцена. Преобладавшие до того времени минеральные и органоминеральные отложения позднеледниковья начинают перекрываться породами карбонатного состава за счет выщелачивания карбонатной морены в результате усиления флювиальной активности. В эпоху седиментации карбонатных осадков озера обладали характером олигомезотрофных водоемов с низким содержанием ОВ в донных отложениях [Зерницкая и др., 2001]. Важное значение при этом имели морфологические особенности озерных котловин и литология пород водосбора. Процесс повышения уровней продолжался вплоть до начала – середины ВО. Очередное похолодание, наступившее в тот временной отрезок, привело к уменьшению увлажненности и понижению уровней. В конце ВО – начале АТ прослеживается

процесс стабилизации уровней с общей тенденцией к повышению, но уже около 7000 л. н. наступил этап очередного спада уровней, что отражает прерывание озерного осадконакопления в разрезе на литоральной зоне оз. Долгого. Этому периоду соответствует смена характера осадконакопления во всех изученных озерах. Преобладающий карбонатный компонент озерных осадков к середине АТ либо снижается за счет доли содержания  $\text{CaCO}_3$ , либо полностью сменяется органоминеральным. Причины смены карбонатных отложений органическими были комплексными: выщелачивание водосборных территорий, повлекшее за собой сокращение притока жестких вод; похолодание в начале SB, определившее прекращение или замедление формирования озерных карбонатов; повышение трофического статуса вследствие развития в них растительной и животной жизни. Холодные и влажные условия SB способствовали наступлению очередной тенденции к повышению уровней, что сопровождалось увеличением минеральных компонентов в осадках всех озер. Кроме того, в бывших литоральных частях оз. Долгого возобновился процесс озерного осадконакопления. Во второй половине SB колебания отличались разноплановым характером, что было обусловлено локальными факторами, но уже к началу SA процесс потепления и увлажнения климата вызвал очередную общую фазу подъема во всех исследованных озерах региона. В настоящее время анализ озерного осадконакопления подтверждает стадии регрессии в динамике изменения уровней изученных озер, начавшейся приблизительно тысячу лет назад.

Как видно из приведенного палеогеографического анализа, большинство выявленных закономерностей в озерной седиментации имеет общие тенденции для региона Балтийских Поозерий, что связано с глобальными палеоклиматическими преобразованиями в позднеледниковье и голоцене. Однако в климатических циклах, связанных с периодами похолодания и увеличения увлажненности при продвижении с северо-запада на юго-восток, обнаруживаются некоторое запаздывание этапов изменения характера осадконакопления и, как следствие, колебания озерных уровней. И наоборот, для палеоциклов с потеплением и снижением увлажненности наблюдается обратный сценарий, что, помимо влияния локальных факторов на водосборных территориях, может объясняться повышением градиента степени континентальности климата по меридиональному трансекту оз. Юуса – оз. Кюжи – оз. Долгое. Это подтверждается и палинологическими данными, согласно которым установлено, что на территории Беларуси наиболее значимые климатические события голоцена (позднебореальное, среднеатлантическое и раннесуббореальное похолодания) выглядели ярче, чем на территории стран Балтии. Эта закономерность стала ярко проявлять себя с начала бореального времени.

## Литература

*Зерницкая В. П., Жуховицкая А. Л., Власов Б. П., Курзо Б. В.* Озеро Долгое (седиментогенез, стратиграфия донных отложений и этапы развития). Минск, 2001. 84 с.

*Новик А. А.* Общие закономерности осадконакопления и колебания уровней озер Беларуси в послеледниковый период // Вестн. БГУ, сер. 2. 2010. № 2. С. 95–99.

*Новик А. А.* История развития водосбора озера Юуса в позднеледниковье и голоцене // Вестн. БГУ, сер. 2. 2013. № 1. С. 88–93.

*Новик А. А.* Пространственно-временная корреляция изменения озерных уровней региона Балтийских Поозерий в позднеледниковье и голоцене // Журн. Белорус. гос. ун-та. География. Геология. 2017. № 1. С. 26–35.

*Koff T., Terasmaa J.* The sedimentary sequence from the Lake Kuji outcrop, central Latvia: implications for late glacial stratigraphy // Estonian J. Earth Sci. 2011. Vol. 60, N 2. P. 113–122.

*Koff T., Punning J.-M., Samaja-Korjonen K., Martma T.* Ecosystem response to Early and Late Holocene lake-level changes in lake Juusa, southern Estonia // Pol. J. Ecol. 2005. Vol. 53, N 4. P. 553–570.

*Makhnach N., Zernitskaja V., Kolosov I., Simakova G.* Stable oxygen and carbon isotopes in Late Glacial-Holocene freshwater carbonates from Belarus and their palaeoclimatic implications // Palaeogeogr., Palaeoclimatol., Palaeoecol. 2004. Vol. 209. P. 73–101.

*Mangerud J., Andersen S. T., Berglund B. E., Donner J.* Quaternary stratigraphy of Norden: a proposal for terminology and classification // Boreas. 1974. N 3 (1–2). P. 78–85.

*Novik A., Punning J.-M., Zernitskaya V.* The development of Belarusian lakes during the Late Glacial and Holocene // Estonian J. Earth Sci. 2010. Vol. 59, issue 1. P. 63–79.

*Punning J.-M., Koff T., Kadastik E., Mikomägi A.* Holocene lake level fluctuations recorded in the sediment composition of the small dimictic Lake Juusa // J. Paleolimnol. 2005. N 34. P. 377–390.

*Puusepp L., Kangur M.* Linking diatom community dynamics to changes in terrestrial vegetation: a palaeolimnological case study of Lake Kuji, Vidzeme Heights // Estonian J. Ecol. 2010. Vol. 59, N 4. P. 259–280.

## CHRONOSTRATIGRAPHIC ANALYSIS OF LAKE SEDIMENTATION IN BALTIC LAKE DISTRICTS IN THE POST-GLACIAL PERIOD

**A. A. Novik**

*Belarusian State University*

Analysis of paleogeographic data for Baltic Lake Districts allowed to recreate a holistic picture of the dynamics of lake levels as an indicator of the evolution of the region's natural environment during the past 14 000 years. General patterns of sedimentation and lake level fluctuation are primarily associated with the global climate warming trend in the early post-glacial period and dissipation of permafrost. Further changes in the character of sedimentation were determined by climatic cycles of the Holocene and the degree of change in continentality.

## ВЕЛИКИЕ ОЗЕРА ЕВРОПЫ – ИСТОРИЯ РАЗВИТИЯ, ОСОБЕННОСТИ ГЕОЛОГИЧЕСКОГО СТРОЕНИЯ И ИХ ВЛИЯНИЕ НА ФОРМИРОВАНИЕ СОВРЕМЕННОЙ ГЕОЭКОЛОГИЧЕСКОЙ ОБСТАНОВКИ

А. Е. Рыбалко<sup>1,2</sup>, М. Ю. Токарев<sup>1</sup>, Д. А. Субетто<sup>3</sup>, А. С. Локтев<sup>4</sup>,  
М. Ю. Алешин<sup>4</sup>, Я. Е. Терехина<sup>1</sup>, Н. А. Костромина<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Центр Анализа сейсмических данных МГУ им. М. В. Ломоносова

<sup>2</sup>Институт наук о Земле Санкт-Петербургского  
государственного университета

<sup>3</sup>Институт водных проблем Севера КарНЦ РАН

<sup>4</sup>Центр морских исследований МГУ им. М. В. Ломоносова

В докладе освещаются результаты геолого-геофизических работ Центра анализа сейсмических данных МГУ им. М. В. Ломоносова, Института водных проблем Севера КарНЦ РАН и Санкт-Петербургского государственного университета на Ладожском и Онежском озерах в 2014–2016 гг. Было проведено многоканальное сейсмоакустическое профилирование, впервые выделены и изучены выходы газов в донных отложениях в Петрозаводской губе Онежского озера. Большое внимание уделяется характеристике современных рельефообразующих геодинамических и гравитационных процессов в обоих озерах. Впервые методами радиогрaфии были изучены структуры донных отложений. Проведена корреляция верхнечетвертичных отложений в Петрозаводской губе и в открытой части Онежского озера. Обосновано формирование единой системы палеоводоемов, заложенных в тектонически заданных депрессиях вдоль восточной окраины Балтийского кристаллического щита на заключительных этапах ошашковского оледенения.

Великие озера Европы – Ладожское и Онежское – входят в систему водоемов, расположенных по восточной периферии Балтийского кристаллического щита, формирование их во многом связано с процессами дегляциации последнего Скандинавского ледникового щита. Кроме указанных озер в эту систему входят Белое и Балтийское моря – типичные внутришельфовые морские бассейны. Общими их чертами является полная аналогия коренного субстрата в пределах акватории и на прилегающей суше, а также весьма пересеченный рельеф дна, обусловленный как неотектоническими (включая современные геодинамические) движениями, так и гляциальными денудационно-аккумулятивными процессами. Все четыре указанных водных бассейна объединяет и общая история развития в позднечетвертичное время [Рыбалко, 1998].

К настоящему времени четвертичный покров обоих Великих озер достаточно хорошо изучен [История..., 1990; Субетто, 1990; Субетто и др., 1990; Subetto et al., 1998]. Четвертичные отложения Ладожского и Онежского озер отображены на Государственных картах масштаба 1 : 1 000 000. Однако в

обоих случаях отчетливо сказывается дефицит изучения длинных разрезов, а также современных сейсмоакустических данных. В Ладожском озере сейсмоакустические работы были проведены в конце прошлого века ВСЕГЕИ [Амантов, Спиридонов, 1989]. В Онежском озере сейсмоакустические работы сопровождали в 1999–2000 гг. геологическое картирование в масштабе 1 : 1 000 000 (Полярная экспедиция), а также выполнялись финскими исследователями в северной части озера. В настоящее время эти данные не имеют широкого доступа и практически не использовались отечественными исследователями для решения вопросов позднечетвертичной палеогеографии. Длинные колонки были отобраны ВСЕГЕИ в 1974 г. в заливе Лехмалахти [Бахмутов и др., 1988]. В Онежском озере данные по длинным трубкам отсутствуют.

В 2012 г. совместная экспедиция ученых Кельнского университета, Института водных проблем Севера (ИВПС) КарНЦ РАН и Санкт-Петербургского государственного университета провели бурение четвертичных отложений в северо-западной части озера, которому предшествовали сейсмоакустические исследования. Практически одновременно Центр анализа сейсмических данных МГУ им. М. В. Ломоносова и ИВПС КарНЦ РАН при участии Института наук о Земле СПбГУ приняли решение организовать собственную программу по изучению верхнечетвертичных отложений и палеогеографии этого же временного интервала Белого моря и Великих Европейских озер преимущественно на основе сейсмоакустических данных. Во исполнение этого решения в 2014 и 2015 гг. на Ладожском озере было проведено сейсмоакустическое профилирование и в 2016 г. в Петрозаводской губе Онежского озера – полигонные работы. Этот доклад посвящен результатам названных работ.

Ладожское и Онежское озера входят в бассейн водосбора р. Невы. Площадь акватории первого составляет 17 870 км<sup>2</sup>, наибольшая глубина 230 м, а второго – 9720 км<sup>2</sup> и 127 м, соответственно. По своей площади эти озера в пределах России уступают только Байкалу и Каспийскому морю, природа которых совершенно иная. Морфология озер при их различии имеет общие черты. Северные берега, где в береговой линии вскрываются кристаллические породы Балтийского щита, имеют изрезанный шхерный (в Ладожском озере) и фиардообразный (в Онежском озере) характер. С северной частью обоих озер связаны и максимальные глубины. Южные берега, наоборот, имеют четко выраженный бухтовый характер, и образование этих бухт во многом связано с экзарацией отдельных ледниковых потоков.

Все полевые работы в обоих озерах проводились с НИС «Эколог», принадлежащего ИВПС КарНЦ РАН. В 2014 г. работы выполнялись исключительно в Ладожском озере и включали впервые для этого бассейна многоканальное сейсмоакустическое профилирование. Для проведения

работ использовался следующий комплект оборудования: накопитель энергии CSP-P Applied Acoustic с рабочим напряжением 2500–4000 V и мощностью 50–350 J; электродинамический источник энергии типа «Бумер» с центральной частотой 2000 Гц; регистрирующая станция Spectrargo; сейсмическая аналоговая шестнадцатиканальная коса с шагом 2 м между приемниками.

Сеть пройденных профилей показана на рис. 1 и включала три блока наблюдений: продольный региональный профиль от Волховской губы до Соловецкого архипелага, площадное профилирование в северной части озера и специализированные работы к северу от о. Коневец для оценки геологического положения скважин, пройденных российско-германской экспедицией, которая состоялась в 2012 г.

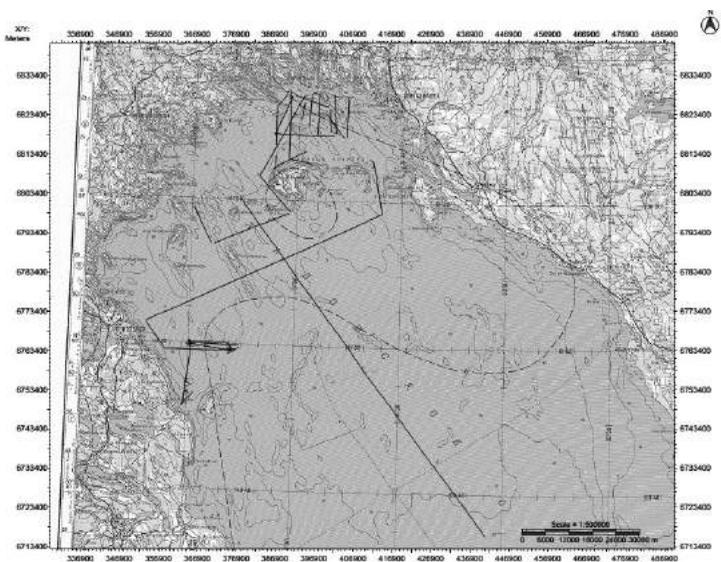
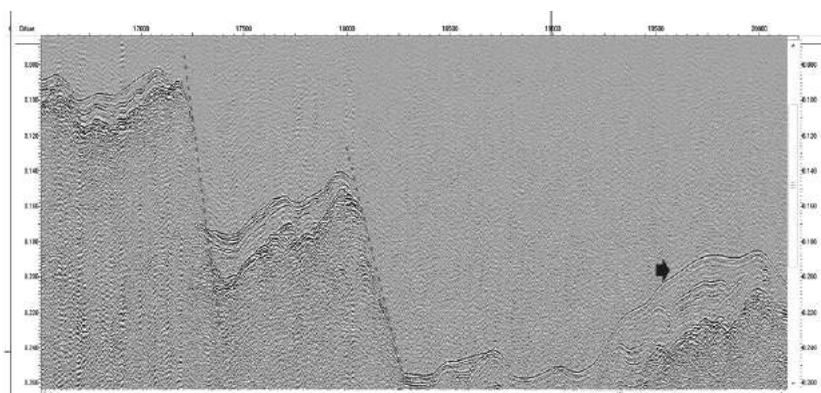


Рис. 1. Схема положения профилей в Ладожском озере в 2014 г.

Полученные данные позволили существенно уточнить представления о распространении ледниковых отложений на дне Ладожского озера. Во-первых, оказалось, что в южных районах Ладожского озера существенно меньше, чем представлялось ранее, распространение донной морены. На значительной части площади она просто отсутствует. В то же время существенно были уточнены данные по протяжению краевого моренного комплекса в центральной части озера, который может быть сопоставлен с невской стадией осташковского (поздневалдайского) оледенения. Однако

строение самих гряд оказалось более сложным, чем это предполагалось: в их ядре находятся коренные породы, и сами гряды имеют структурно-ледниковое происхождение.

Особенно большой материал был получен по геодинамическим движениям. Было доказано, что гряды в северной глубоководной впадине (между Валаамским архипелагом и Сортавальскими шхерами) являются структурными, часто продолжают аналогичные гряды, выявленные на суше. Их относительная высота может достигать 80–100 м и более, а особенности залегания четвертичных отложений, в частности резкое смещение горизонтов ледниково-озерных глин, позволяет сделать вывод о тектонических подвижках в собственно голоценовое время (рис. 2).



**Рис. 2. Структурный рельеф в северной части Ладожского озера:**

стрелкой показан блок оползших осадков, сдвинутый в сторону во время голоценовых тектонических движений. Пунктир – линии активизированных разломов

Профилирование в желобе, простирающемся вдоль западного берега Ладожского озера между Приозерском и о. Коневец, позволило выявить как наличие голоценовых геодинамических движений, что подтверждается впервые выделенными пок-марками, так и сложно построенный разрез надледниковых отложений.

В 2015 г. были проведены опытные работы в Петрозаводской губе, которые выявили скопления газов в донных отложениях. В связи с этим в 2016 г. здесь же были проведены полигонные работы, которые включали: сейсмоакустическое профилирование для оценки стратиграфического строения четвертичного покрова, боковую локацию для выявления выходов погребенных газов, а также комплексный проботбор грунтовой трубкой длиной 3 м, включавший отбор кернов для литостратиграфических

исследований, определения абсолютного возраста, оценки содержания газов и их состава, текстурных радиографических исследований и измерения физико-механических свойств (рис. 3).

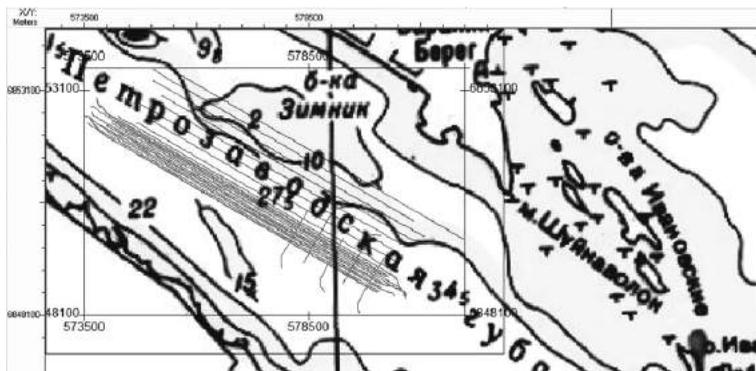
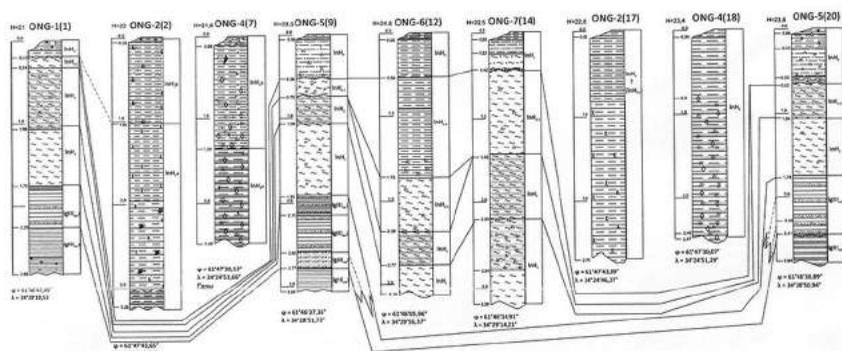


Рис. 3. Карта фактического материала геофизических и геологических работ в Петрозаводской губе в 2016 г.

Станции для геологического пробоотбора выбирались по данным предварительной интерпретации геофизического профилирования.

В результате проведения работ впервые получены комплексные геолого-геофизические данные о строении четвертичных отложений в Петрозаводской губе Онежского залива. Выявлены многочисленные газопроявления, морфологически выраженные в виде скоплений пок-марков, опробован весь разрез надледниковых отложений, получены физико-

механические характеристики рыхлых отложений, впервые для всего региона получены томографические срезы донных отложений. Построены детальные сейсмостратиграфические разрезы толщи верхнечетвертичных отложений, что позволило достаточно четко выделить несколько литостратиграфических горизонтов, проведена корреляция этих отложений, что дает возможность более осмысленно подходить к стратификации четвертичных отложений на дне всей акватории озера (рис. 4). Выявлены процессы активного газообразования в толще голоценовых осадков, сопровождаемые образованием пок-марков. Проведенная гидролокация бокового обзора позволила не только дифференцировать современные ландшафты в Петрозаводской губе, но и выделить на дне достаточно большое количество объектов антропогенного характера, в том числе затопленных судов.



**Рис. 4. Корреляция донных колонок, отобранных в Петрозаводской губе в 2016 г.**

Полученные данные и анализ материалов предшественников подтвердили прямую связь происхождения депрессий, занятых современными озерами, с деятельностью Скандинавского покровного ледникового щита, что разделяется большинством исследователей. Была существенно укреплена доказательная база влияния тектогенных факторов в формировании первичных депрессий, которые в первую очередь затоплялись приледниковыми бассейнами, уровень которых потом существенно превышал абсолютную высоту этих впадин.

Развитие этих бассейнов началось около 13–14 тыс. л. н. и продолжалось до 12–11 тыс. л. н., когда в результате спуска первых приледниковых бассейнов на 10–12 м сформировался прообраз современного Балтийского моря – Балтийское ледниковое озеро. В раннем голоцене произошла постепенная смена условий приледникового бассейна озерным.

Этот период достаточно четко выделяется также в Белом и Балтийском морях. С конца бореала в обоих озерах (а также и на морях) установился уже нормальный озерный режим.

Полученные на полигоне данные позволили более четко сопоставить данные хроностратиграфии с сейсмоакустическими материалами, что определяет возможность в этом году при проведении сейсмоакустических исследований составить существенно уточненную карту четвертичных отложений южного Онега.

### Литература

*Амантов А. В., Спиридонов М. А.* Геология Ладожского озера // Советская геология. 1989. № 4. С. 83–86.

*Бахмутов В. Г., Давыдова Н. Н., Рыбалко А. Е. и др.* Геологическое развитие залива Лехмалахти (СЗ Ладоги) по материалам изучения его донных отложений // Геологическое строение и развитие Балтийского моря и закономерности формирования минеральных ресурсов. Таллин, 1988. С. 13–15.

*История Ладожского, Онежского, Псковско-Чудского озер, Байкала и Ханки / Д. Д. Квасов, Г. Г. Мартинсон, А. В. Раукас (ред.).* Л.: Наука, 1990. 280 с. (Серия «История озер». Т. 4.)

*Рыбалко А. Е.* История развития водных геосистем периферии Балтийского кристаллического щита в позднем плейстоцене – голоцене // Всерос. совещ. «Главнейшие итоги в изучении четвертичного периода и основные направления исследований в XXI веке». СПб.: ВСЕГЕИ, 1998. С. 45–46.

*Субетто Д. А.* Онежское озеро. Общая характеристика донных отложений // История Ладожского, Онежского, Псковско-Чудского озер, Байкала и Ханки. Л.: Наука, 1990. С. 89–92.

*Субетто Д. А., Рыбалко А. Е., Спиридонов М. А.* Ладожское озеро. Общая характеристика донных отложений // Там же. С. 37–42.

*Subetto D., Davydova N., Rybalko A.* Contribution to the lithostratigraphy and history of Lake Ladoga // Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology. 1998. N 140. P. 113–119.

### THE GREAT LAKES OF EUROPE – THE HISTORY OF DEVELOPMENT, THE FEATURES OF GEOLOGICAL STRUCTURE AND THEIR EFFECT ON THE FORMATION OF THE MODERN GEO-ECOLOGICAL SITUATION

A. E. Rybalko<sup>1,2</sup>, M. Yu. Tokarev<sup>1</sup>, D. A. Subetto<sup>3</sup>, A. S. Loktev<sup>1</sup>, M. Yu. Aleshin<sup>1</sup>,  
Ya. E. Terekhina<sup>1</sup>, N. A. Kostromina<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Lomonosov Moscow State University

<sup>2</sup>Saint-Petersburg State University

<sup>3</sup>Northern Water Problems Institute, KarRC RAS

The report highlights the results of geological and geophysical work of the Center for Seismic Data Analysis of the Lomonosov Moscow State University, Northern Water Problems Institute (Petrozavodsk) and St. Petersburg State University on lakes Ladoga

and Onego in 2014–2016. Seismostratigraphic schemes were refined as a result of seismoacoustic surveys. Gas seepage in bottom sediments in Petrozavodsk Bay of Lake Onego was for the first time isolated and studied. Much attention is paid to modern geodynamic and gravitational processes in both lakes. A study was made of the physico-mechanical properties of bottom sediments. For the first time, the method of radiography was used to study the structure of bottom sediments. Correlation of Upper Quaternary sediments in Petrozavodsk Bay and in the pelagic part of Lake Onego was performed. The structure of the Quaternary sediments sheet in Lake Onego is specified. The isolation of a unified system of paleobasins in tectonically predetermined depressions along the eastern margin of the Baltic crystalline shield at the final stages of the Ostashkovo glaciation is substantiated.

**КОЛИЧЕСТВЕННЫЕ И КАЧЕСТВЕННЫЕ ОЦЕНКИ  
ПАЛЕОКЛИМАТИЧЕСКИХ ИЗМЕНЕНИЙ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ  
ПАЛИНОЛОГИЧЕСКОГО АНАЛИЗА И ИХ РОЛЬ  
В РЕКОНСТРУКЦИИ РАЗВИТИЯ ОЗЕРНЫХ ЭКОСИСТЕМ**

**Т. В. Сапелко<sup>1</sup>, А. В. Терехов<sup>1</sup>, Д. А. Субетто<sup>2,3</sup>**

<sup>1</sup>*Институт озераведения РАН*

<sup>2</sup>*Институт водных проблем Севера КарНЦ РАН*

<sup>3</sup>*Российский государственный педагогический университет  
им. А. И. Герцена*

По результатам палинологического анализа озерных отложений Соловецких островов реконструирована динамика климатических характеристик за период последних 8 тыс. лет. Установлены колебания среднегодовых температур на островах в пределах от +2 до +4 °С выше современной и –0,5 °С ниже современной. Смена растительных сообществ и динамика отдельных видов на островах в изучаемый временной период зависела как от климатических колебаний, так и от динамики уровня моря, а также от антропогенных факторов. Установлено, что роль климата в изменении экосистем озер Лесное, Святое и Большое Корзино была основной.

Зависимость динамики развития озерных экосистем от колебаний климата является актуальной проблемой мировой науки. Проследить эту динамику можно с помощью палеолимнологических исследований, в которых основным методом является палинологический. Изучение пыльцы и спор растений не только помогает восстановить растительность и ландшафты прошлого, но и является основой реконструкции климата и хронологии этапов развития озер. В последние годы все больше совершенствуются методы реконструкции не только качественных, но и количественных климатических характеристик по результатам спорово-пыльцевого анализа.

С 2005 г. на Соловецких островах в Белом море (рис. 1) в рамках совместных исследований Института озероведения РАН с Институтом водных проблем Севера КарАН и Российским государственным университетом им. А. И. Герцена проводятся комплексные палеолимнологические работы [Субетто и др., 2012]. В ходе исследований изучаются озера, расположенные на разных высотных отметках и в разные периоды голоцена отделившиеся от моря. Хронология этапов отделения и последующего развития озер прослежена с помощью палинологического метода и подтверждена радиоуглеродными датировками. Для реконструкции количественных климатических параметров прошлого по данным спорово-пыльцевому анализу использована программа Polygon версии 2.4.4 [Nakagawa et al., 2002], реализующая метод наилучших современных аналогов. Метод [Guiot, 1990] заключается в измерении евклидова расстояния между двумя точками в n-мерном пространстве, определяемом квадратными корнями из долей видов растительности в спорово-пыльцевом спектре, для поиска аналогов среди ископаемых и субрецентных проб. Обычно 5–10 субрецентных спектров, расстояние до которых от ископаемого является минимальным, признаются его наилучшими аналогами и используются для реконструкции климатических параметров. В данном исследовании использовано от 2 до 8 аналогов, что также является достаточным [Nakagawa et al., 2002].



Рис. 1. Район исследования

Для оценки изменений палеоклимата на территории Соловецкого архипелага использованы спорово-пыльцевые спектры колонок донных отложений трех озер, расположенных на о. Большой Соловецкий: Большое Корзино, Лесное и Святое. По данным палинологического анализа, подтвержденным радиоуглеродными датировкам, изменение экосистем озер Большое Корзино и Святое прослежено за временной период от атлантики и до наших дней, оз. Лесного – от суббореала до настоящего времени.

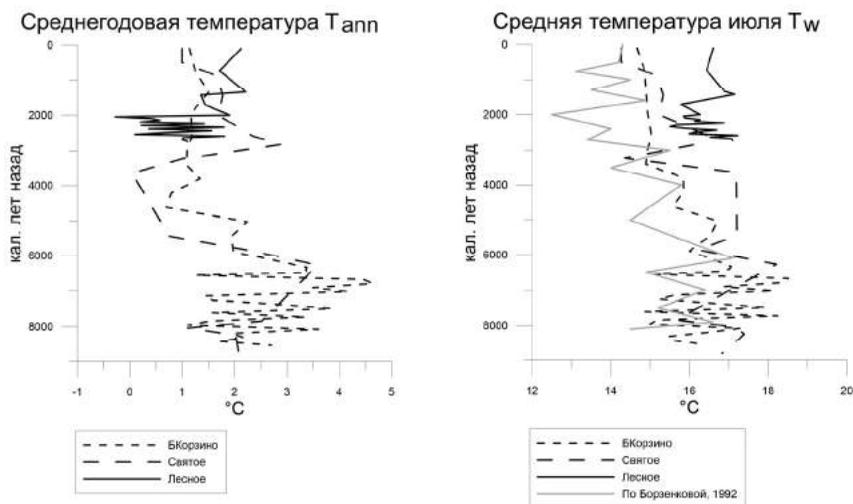
По результатам спорово-пыльцевого анализа донных отложений Соловецких озер и по результатам аналогичных исследований в бассейне Белого моря установлено, что за последние 8 тыс. лет растительные сообщества могли сменяться на более «южные» вплоть до биоценозов смешанных хвойно-широколиственных. Поэтому для реконструкции климатических параметров на основании авторских материалов [Sapelko, Subetto, 2014] и из российской палинологической базы (<http://pollendata.org/>) выбраны данные, относящиеся к территории северной части Русской равнины до широты Минска, а также Фенноскандии до Скандинавских гор. Спорово-пыльцевые спектры, относящиеся к районам высотной поясности, были исключены по причине сложности интерполяции с необходимой точностью климатических параметров для горных районов. Таким образом, были охвачены территории, занятые преимущественно биоценозическими сообществами бореального типа североевропейской формации (за исключением горнотаежных лесов) и тундрового типа. Для реконструкции использовано 150 субрецентных спектров.

Основным источником современных климатических данных является глобальная модель WorldClim [Hijmans et al., 2005], а также данные метеостанций, расположенных на о. Большой Соловецкий. Вспомогательные вычисления производились в ГИС с открытым исходным кодом QGIS, а также при помощи пакета ANUCLIM версии 6.1 [Tingbao, Hutchinson, 2013]. Графики изменения климатических параметров для каждого из озер рассчитаны с помощью программы Polygon по методу наилучших современных аналогов (рис. 2).

В результате получены первые предварительные результаты по динамике таких климатических параметров, как среднегодовая температура, средняя температура июля, средняя температура наиболее теплого квартала, годовая сумма среднемесячных температур выше +5 °С, среднее годовое количество осадков и среднее количество осадков за наиболее теплый квартал.

Климат Соловецкого архипелага в настоящее время характеризуется как избыточно влажный и умеренно теплый. Средняя годовая температура воздуха составляет +1,0 °С, средняя летняя температура (июля) –

+14,3 °С, средняя температура наиболее теплого квартала – +12,8 °С, годовая сумма среднемесячных температур выше +5 °С (вегетационный период), так называемый warm index WI [Nakagawa et al., 2002] – +53,7, среднее годовое количество осадков составляет 547 мм и среднее количество осадков за наиболее теплый квартал 361 мм, что составляет 66 % от среднегодового [Природная среда..., 2007]. Соловецкий архипелаг расположен в зоне умеренного климата в подзоне северной тайги и расположен на границе лесной и лесотундровой зон. Однако благодаря особому микроклимату архипелага на Соловках распространены и азональные природные комплексы. Помимо хвойных и мелколиственных лесов, на островах встречаются лесотундры и тундры. Долгое время преобладающей древесной породой на о. Большой Соловецкий была ель [Ипатов и др., 2009]. За период с 1925 г. отмечается сокращение еловых древостоев за счет распространения березы [Природная среда..., 2007]. Безусловно, это связано с антропогенным фактором. В целом антропогенно измененные ландшафты на Соловецких островах в настоящее время составляют гораздо больше, чем 0,3 %, отмечаемых в литературе, на что указывают и палиноспектры поверхностных проб озерных отложений, изученных в разных частях о. Большой Соловецкий [Sapelko, Subetto, 2014] и о. Анзер.



**Рис. 2.** Совмещенные графики реконструкции среднегодовых и летних температур голоценового периода для озер Большое Корзино, Святое, Лесное и средней температуры июля для зоны 60–75° с. ш., по: [Борзенкова, 1992]

По полученным палинологическим данным еловые леса получили широкое распространение на о. Большой Соловецкий с суббореального периода. В атлантический период на островах встречалась небольшая примесь широколиственных пород. Интересно отметить, что при периодически меняющейся доминанте древесных пород среди трав практически постоянно на протяжении 7 тыс. лет преобладают *Suregaceae* и *Roaseae*. Наибольшее число видов этих семейств отмечается на Соловецком архипелаге и сейчас.

Особенностью полученных реконструкций является расположение всех трех изученных озер на ограниченной территории – на одном острове. Это позволяет сравнить полученные одновозрастные климатические характеристики (рис. 2).

Для атлантического периода реконструированы среднегодовые температуры, превышающие современные от 1 до 4 °С. Особенно подробно реконструированы климатические характеристики для разреза оз. Большое Корзино, анализ которых показал резкие колебания температуры и осадков в течение атлантического периода. Более сглаженная кривая изменения температур и осадков прослежена для оз. Святого. Для этого озера получены не такие подробные результаты, как по разрезу оз. Большое Корзино, так как скорость осадконакопления в атлантический период была в оз. Святом не такой стабильной и данные для этого периода получились более осредненные. Для обоих озер отмечается пик похолодания для около 8200 лет назад, что коррелирует с полученными реконструкциями других европейских регионов [Борзенкова и др., 2017]. Для суббореального периода отмечается некоторое похолодание. Температуры в этот период в среднем превышают современные на 1 °С. Отмечен пик похолодания для этого периода около 3,5 тыс. лет назад, что отразилось в разрезе оз. Святого. Также отмечено снижение летних температур для оз. Большое Корзино и для общего глобального тренда температур для зоны 60–75° с. ш. [Борзенкова, 1992]. Общее похолодание на границе суббореального и субатлантического периодов, отмеченное для всех изученных разрезов, наиболее резко проявилось в оз. Лесном. Подробное изучение переходного периода в оз. Лесном позволило реконструировать неустойчивость климата в это время. Около 2 тыс. лет назад зафиксирована наиболее низкая среднегодовая температура за изученный период, которая на 0,5 °С была ниже современной. В целом тренды изменения реконструированных характеристик для всех трех озер совпадают и сопоставимы с общим глобальным трендом для зоны 60–75° с. ш. [Борзенкова, 1992]. Однако летние температуры в течение последних 8 тыс. лет для Соловецких островов превышают глобальные на 1–2 °С, что может быть связано со своеобразием микроклимата островов, наблюдаемым и в настоящее время.

Сравнение выявило схожесть тенденций, но некоторый разброс в цифрах, что можно объяснить как погрешностями спорово-пыльцевого и радиоуглеродного анализов, так и погрешностями расчетов. Погрешности в свою очередь могут быть вызваны недостаточным количеством субрецентных спектров из некоторых природных зон и подзон. В дальнейшем пополнение базы субрецентных проб позволит уточнить полученные предварительные расчеты. Климатические реконструкции голоцена на основании палинологических данных осложняет и антропогенный характер современной растительности. Например, как в субрецентных спектрах, так и в палинозолах верхнего слоя разрезов озерных отложений отмечается пыльца некоторых растений, не характерных для современных естественных ландшафтов Соловецких островов, как и в целом для бассейна Белого моря. Отмечается, например, пыльца широколиственных пород, пихты и лиственницы. Эти растения высаживаются уже второе столетие в Ботаническом саду на о. Большой Соловецкий. В настоящее время по данным сотрудников Ботанического сада из посадок 1870–1920 гг. в саду сохраняется около 30 видов древесных пород (<http://www.solovki-land.ru/sad/hutor-gorka/voskobelilnyj-zavod.html>).

В результате установлено, что смена растительных сообществ и динамика отдельных видов на островах в изучаемый временной период зависела как от климатических колебаний, так и от динамики уровня моря, а также от антропогенных факторов. Установлено, что роль климата в изменении экосистем озер Лесное, Святое и Большое Корзино была основной.

### Литература

- Борзенкова И. И.* Изменение климата в кайнозое. СПб., 1992. 247 с.
- Борзенкова И. И., Борисова О. К., Жильцова Е. Л., Сапелко Т. В.* Холодный эпизод около 8200 лет назад в Северной Европе: анализ эмпирических данных и возможных причин // *Лед и Снег*. 2017. Т. 57, № 1. С. 117–132.
- Ипатов Л. Ф., Косарев В. П., Проурзин Л. И., Торхов С. В.* Леса Соловецкого архипелага. Архангельск, 2009. 244 с.
- Природная среда* Соловецкого архипелага в условиях меняющегося климата / Под ред. Ю. Г. Шварцмана, И. Н. Болотова. Екатеринбург: УрО РАН, 2007. 184 с.
- Субетто Д. А., Шевченко В. П., Лудикова А. В. и др.* Хронология изоляции озер Соловецкого архипелага и скорости современного озерного осадконакопления // *Доклады Академии наук, сер. Геологическая*. 2012. Т. 446, № 2. С. 183–190.
- Guillot J.* Methodology of the last climatic cycle reconstruction in France from pollen data // *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*. 1990. N 80. P. 49–69.

*Hijmans R. J., Cameron S. E., Parra J. L. et al.* Very high resolution interpolated climate surfaces for global land areas // *International Journal of Climatology*. 2005. N 25. P. 1965–1978.

*Nakagawa T. et al.* Quantitative pollen-based climate reconstruction in central Japan: application to surface and Late Quaternary spectra // *Quaternary Science Reviews*. 2002. N 21. P. 2099–2113.

*Sapelko T., Subetto D.* Palaeoecological data from Holocene lake sediments in the Solovki Islands, the White Sea // Abstract of 9<sup>th</sup> European Paleobotany-Palynology Conference. 26–31 August 2014. Padova, Italy, 2014. P. 242.

*Tingbao Xu, Hutchinson M. F.* New developments and applications in the ANUCLIM spatial climatic and bioclimatic modelling package // *Environmental Modelling & Software*. 2013. Vol. 40. P. 267–279.

## **QUANTITATIVE AND QUALITATIVE ESTIMATION OF PALEOCLIMATIC CHANGES BASED ON THE RESULTS OF POLLEN DATA, AND THEIR ROLE IN RECONSTRUCTING THE EVOLUTION OF LACUSTRINE ECOSYSTEMS**

**T. V. Sapelko<sup>1</sup>, A. V. Terekhov<sup>1</sup>, D. A. Subetto<sup>2,3</sup>**

<sup>1</sup>*Institute of Limnology of RAS*

<sup>2</sup>*Northern Water Problems Institute, KarRC RAS*

<sup>3</sup>*Herzen State Pedagogical University*

The variability of several climatic parameters during the last 8 ka was reconstructed based on pollen analysis of lake sediments from Solovetsky Islands. The results show that the temperature in that period varied between +2 ... +4 °C above present-day and –0.5 °C below present day. The shift in biome structure and the dynamics of separate plant taxa on Solovetsky Islands depended on climatic changes, on sea level variability and on human impact. We revealed that climatic changes were the leading factor in the evolution of Lesnoe, Svyatoye and Bolshoe Korzino lakes' ecosystems.

## **СОВРЕМЕННЫЙ УРОВЕНЬ ПАЛЕОЛИМНОЛОГИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ СЕВЕРНОЙ ЕВРАЗИИ**

**Д. А. Субетто**

*Институт водных проблем Севера КарНЦ РАН*

В последние годы значительно вырос интерес к палеолимнологическим исследованиям Северного полушария, что вызвано, в первую очередь, проблемой глобального изменения климата, особенно в высоких широтах. В приполярных областях Северного полушария располагается огромное количество озер различного генезиса и морфометрии, заархивировавших в своих донных отложениях подробную информацию об изменениях климата,

ландшафтов и гидрологии в плейстоцене и голоцене. Донные отложения озер, среди других геологических архивов, являются летописями, в которых записана и сохранена информация об экологических обстановках прошлого регионального и планетарного уровня с разрешением от тысячелетий и столетий до года [Субетто, 2009; Субетто и др., 2017].

Начало палеолимнологическим исследованиям в российской Арктике было положено учеными Арктического и антарктического научно-исследовательского института в 1960–1970 гг. [Говоруха и др., 1965]. В 1980-е гг. велись исследования по проекту «История озер СССР» Институтом озераведения АН СССР и смежными институтами, в рамках которого была изучена история озер Кольского полуострова, Большеземельской тундры, п-ова Таймыр и других северных регионов Евразии [История озер..., 1992; История озер Севера Азии, 1995; Sundqvist et al., 2014]. В настоящее время значительная работа по исследованию арктических озер Сибири проводится в рамках международного сотрудничества. Однако, несмотря на то что палеолимнологические исследования в России проводятся во многих регионах страны, изученность территорий российской части Северной Евразии по-прежнему несопоставимо низка по сравнению с Европой и Североамериканским континентом.

Последние десятилетия активно проводятся палеолимнологические исследования на европейском Севере России, включающие в себя реконструкции природно-климатических обстановок в послеледниковое время, динамику уровня крупных бассейнов по периферии Балтийского кристаллического щита, выявление причин и механизмов резких климатических изменений на границе плейстоцена и голоцена [Субетто и др., 2003; Субетто, 2009; Андроников и др., 2014, Sundqvist et al., 2014]. Исследованы донные отложения разновысотных озер Карельского берега Белого моря и Соловецкого архипелага, что позволило реконструировать динамику изменения уровня Белого моря в послеледниковое время [Сапелко и др., 2015]. Аналогичные исследования были выполнены ранее для восточной части Балтийского моря и Ладожского озера [Субетто, 2009; Dolukhanov et al., 2009; Rosentau et al., 2013; Лудикова, 2015]. В 2014 г. палеогеографические работы были продолжены уже на Онежском полуострове Белого моря, где были выполнены исследования разреза на мысу Вейнаволок и озер и болот в губе Конюховской. Полученные данные легли в основу реконструкции хронологии перемещений береговой линии Белого моря в районе Онежского полуострова.

Развитие озер севера непосредственно связано с распространением четвертичных оледенений, сформировавших современный рельеф и обусловивших возникновение озер различного генезиса, которые можно подразделить на две большие группы. Это – (1) реликтовые озера, являвшиеся

в прошлом частью крупных приледниковых бассейнов, и (2) озера, развитие которых происходило вне крупных приледниковых бассейнов (термокарстовые, подпруженные, аккумулятивно-просадочные, экзарационные и др.). Озера приледникового генезиса (реликтовые озера) расположены преимущественно на относительно низких абсолютных отметках в районах распространения в прошлом крупных приледниковых бассейнов. К этой группе озер на северо-западе России относятся оз. Ильмень, озера северной низменной части Карельского перешейка, Приладожье и Ладожское озеро, озера прибрежной зоны Балтийского моря, оз. Псковско-Чудское и оз. Онежское, большие мелководные озера в Вологодско-Архангельском регионе – Воже, Лача, Белое, Кубенское и ряд других. Крупные приледниковые водоемы возникли не ранее 14 000 лет назад в результате таяния ледника последнего валдайского оледенения. Для этих озер характерно наличие в нижней части разрезов донных отложений мощной (до десятков метров) толщи ленточных глин – отложений озерно-ледникового генезиса, сформировавшихся в условиях сезонного поступления потоков наносов с тальми водами с ледникового щита [Субетто, 2009].

Для озер второй группы – подпруженных моренами озер, озер термокарстового генезиса или озер, возникших в результате протаивания погребенного льда, характерны в основании разреза маломощные (первые метры), иногда с неясно выраженной слоистостью, глинистые отложения, преимущественно серого или буровато-серого цвета. Время происхождения озер этой группы, как правило, более позднее, чем реликтовых озер (10 000–9000 лет назад), особенно у термокарстовых.

Смена климатических условий от холодных, арктических позднего плейстоцена к теплым и влажным условиям голоцена около 11 700 лет назад привела к значительным палеогеографическим изменениям, включающим: (1) быстрое таяние Скандинавского ледникового щита; (2) катастрофический спуск Балтийского ледникового озера на 25–28 м в связи с отступлением ледника от среднешведской возвышенности, в результате чего снизился базис эрозии, и понизились уровни озер (полное исчезновение приледниковых бассейнов); (3) таяние вечномерзлых грунтов; (4) смена тундро-степных ценозов лесными сообществами, переход от азональности к зональности в распределении растительности; (5) формирование устойчивого почвенного покрова.

Азиатская часть России в палеолимнологическом отношении менее изучена, хотя потребности в знании скорости и направленности природных процессов велики. Например, на территории Якутии насчитывается свыше 709 тыс. озер. Разнообразие озер зависит от происхождения их котловин, очертания берегов, размера, глубины и органического состава. По происхождению котловины озера подразделяются на термокарстовые,

карстовые, пойменные, речные, дельтовые, лагунные, тектонические и ледниковые. 98 % озер имеют термокарстовое происхождение, для них характерна небольшая площадь и малая глубина [Субетто и др., 2017].

Реконструкции климатических изменений в различных регионах Якутии и на прилегающих территориях, выполненные с использованием биотических и абиотических индикаторов из донных отложений озер, показали, что климатические вариации на протяжении позднего плейстоцена и голоцена носили несинхронный и региональный характер (например, [Biskaborn et al., 2016]). Наступление голоценового оптимума в различных регионах Сибири, по всей вероятности, находилось в зависимости от времени таяния Лаврентийского ледяного щита, который служил поставщиком холодных воздушных масс в Сибирь. Однако реконструируемая асинхронность окончания голоценового оптимума может быть ответной реакцией экосистем и на уменьшающийся контраст сезонной инсоляции и усиливающейся континентальности Сибири [Laskar et al., 2004].

В последние годы развернулись активные научно-исследовательские работы по изучению стратиграфии донных отложений озер и реконструкции палеогеографических и палеоклиматических обстановок прошлого в рамках международных проектов, таких как «Озеро Эльгыгытгын», «Озера Сибири», «ПЛЮТ» и др. В настоящее время в уникальном озере метеоритного происхождения Эльгыгытгын вскрыты отложения, послышное изучение которых позволит реконструировать изменения климата на протяжении 3,6 млн лет [Melles et al., 2012]. Новые данные совместно с немецкими коллегами получены в рамках проекта «Озера Сибири» по изучению истории озер Якутии, таких, например, как Биллях, Сатагай и др. [Müller et al., 2010; Nazarova et al., 2013]. Установлено, что накопление донных отложений в оз. Биллях, расположенном в районе Верхоянского хребта, идет непрерывно не менее 40 тыс. лет [Müller et al., 2010], что свидетельствует об отсутствии в исследуемом регионе значительных ледниковых шапок в максимум последнего оледенения. Получена информация по динамике климата и природных обстановок в позднем плейстоцене и голоцене для северо-востока Сибири (Biskaborn et al., 2016; Klemm et al., 2016 и др.) и выявлены изменения характера озерного накопления органического вещества в донных отложениях в зависимости от солнечной активности [Пестрякова и др., 2008].

### Литература

Андроников А. В., Субетто Д. А., Лауретта Д. С. и др. Поиск следов метеоритного удара: особенности распределения микроэлементов в позднплейстоценовых осадках оз. Медведевского (Карельский перешеек, Россия) // Докл. Академии Наук. 2014. № 1. С. 69–73.

Говоруха Л. С., Зауер Л. М., Зеленко А. С. Палеогеографическая реконструкция голоцена Земли Франца-Иосифа на основании изучения озерных отложений // Антропогенный период в Арктике и Субарктике. Тр. НИИГА. 1965. Т. 143. 360 с.

*История озер Восточно-Европейской равнины.* СПб., 1992. 262 с. (Серия «История озер».)

*История озер Севера Азии.* СПб., 1995. 288 с. (Серия «История озер».)

Лудикова А. В. Свидетельства среднеголоценовой трансгрессии Ладожского озера по данным диатомового анализа // Изв. РГО. 2015. Т. 147, вып. 4. С. 38–51.

Пестрякова Л. А., Субетто Д. А., Герасимова М. А. и др. Эволюция природной среды в Центральной Якутии в голоцене // Изв. РГО. 2008. Т. 140, № 4. С. 54–67.

Сапелко Т. В., Колька В. В., Евзеров В. Я. Динамика природной среды и развития озер в позднем плейстоцене и голоцене на южном берегу Кольского полуострова (район пос. Умба) // Тр. КарНЦ РАН, сер. Лимнология. 2015. № 5. С. 60–69.

Субетто Д. А. Донные отложения озер: палеолимнологические реконструкции. СПб.: РГПУ им. А. И. Герцена, 2009. 339 с.

Субетто Д. А., Давыдова Н. Н., Сапелко Т. В. и др. Климат северо-запада России на рубеже плейстоцена и голоцена // Изв. РАН, сер. Географическая. 2003. № 5. С. 80–91.

Субетто Д. А., Назарова Л. Б., Пестрякова Л. А. и др. Палеолимнологические исследования в российской части северной Евразии: обзор // Сибирский экологический журнал. 2017 (в печати).

Biskaborn B. K., Subetto D. A., Savelieva L. A. et al. Late Quaternary vegetation and lake system dynamics in northeastern Siberia: Implications for seasonal climate variability // Quaternary Science Reviews. 2016. Vol. 147. P. 406–421.

Dolukhanov P. M., Subetto D. A., Arslanov Kh. A. et al. The Baltic Sea and Ladoga Lake transgressions and early human migrations in North-western Russia // Quaternary International. 2009. Vol. 203. P. 33–51.

Klemm J., Herzsuh U., Pestyakova L. A. Vegetation, climate and lake changes over the last 7000 years at the boreal treeline in northcentral Siberia // Quaternary Science Reviews. 2016. Vol. 147. P. 422–434.

Laskar J., Robutel P., Joutel F. et al. A long-term numerical solution for the insolation quantities of the Earth // Astron. Astrophys. 2004. Vol. 428. P. 261–285.

Melles M., Brigham-Grette J., Nowaczyk N. R. et al. 2.8 Million Years of Arctic Climate Change from Lake El'gygytyn, NE Russia // Science. 2012. Vol. 337, N 6092. P. 315–320.

Müller S., Tarasov P. E., Andreev A. A. et al. Late Quaternary vegetation and environments in the Verkhoyansk Mountains region (NE Asia) reconstructed from a 50-kyr fossil pollen record from Lake Billyakh // Quaternary Science Reviews. 2010. N 29. P. 2071–2086.

Nazarova L., Lüpfer H., Subetto D. et al. Holocene climate conditions in Central Yakutia (North-Eastern Siberia) inferred from sediment composition and fossil chironomids of Lake Temje // Quaternary International. 2013. Vol. 290–291. P. 264–274.

*Rosentau A., Muru M., Kriiska A. et al.* Stone Age settlement and Holocene shore displacement in the Narva-Luga Klint Bay area, eastern Gulf of Finland // *Boreas*. 2013. Vol. 42. P. 912–931.

*Sundqvist H. S., Kaufman D. S., McKay N. P. et al.* Arctic Holocene proxy climate database – new approaches to assessing geochronological accuracy and encoding climate variables // *Clim. Past*. 2014. N 10. P. 1605–1631.

## MODERN STATE OF PALEOLIMNOLOGICAL STUDIES IN NORTHERN EURASIA

**D. A. Subetto**

*Northern Water Problems Institute, KarRC RAS*

A review of the modern state of palaeolimnological studies in the Russian part of Northern Eurasia will be given during the conference.

## ИЗМЕНЕНИЕ КЛИМАТИЧЕСКИХ ОБСТАНОВОК ЮГО-ВОСТОКА ПОЛУОСТРОВА ТАЙМЫР (БАССЕЙН РЕКИ ХАТАНГИ) ЗА ПОСЛЕДНИЕ 7000 ЛЕТ

**Л. С. Сырых<sup>1,2</sup>, Л. Б. Назарова<sup>2,3,4</sup>, Д. А. Субетто<sup>1,5</sup>, И. М. Греков<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>*Российский государственный педагогический университет  
им. А. И. Герцена, г. Санкт-Петербург*

<sup>2</sup>*Казанский (Приволжский) федеральный университет, г. Казань*

<sup>3</sup>*Потсдамский Университет, г. Потсдам, Германия*

<sup>4</sup>*Институт полярных и морских исследований им. А. Вегенера,  
г. Потсдам, Германия*

<sup>5</sup>*Институт водных проблем Севера КарНЦ РАН, г. Петрозаводск*

В статье представлены результаты исследования малого озера Хатанга-12, расположенного в юго-восточной части полуострова Таймыр. На основе хирономидного анализа была проведена качественная и количественная реконструкция развития природной среды данной территории за последние 7000 лет.

Арктические экосистемы сформировались сравнительно недавно, они являются легкоуязвимыми для антропогенного вмешательства и особо чутко реагируют на изменение климатических условий. Несмотря на то что реконструкция развития природной среды в прошлом проводится практически во всем северном полушарии [Mayewski et al., 2004; Schirmermeister et al., 2011; Meyer et al., 2015; Rudaya et al., 2016], регион Российской Арктики изучен не в полной мере [Nazarova, 2012; Palagushkina et al., 2012; Solovieva et al., 2005, 2008].

Основной целью нашего исследования является качественная и количественная реконструкция палеоэкологических условий голоцена юго-восточной части полуострова Таймыр на основе микропалеонтологического анализа озерных донных отложений с применением статистических хириноmidных моделей для реконструкции среднеиюльской температуры воздуха и глубины воды в озерах.

Объектом исследования было выбрано озеро Хатанга-12 (72°50' с. ш., 102°29' в. д.; 60 м н. у. м.). Озеро небольшое: площадь 2,4 га, максимальная глубина около 14 м. Котловина озера образовалась в результате развития термокарстовых процессов.

В озере был отобран и проанализирован керн донных отложений длиной 131,5 см, охватывающий период времени около 7100 лет [Klemm et al., 2015]. Обработка 28 проб донных осадков на хириноmidный анализ выполнена по стандартной методике [Brooks et al., 2007]. Из каждой пробы было отобрано от 45 до 67 головных капсул. Определение проводили по современным специализированным определителям [Wiederholm, 1983; Brooks et al., 2007] и коллекции хириноmid Института полярных и морских исследований (AWI), г. Потсдам (Л. Б. Назарова). Реконструкция среднеиюльской температуры воздуха (T° июля) и глубины (WD) выполнена по российским хириноmidным моделям [Nazarova et al., 2015].

В изученном разрезе по результатам хириноmidного анализа были выделены и проанализированы четыре статистически значимые зоны, соответствующие определенным этапам развития природной среды исследуемой территории (рис.):

**Ch I (7100–6250 кал. л. н.).** В пределах зоны наблюдаются вариации численности доминирующих таксонов хириноmid *Sergentia coracina*-type и *Zalutschia zalutschicola* (рис.). Также в составе хириноmidных сообществ присутствуют *Psectrocladius sordidellus*-type, *Cricotopus intersectus*-type, *Cricotopus cylindraceus*-type, *Cricotopus laricomalis*-type, ассоциирующиеся с макрофитами.

Период с 7100 по 6250 кал. л. н. является инициальной стадией развития озера. Доминирующие в это время таксоны хириноmid являются относительно глубоководными и реагируют на изменение уровня воды: их количество уменьшается при обмелении водоема. Прибрежная зона была заболочена, о чем свидетельствует присутствие фитофильных таксонов хириноmid.

Реконструируемые среднеиюльские температуры воздуха ниже современных до 6750 кал. л. н., а позже становятся выше современного уровня. Данный период соответствует финальной стадии среднеголоценового потепления. Около 6250 кал. л. н. реконструированные температуры фиксируют кратковременное похолодание. Теплые, влажные

условия, установившиеся на территории севера Сибири в период среднеголоценового потепления, способствовали активизации термокарстовых процессов, в результате которых и была сформирована котловина озера Хатанга-12.

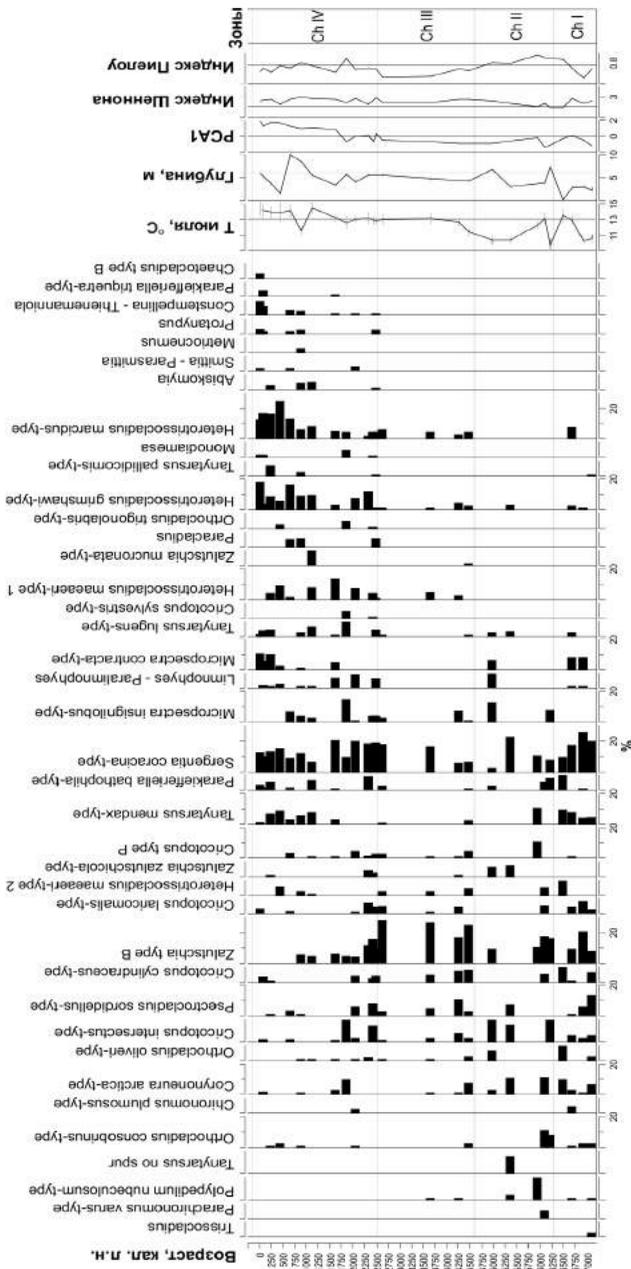
**Ch II (6250–4500 кал. л. н.).** В составе хириноmidных сообществ увеличивается численность фитофильных таксонов *Cricotopus* и *Zalutschia*. В целом преобладают холодноводные стенотермные таксоны, такие как *Sergentia coracina*-type, *Zalutschia* type B и *Micropsectra insignilobus*-type и др. (рис.). В этот период по данным хириноmidного анализа реконструируется похолодание климата, которое находит отражение в состоянии экосистемы озера. Данный период соответствует неогляциальному похолоданию, которое отмечалось в разных регионах Евразии и Северной Америки [Gribbin, Lem, 1980; Grove, 2004]. Климат прохладный и влажный.

**Ch III (4500 до 2500 кал. л. н.).** Видовое разнообразие хириноmid выше, чем в предыдущих периодах. Доминируют виды холодных и умеренных условий, предпочитающие обилие макрофитов (*Zalutschia* type B, *Limnophyes-Paralimnophyes*, *Cricotopus intersectus*-type) (рис.). Реконструированные температуры варьируют от 11,4 до 12,9. Реконструированные глубины составляют 4–5 м.

**Ch IV (с 2500 кал. л. н. до настоящего времени).** В составе хириноmidных сообществ значительно снижается роль *Sergentia coracina*-type и *Zalutschia* type B, доминирующими таксонами становятся профундальные и толерантные к закислению *Heterotrissocladus grimshawi*-type, *Heterotrissocladus maeaeri*-type 1 (рис.).

С 2500 кал. л. н. фиксируются колебания климатических условий и нестабильность развития природных обстановок. Реконструированные климатические условия близки к современным. С 2000 до 1200 кал. л. н. реконструировано увеличение температуры воздуха, а позже, 1200–900 кал. л. н., отмечается кратковременное похолодание климата. Повышение роли профундальных и толерантных к закислению таксонов в хириноmidных сообществах данного периода, вероятно, связано с увеличением глубины озера и увеличением поступления гуминовых кислот с поверхностным стоком, что, в свою очередь, свидетельствует о развитии почвенно-растительного покрова на водосборе.

**Закключение.** По результатам исследования разреза донных отложений оз. Хатанга-12 получена качественная и количественная реконструкция климатических условий голоцена юго-восточной части полуострова Таймыр, а также выявлена периодизация в развитии экосистемы типичного для региона термокарстового водоема и связь этапов его развития с изменениями климата.



Стратиграфическое распространение таксонов хирономид в донных отложениях оз. Хатаंगा-12, реконструированные средние температуры июля (Т°, С) и глубина воды, значение PCA 1

Работа выполнена в рамках гранта РФФИ 16-17-10118. Часть лабораторных работ выполнена при поддержке программы DAAD «Михаил Ломоносов», а также за счет средств субсидии, выделенной в рамках государственной поддержки Казанского (Приволжского) федерального университета в целях повышения его конкурентоспособности среди ведущих мировых научно-образовательных центров. Авторы благодарят всех участников экспедиций в регион исследования.

### Литература

*Brooks S. J., Langdon P. G., Heiri O.* Using and identifying chironomid larvae in palaeoecology // QRA Technical Guide № 10, Quaternary Research Association, London, 2007. 276 p.

*Gribbin J., Lem G.* The Fluctuations of Climate during the Historical Period. Climatic Fluctuations // Hydrometeoizdat. Leningrad, 1980. P. 102–121.

*Grove J. M.* Little Ice Ages: Ancient and Modern. Routledge, London (2 volumes), 2004. 718 p.

*Klemm J., Herzsuh U., Pestryakova L. A.* Vegetation, climate and lake changes over the last 7000 years at the boreal treeline in northcentral Siberia // Quaternary Science Reviews. 2015. Vol. 147. P. 422–434.

*Mayewski P. A., Rohling E. E., Stager J. C. et al.* Holocene climate variability // Quaternary Research. 2004. N 62. P. 243–255.

*Meyer H., Chaplignin B., Hoff U. et al.* Oxygen isotope composition of diatoms as Late Holocene climate proxy at Two-Yurts-Lake, Central Kamchatka, Russia // Global and Planetary Change. 2015. Vol. 134. P. 118–128.

*Nazarova L.* Chironomids in Quaternary permafrost deposits in the Siberian Arctic // Chironomus. Newsletter of Chironomid research. 2012. N 25. P. 39–42.

*Nazarova L., Self A., Brooks S. J. et al.* Northern Russian chironomid-based modern summer temperature data set and inference models // Global and Planetary Change. 2015. N 134. P. 10–25.

*Palagushkina O. V., Nazarova L. B., Wetterich S., Schirraeister L.* Diatoms of modern bottom sediments in Siberian Arctic // Contemporary Problems of Ecology. 2012. Vol. 5, N 4. P. 413–422.

*Rudaya N., Nazarova L., Novenko E. et al.* Mid Holocene climate and vegetation in the Northern Altay mountains recorded in Lake Teletskoe // Global and Planetary Change. 2016. Vol. 141. P. 12–24.

*Schirraeister L., Grosse G., Wetterich S. et al.* Fossil organic matter characteristics in permafrost deposits of the northeast Siberian Arctic // Journal of Geophysical Research. 2011. Vol. 116, G00M02. P. 1–16.

*Solovieva N., Jones V. J., Nazarova L. et al.* Palaeolimnological evidence for recent climatic change in lakes from the northern Urals, arctic Russia // Journal of Palaeolimnology. 2005. Vol. 33. P. 463–482.

*Solovieva N., Jones V. J., Birks H. J. B. et al.* Diatom responses to 20th century climate warming in lakes from the Northern Urals, Russia // Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol. 2008. N 259. P. 96–106.

*Wiederholm T.* Chironomidae of the Holarctic region. Keys and diagnoses. Part 1. Larvae // Entomologica Scandinavica. 1983. Suppl. 19. P. 1–457.

## THE CHANGE OF THE CLIMATIC CONDITIONS ON THE TAYMYR PENINSULA (KHATANGA RIVER BASIN) OVER THE LAST 7 KA

L. S. Syrykh<sup>1,2</sup>, L. B. Nazarova<sup>2,3,4</sup>, D. A. Subetto<sup>1,5</sup>, I. M. Grekov<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Herzen State Pedagogical University of Russia, Saint-Petersburg*

<sup>2</sup>*Kazan Federal University, Kazan*

<sup>3</sup>*University of Potsdam, Germany*

<sup>4</sup>*Alfred Wegener Institute, Helmholtz Centre for Polar and Marine Research, Germany*

<sup>5</sup>*Northern Water Problems Institute, KarRC RAS, Petrozavodsk*

The results of studies of a small lake Khatanga-12 (Taymyr Peninsula, Krasnoyarsk Region) are presented. We made a qualitative and quantitative reconstruction of the climate and environment of this territory for the last 7 ka based on chironomid analysis.

## РЕКОНСТРУКЦИЯ ЛЕТНИХ ТЕМПЕРАТУР В ВОСТОЧНОЙ СИБИРИ НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА ВИДОВОГО СОСТАВА ХИРОНОМИД ИЗ КЕРНОВ ДОННЫХ ОСАДКОВ ОЗЕР

А. П. Федотов, И. В. Енущенко

*Лимнологический институт СО РАН, г. Иркутск*

В работе представлены данные по реконструкции июльских температур за последнее тысячелетие для Восточного Саяна и Кодарского хребта. Реконструкция строится на основе разработанной региональной модели, учитывающей видовой состав хирономид из 56 озер, расположенных между 51–59 °N и 98–118 °E, высотами 500–2700 м н. у. м., и видového состава хирономид из четырех кернов озерных донных осадков.

### Введение

Тема изменения климата планеты, безусловно, является одной из основополагающих в выработке стратегий жизнеобеспечения населения Земли. Между тем изучение европейских разрезов голоцена с высоким временным разрешением наглядно показало, что продолжительные климатические фазы были крайне неоднородны, как это может показаться, если изучать только длинные климатические ряды.

В последние десятилетия использование головных капсул хирономид в палеоклиматических реконструкциях становится все более популярным. И находится все больше доказательств, что изменения количественных характеристик сообществ хирономид, в первую очередь, зависят от летней температуры [Brooks, 2006; Nazarova et al., 2013 и др]. Однако построение температурных моделей на основе изменения видového состава хирономид требует наличия обширной региональной базы данных по видовой спецификации хирономид в зависимости от температурного гради-

ента. Для Восточной Сибири наиболее мотивированная подобная модель разработана только для арктического сектора Якутии [Nazarova et al., 2009, 2013].

Мы создали подобную модель для южной части Восточной Сибири, и на основе данной модели выполнили реконструкцию июльских температур за последнее тысячелетие. Этот промежуток времени охватывает такие контрастные климатические режимы, как Средневековое потепление (СрП), Малый ледниковый период (МЛП), Современное потепление (СП).

### Методы и объекты исследования

Региональная калибровочная модель для июльских температур строилась на основе анализа видового состава хирономид из поверхностного слоя 56 озер, расположенных между 51–59 °N, 98–118 °E и высотами 500–2700 м н. у. м. Региональный разброс современных (1900–2010) июльских температур в местах расположения калибровочных озер составил от 7,8 до 18 °C. Модель, описывающая изменчивость июльских температур и видовой состав хирономид, строилась на основе метода наименьших квадратов в программе C2 [Juggins, 2009].

Калибровочная модель применялась для температурных реконструкций по видовому составу хирономид из кернов четырех озер, расположенных на Кодарском хребте и Восточном Саяне.

Восточный Саян. Озера Высокогорное и Туманное располагаются в 200 км от южной оконечности Байкала. Озеро Высокогорное (51,56 °N, 100,45 °E) располагается на высоте 2098 м н. у. м., максимальная глубина озера 19 м. С озера получен керн. Озеро Туманное (51,44 °N, 100,37 °E) располагается выше границы леса на высоте 2690 м. 40-см керн взят с центральной части озера с глубины 6 м.

Кодарский хребет. Озеро Орон расположено примерно в 450 км от Байкала, на высоте 353 м н. у. м. 73-см керн взят с глубины 9 м (57°09'14" N, 116°27'59" E). Прогляциальное оз. Угловое (56,56 °N, 117,35 °E) расположено на высоте 1890 м н. у. м выше границы леса, 42-см керн донных отложений был получен с глубины 7 м.

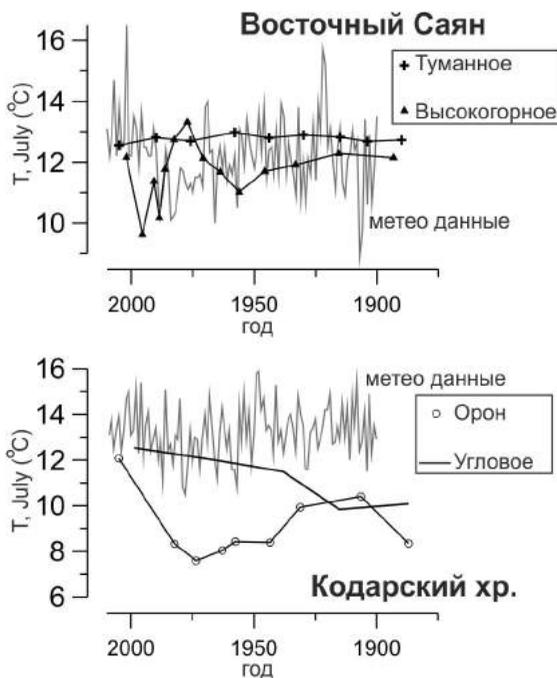
### Результаты и обсуждения

114 таксонов хирономид были обнаружены в поверхностном слое донных осадков 56 калибровочных озер. При этом 61 таксон встречался в трех и более озерах. Наиболее часто встречаемыми были *Psectrocladius* gr. *sordidellus* Zett. и *Corynoneura scutellata* Winn. (встречаемость – 18 %), *Sergentia* sp. (15 %) *Cladotanytarsus* gr. *mancus* Walk (13 %), *Heterotrissocladius* gr. *marcidus* (13 %), *Tanytarsus* sp. (13 %), *Procladius*

sp. (13 %), *Tanytarsus* gr. *eminulus* Walker (12 %), *Chironomus antracinus* Zett. (11 %), *Procladius* gr. *choreus* Meig. (11 %), *Ablobesmyia phatta* (11 %) и *Cricotopus* sp. (11 %).

*Метеоданные и температурные реконструкции для периода 1900–2010 гг.*

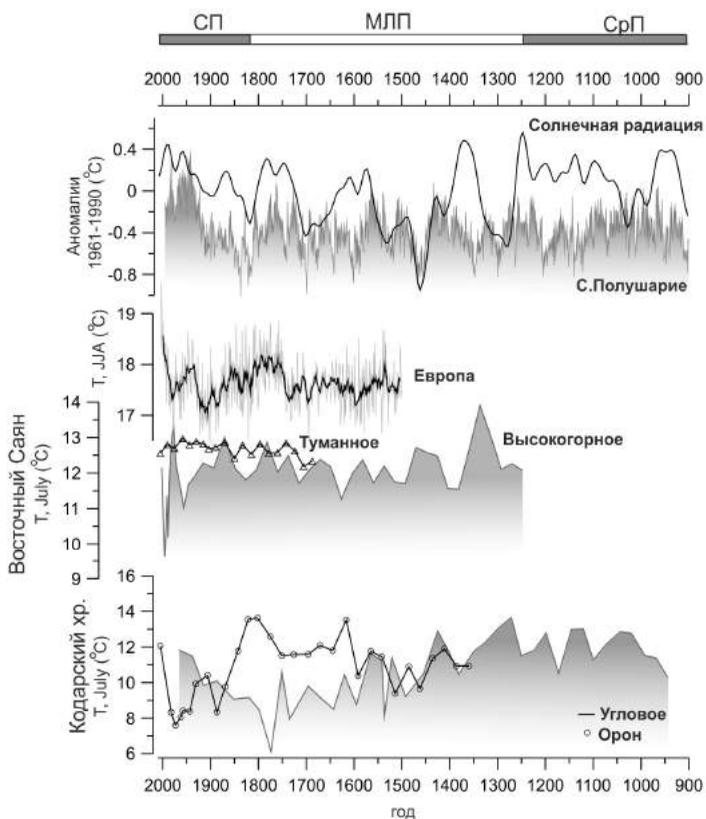
В этот период размах июльских температурных колебаний от 11 до 15 °С для Кодарского хребта и В. Саяна в целом был схож (рис. 1). Однако температурные реконструкции из озер В. Саяна наиболее приближены к метеоданным для этого региона, в то время как реконструкции для Кодарского хребта показывали более низкие (на 2–4 °С) температуры. Вероятнее всего, это различие может быть объяснено тем, что в отличие от восточносаянских озер исследованные озера Кодарского хребта имеют значительное питание за счет талых вод ледников и снежников. В результате интенсивного поступления талых холодных вод температурный режим озера смещался в сторону его понижения, что способствовало формированию холоднолюбивых сообществ хирономид в этих озерах.



**Рис. 1.** Сравнение метеоданных с данными реконструкции на основе анализа видового состава хирономид

*Малый ледниковый период (эпизод ~1900–1700 гг.)*

Этот эпизод характеризовался ростом европейских летних температур и ослаблением Восточно-Азиатского муссона (ВАМ). Согласно летописям из оз. Угловое минимальные температуры июля (~6 °С) были около 1760-х гг. (рис. 2). Кислородно-изотопная летопись ледника г. Белуха (Алтай, Западный Саян) показывает температурный минимум около 1720-х гг. [Eichler et al., 2009]. Региональный рост летних температур отмечается с 1800-х гг. Отступление ледников могло быть откликом на этот температурный тренд. Для примера, ледники В. Саяна и Кодарского хребта начали активно таять с 1850 и 1875 гг., соответственно [Stepanova et al., 2015].



**Рис. 2. Реконструкция июльских температур для Восточного Саяна и Кодарского хребта. Распределение летних температур в Европе согласно: [Хоплаки et al., 2005]**

### *Эпизод 1750–1600 гг.*

Температурные реконструкции по кернам из озер Высокогорное и Орон показывают незначительное ( $\sim 1$  °C) увеличение июльских температур, в то время как летопись из оз. Углового показывает их снижение в 1600–1820-х гг. Разнонаправленность температурных летописей с Кодарского хребта объясняется высотным эффектом, когда оз. Угловое менее прогревалось по сравнению с оз. Орон. Низкие летние температуры в Европе в течение 1600–1750-х гг. могут свидетельствовать о низкой активности Североатлантической осцилляции, следовательно, увеличение летних температур в Восточной Сибири могло быть обусловлено влиянием Восточноазиатского муссона.

### *Эпизод 3 (1600–1300 гг.)*

Начало проявления устойчивого похолодания, именуемого МЛП, в разных областях Северного полушария было несинхронным. Например, МЛП начался в Европе около 1300-х гг. (GG), а летописи из Китая и Западной Сибири свидетельствуют о теплых условиях в 1160–1400-х гг. [Yang et al., 2002; Kalugin et al., 2009]. Согласно нашим данным, июльские температуры в Восточной Сибири были высокие (до 13 °C) в 1280–1350-х гг. (рис. 2). И это неожиданный результат, так как уровень солнечной радиации был низок (Минимум Вольфа). Но это противоречие не уникально. Так, последующее (1350–1400-х гг.) снижение температур в Северном полушарии проходило на фоне высокого уровня солнечной радиации (рис. 2).

Мы предполагаем, что в Восточной Сибири устойчивое снижение летних температур началось с  $\sim 1350$ -х гг. Тенденция к похолоданию климата с 1360-х гг. также отмечается в летописях из малых озер и болот, расположенных вблизи Байкала [Bezrukova et al., 2006].

Эмпирическая климатическая модель (ЕСНО-G) предполагает, что резкое снижение среднегодовых температур произошло после 1550-х гг. [Storch et al., 2004]. Согласно полученным нами результатам, первый эпизод значительного похолодания в МЛП случился в 1450–1600-х гг., когда июльские температуры снизились до 8,5 °C. Дендрохронологические реконструкции для Северной Монголии этого временного промежутка показывают, что на общем фоне снижения летних температур до 8–9 °C были короткие (в 1–3 года) повышения температур до 13 °C [Edward et al., 2013]. Хотя временное разрешение хирономидных летописей не такое детальное, но и они свидетельствуют о контрастных изменениях летних температур (рис. 2).

### *Средневековое потепление*

Дендрохронологические реконструкции для Северной Монголии характеризуют летние температуры на уровне 12,5–13,5 °C в 990–1150-х гг.

[Edward et al., 2013]. Летопись из оз. Углового также показывает июльские температуры до 13 °С (рис. 2). Согласованность этих температурных реконструкций может свидетельствовать о том, что поступление талых вод ледника в оз. Угловое не происходило. Можно предположить, что ледника до СП не было в водосборном бассейне оз. Углового, в противном случае хирономидная летопись была бы искажена, как это произошло при переходе от МЛП в СП.

**Благодарности.** За помощь в проведении экспедиционных работ выражаем свою благодарность В. А. Исаеву (ФГПУ Витимский), Э. Ю. Осипову, К. Е. Вершинину (ЛИН СО РАН). Работы выполнены при поддержке госзадания № 0345-2016-0006, гранта РФФИ – 16-05-00342.

### Литература

*Bezrukova E. V., Belov A. V., Abzaeva A. A. et al.* First high-resolution dated records of vegetation and climate changes on the Lake Baikal northern shore in the middle-late Holocene // *Doklady Earth Sciences* 2006. Vol. 411. P. 1331–1335.

*Brooks S. J.* Fossil midges (Diptera: Chironomidae) as palaeoclimatic indicators for the Eurasian region // *Quat Sci Rev.* 2006. Vol. 25. P. 1894–1910.

*Cook E. R., Krusic P. J., Anchukaitis K. J. et al.* Tree-ring reconstructed summer temperature anomalies for temperate East Asia since 800 C.E. // *Climate Dynamics.* 2013. Vol. 41. P. 2957–2972.

*Eichler A., Olivier S., Henderson K. et al.* Temperature response in the Altai region lags solar forcing // *Geophys Res Lett.* 2009. doi:10.1029/2008GL035930.

*Juggins S.* C2 version 1.5 user guide. Software for ecological and palaeoecological data analysis and visualisation // Newcastle University. 2009. Newcastle upon Tyne, UK.

*Kalugin I. A., Daryin A. V., Babich V. V.* Reconstruction of annual air temperatures for three thousand years in Altai region by lithological and geochemical indicators in Teletskoe lake sediments // *Doklady Earth Sciences.* 2009. Vol. 426. P. 681–684.

*Nazarova L., Herzsuh U., Wetterich S., Pestryakova L.* Chironomid-based inference models for estimating mean July air temperature and water depth from lakes in Yakutia, northeastern Russia // *J. Paleolimnol.* 2009. Vol. 45. P. 57–71.

*Nazarova L., Lüpferta H., Subetto D. et al.* Holocene climate conditions in central Yakutia (Eastern Siberia) inferred from sediment composition and fossil chironomids of Lake Temje // *Quat Inter.* 2013. Vol. 290–291. P. 264–274.

*Storch H., Zorita E., Jones J. M. et al.* Reconstructing Past Climate from Noisy Data // *Science.* 2004. Vol. 306. P. 679–682.

*Xoplaki E., Luterbacher J., Paeth H. et al.* European spring and autumn temperature variability and change of extremes over the last half millennium // *Geophys. Res. Lett.* 2005. doi:10.1029/2005GL023424.

*Yang B., Braeuning A., Johnson K. R., Yafeng S.* General characteristics of temperature variation in China during the last two millennia // *Geophys Res Lett.* 2002. doi: 10.1029/2001GL014485/

## **RECONSTRUCTION OF SUMMER TEMPERATURES IN EAST SIBERIA (RUSSIA), INFERRED FROM CHIRONOMID ANALYSES OF LAKE BOTTOM SEDIMENTS**

**A. P. Fedotov, I. V. Enushchenko**

*Limnological Institute of the Siberian Branch of RAS*

The reconstruction of July air temperatures for the last 1 kyr is presented in the paper. The study area is situated between 51–59 °N, 98–118 °E with elevations ranging from about 500 m to above 2700 m a.s.l. Chironomid assemblages from upper layers of bottom sediments from 56 lakes and 4 lake bottom sediment cores were investigated in the study.

## **ПАЛЕОГЕОГРАФИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ ОСАДКОНАКОПЛЕНИЯ НА КАРЕЛЬСКОМ И ПОМОРСКОМ БЕРЕГАХ БЕЛОГО МОРЯ**

**Т. С. Шелехова, Н. Б. Лаврова**

*Институт геологии КарНЦ РАН*

Представлены результаты палинологического, диатомового анализов, радиоуглеродного датирования донных отложений малых озер, одно из которых расположено на Карельском берегу Белого моря, другое – на Поморском. Получена реконструкция динамики растительности, начиная с позднего дриаса, выявлены палиноиндикаторы морских и переходных к пресноводным условий осадконакопления. Установлены особенности диатомовых комплексов для каждого палеоклиматического периода и различных фаций осадков. Осадконакопление в озере Карельского берега (п. Энгозеро) началось в условиях морского бассейна, обособление его произошло в пребореале. Онежский залив был отделен от бассейна Белого моря ледниковым фронтом и осадконакопление в оз. Левисгорское (Сумский Посад) началось в условиях пресноводного приледникового водоема в позднем дриасе.

Проведено исследование донных осадков малых озер, которые образовались в локальных депрессиях побережья при регрессии береговой линии Белого моря вследствие гляциоизостатического поднятия Фенноскандинавского щита. Это позволило не только определить временное положение береговой линии, темпы его изменения и этим оценить скорость поднятия суши для разных частей территории, но и реконструировать общие закономерности и специфические особенности палеогеографических условий территории в позднеледниковье-голоцене. Установлено, что положение верхней морской границы на Карельском и Поморском берегах Белого моря сильно варьирует. Так, в районе п. Чула она находится на высоте выше 100 м н. у. м., в районе п. Кузема – примерно

на 70 м н. у. м. [Колька и др., 2012]. Такие значительные различия связаны с неравномерным неотектоническим поднятием территории в голоцене после снятия ледниковой нагрузки. Гляциоизостатическое поднятие на побережье Онежского залива было незначительным, уровень верхней морской границы здесь еще предстоит определить. В работе приведены результаты исследований донных отложений безымянного озера около п. Энгозеро (65°47'26'' с. ш., 34°12'49'' в. д., абс. отм. 57,3 м) – Карельский берег и оз. Левисгорское (64° 14' с. ш., 35° 39' 55'' в. д.; 45 м н. у. м.) – район п. Сумский Посад, Поморский берег.

Радиоуглеродные датировки донных отложений обоих озер хорошо согласуются с определениями относительного возраста отложений на основе палинологического и диатомового анализов. Получена реконструкция динамики растительности, начиная с позднего дриаса, выявлены палиноиндикаторы морских условий осадконакопления и особенности диатомовых комплексов для каждого палеоклиматического периода и различных фаций осадков. Корреляции спорово-пыльцевых диаграмм показали, что тенденция хода кривых зонально обусловленных таксонов имеет схожий характер.

**Поздний дриас** (DR3: 11 000–10 300 л. н.). Основной фон ландшафта был представлен оголенными минеральными субстратами с отдельными островками палеоценозов, поскольку континентальный, холодный и сухой климат позднего дриаса, отсутствие сформированных почв не способствовали широкому распространению ксерофильных полынно-маревых и тундровых палеоценозов. Единичные деревья и редкостойные ценозы из *Betula czerepanovii* могли находить благоприятные местообитания в межрядовых понижениях, у холмов с подветренной стороны и в других защищенных от ветра местообитаниях.

Установлено, что в районе п. Сумский Посад во время дриасового похолодания Онежский залив был отделен от бассейна Белого моря ледниковым фронтом и функционировал как пресноводный приледниковый водоем. Это подтверждается отсутствием диатомовой флоры и пыльцы растений-галофитов, а также наличием зеленых водорослей *Pediastrum*: *P. angulosum* v. *angulosum*, *P. boryanum* v. *boryanum*, *P. boryanum* v. *cornutum*, *P. boryanum* v. *longicorne*, *P. duplex*, *P. duplex* v. *rugulosum*, *P. integrum*, большинство из которых характерно для приледниковых водоемов. Диатомовые водоросли не развивались из-за холодного климата, мутности поступающих в водоемы талых ледниковых вод, недостатка кремниевой кислоты и света. Возраст отложений подтверждается датировкой  $C^{14}$  10 380 ± 140 (ЛУ-6906).

**Пребореальный период** (PB: 10 300–9300 л. н.) ознаменовался глобальным потеплением климата. Для этого времени характерно активное

распространение березы, создававшей редкостойные березовые палеоценозы из *Betula pubescens*, *Betula czerepanovii*, в которые постепенно внедряется сосна, образуя к концу периода северотаежные сосново-березовые ценозы. Растительность все еще сохраняла связи с предыдущей, позднеледниковой, эпохой, что выразилось в существовании ерниково-зеленомошных и кустарничковых тундровых сообществ и полынно-маревых группировок, а также растений – индикаторов перигляциальных условий – *Ephedra*, *Hippophae rhamnoides*.

В это время в оз. Энгозеро отложения, представленные мелкозернистыми песками, переходящими в серые алевриты, накапливались в условиях морской седиментации; гиттия с примесью алеврита – в переходных условиях от морских к пресноводным. В морских отложениях обнаружена пыльца галофитов *Atriplex nudicalis*, *Salicornia herbacea*, *Plantago maritima*, а также пыльца, по своим морфологическим особенностям принадлежащая типу *Aster*, по экологии и по географическому распространению вероятнее всего продуцируемая *Tripolium vulgare*. Направленное нарастание кривой пыльцы древесных нарушается увеличением вклада пыльцы *Poaceae* и *Cyperaceae*. По всей вероятности, регрессия моря сопровождается появлением новых местообитаний с засоленными почвами, на которых обильно расселяются облигатные и факультативные виды из семейств *Poaceae* и *Cyperaceae*, образуя так называемые приморские луга. Такие изменения нашли отражение в СПС переходных слоев донных отложений из других озер Карельского берега Белого моря.

Диатомовый комплекс данных отложений характеризуется господством морских и солоноватоводных видов диатомей, главным образом мезогалобов и галофилов, составляющих более 90 % от общего состава флоры в морской фации и 65–20 % – в переходной. Снизу вверх снижается доля мезогалобов и возрастает роль галофилов, представленных *Opephora marina*, *Mastogloia grevillei*, *M. smithi* var. *lacustris*, *M. elliptica*, *M. pumilla*, *Thalassiosira* sp., *Diploneis* sp., *Navicula ammophila*, *N. palpebralis*, *N. bottnica*, *Epithemia sorex*, *Navicula rhyncocephala*, *N. hungarica*, *Nitzschia* sp., *Rhopalodia gibba* var. *ventricosa*, *Rhoicosphaenia curvata*. На Поморском берегу (оз. Левисгорское) в осадках этого времени диатомовая флора отсутствует, указывая на существование перигляциальных условий.

**Бореальный период** (ВО: 9300–8000 л. н.) начался при достаточно низких температурах и характеризовался ритмически направленным потеплением на фоне дефицита влажности. Падение базиса эрозии вследствие отступления моря вызвало снижение уровня грунтовых вод. Это способствовало распространению сосны, которая заняла все удобные для нее

местообитания: на сухих скальных обнажениях и песчаных почвах озовых гряд произрастали сосняки лишайниковые с участием плаунов (*Diphasiastrum complanatum*, *Lycopodium pungens*) в наземном покрове, сосняки кустарничниковые тяготели к склонам холмов и гряд. Леса были редкостойные, северотаежного облика, к концу бореального времени приобрели облик среднетаежных. В обоих озерах отложения представлены гиттией (в Энгозере с примесью алевроита). В водоеме Энгозеро появились гидрофиты: уруть колосистая (*Myriophyllum spicatum*), кубышка желтая (*Nuphar lutea*), полушник (*Isoetes*), а также колонии водорослей *Pediastrum*. На мелководье произрастали тростники (*Phragmites australis*), осоки (*Cyperaceae*), хвощи (*Equisetum*).

На Карельском берегу (Энгозеро) содержание солоноватоводных видов резко сокращается до 20 %, начинают господствовать пресноводные виды рода *Fragilaria*, *Fragilariforma*, *Cocconeis placentula* и др. Однако, вероятно, еще существуют меромиктические условия, чем объясняется наличие мезогалобов *Diploneis smithi*, *Diploneis smithi var. pumilla*, *Mastogloia elliptica*, *Mastogloia smithi* и галофилов *Cocconeis placentula*, *Cyclotella meneghiniana*, *Epithemia sorex*, *Navicula rhynchocephala*, *Navicula cryptocephala*, *Sellaphora pupula*, *Navicula radiosa*. Возраст отложений подтвержден радиоуглеродной датировкой  $9390 \pm 380$  (ЛУ 6647) [Колька и др., 2013, с. 590].

На Поморском берегу (Левисгорское) диатомовый комплекс в гиттии отличается господством пресноводных форм: практически равным соотношением планктонных, обрастаний и донных (около 30 %). Среди планктонных доминируют *Aulacoseira*, присутствуют *Cyclotella stelligera*. Виды обрастаний представлены *Fragilaria*, *Staurosira*, *Achnanthes*, единичными *Eunotia*, *Cocconeis*; среди донных главенствуют *Navicula*, *Pinnularia*, выявлены также единичные створки *Hantzschia*, *Neidium*, *Stauroneis*. Состав флоры свидетельствует о небольшой глубине пресноводного водоема. Единичные створки морской формы *Paralia sulcata* свидетельствуют о завершении процессов переотложения.

**Атлантический период** (АТ: 8000–4700 л. н.). Повышение влажности климата привело к распространению злаково-разнотравных березовых лесов и сосново-березовых лесов. В СПС появляется пыльца представителей неморального флористического комплекса (*Quercus robur*, *Ulmus laevis*, *U. scabra*, *Corylus avellana*), но из-за низкого количества и концентрации ее следует считать дальнезаносной, а учитывая транспортабельную способность такой пыльцы, можно предположить, что северные границы ареалов располагались достаточно близко от изучаемой территории. Наряду с составом спорово-пыльцевого комплекса это указывает на

более теплый климат по сравнению с предыдущей эпохой. Продолжающаяся миграция сосны привела к формированию березово-сосновых зеленомошных и крупнотравных лесов и монодоминантных сосняков. Около 7000 л. н. в уже существующие сообщества начинает внедряться ель, постепенно создавая и елово-сосновые леса, по облику близкие южно-таежным. Водная растительность, представленная рогозами, кубышкой, частухой, видами семейства осоковых, злаковых, лютиковых, свидетельствует о зарастании водоемов. В озерах накапливается гиттия.

Диатомовый комплекс отложений представлен планктонными, обрастателями и донными формами, с доминантами родов *Aulacoseira*, *Fragilaria*, *Tetracyclus*, *Cymbella*, *Cyclotella*, *Navicula*, *Pinnularia*, *Tabellaria*. Увеличивается содержание планктонных видов *Aulacoseira distans*, *A. italica*, возрастает роль *Tabellaria*, *Tetracyclus*, *Eunotia*, *Frustulia*, *Pinnularia*, что свидетельствует о заболачивании или подтоплении берегов и некотором повышении уровня водоема из-за увлажнения климата. Явным признаком потепления климата может служить появление крупных донных форм *Stauroneis phoenisenteron*, *Surirella biseriata*, эпифитов *Cymbella aspera*. Все это подтверждается радиоуглеродной датировкой  $6230 \pm 90$  [Колька и др., 2013, с. 590]. Сходные тенденции характерны и для оз. Левисгорского. Здесь также возрастает содержание планктонных форм родов *Aulacoseira*, *Cyclotella stelligera*, планктонно-литоральных *Tabellaria*, обрастателей *Cymbella*, *Eunotia*, *Fragilaria*, *Tabellaria flocculosa*, донных – *Frustulia rhomboides*, *Diploneis*, *Pinnularia*. Выявлены единичные створки среди донных *Amphora*, *Anomoeoneis*, *Navicula*, *Neidium*, *Stauroneis*, *Surirella*. Такой состав флоры указывает на некоторое обводнение водоема, увлажнение климата. Присутствие видов рода *Nitzschia* может являться признаком хорошо развитого почвенного покрова, сформировавшегося к АТ-периоду, что подтверждается радиоуглеродной датировкой  $7220 \pm 140$  (ЛУ-6903) [Лаврова и др., 2013, 2014; Lavrova et al., 2014; Колька и др., 2015].

**Суббореальный период** (SB: 4700–2500 л. н.). Резкое похолодание и уменьшение влажности климата в начале периода привело к сокращению термофильных пород, что нашло отражение в СПС всех изученных разрезов донных отложений Поморского и Карельского берегов. Суббореал является временем активного распространения ели. На изучаемой территории распространяются среднетаежные елово-сосново-кустарничково-зеленомошные леса, к концу периода приобретающие облик северотаежных. Береза входила в их состав, а также принимала участие в облесении болот. В озерах продолжается накопление гиттии. Основу диатомового комплекса в Энгозере составляют ацидофилы *Frustulia*, донные предста-

вители болотных экосистем – *Pinnularia* и *Eunotia*, *Tetracyclus*, *Fragilaria*, *Cymbella*, *Achnanthes*, единичны *Stauroneis*, *Surirella*, *Rhopalodia*. Доля планктонных *Aulacoseira* снижается и колеблется в пределах 8–16 %, планктонные *Cyclotella* единичны, с 2 до 6 % возрастает роль *Anomoeoneis*, в небольшом количестве (около 2 %) появляются виды рода *Gomphonema*. Состав диатомового комплекса этого этапа указывает на снижение уровня водоема. В оз. Левисгорском происходит незначительное снижение доли планктонных *Aulacoseira*, а среди *Cyclotella* выявлены только единичные створки. Немного увеличивается содержание обрастателей *Eunotia*, *Fragilaria*, указывая на активацию процессов зарастания и увеличение зоны мелководий, некоторое снижение уровня водоема. Среди донных форм по-прежнему преобладает *Frustulia*, остальные представители этого сообщества единичны. Такие изменения в составе комплекса могут быть связаны с похолоданием и сухостью климата.

**Субатлантический период** (SA: 2500 л. н. – настоящее время) характеризуется дальнейшим похолоданием климата. На территории исследования распространялись северотаежные сосновые и елово-сосновые кустарничково-зеленомошные и лишайниковые сообщества. Похолодание климата, а также возможное усиление антропогенного пресса привели к сокращению хвойных лесов и частичному замещению их мелколиственными ценозами. В озерах накапливались сапропели (гиттия). В составе диатомовых комплексов обоих озер отмечаются сходные тенденции в развитии флоры, а именно: увеличение доли планктонных форм и эпифитов – в Энгозере *Cyclotella* (до 10 %) и *Fragilaria* (с 2 до 67 %), *Cymbella*, *Eunotia*, незначительное участие донных *Amphora*, *Navicula*, *Pinnularia* (около 2 %). В Левисгорском увеличивается содержание видов рода *Aulacoseira*, появляются *Stephanodiscus*, ранее не отмеченные в осадках, снижается доля *Tabellaria fenestrata*. Кроме этого, возрастает участие обрастателей *Eunotia*, донных *Pinnularia*, с неизменным присутствием среди доминантов створок рода *Frustulia*. Все это свидетельствует о незначительном обводнении водоемов и увлажнении климата, характерном для субатлантического времени.

Таким образом, применение комплекса методов позволило с большей точностью и объективностью реконструировать изменения природной среды на Карельском и Поморском берегах Белого моря.

### Литература

Колька В. В., Корсакова О. П., Шелехова Т. С. и др. Перемещение береговой линии Белого моря и гляциоизостатическое поднятие суши в голоцене (район поселка Кузема, северная Карелия) // Доклады академии наук. 2012. Т. 442, № 2. С. 263–267.

*Колька В. В., Корсакова О. П., Шелехова Т. С. и др.* Перемещение береговой линии Белого моря и поднятие суши в голоцене (район поселка Энгозеро, северная Карелия) // Доклады академии наук. 2013. Т. 449, № 5. С. 587–592.

*Колька В. В., Корсакова О. П., Лаврова Н. Б.* Палеогеографические условия осадконакопления в малых озерных котловинах Поморского берега Белого моря // Тр. КарНЦ РАН. 2015. № 5. С. 70–85.

*Лаврова Н. Б., Колька В. В., Корсакова О. П.* Палинологическая характеристика донных отложений малых озер Поморского берега Белого моря (район пос. Сумпосад) и Сумозерской островной возвышенности // Геология и полезные ископаемые Карелии. Вып. 16. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2013. С. 122–131.

*Лаврова Н. Б., Колька В. В., Корсакова О. П.* Некоторые особенности спорово-пыльцевых спектров донных отложений малых озер Поморского берега Белого моря // Палинологическая школа-конференция с междунар. участием «Методы палинологических исследований». Москва, 16–19 апр. 2014 г. С. 27.

*Lavrova N., Kolka V., Korsakova O.* Palinological study of bottom sediment from ponds on the Pomor White sea coast // Paleolimnology of Northern Eurasia. Proceeding of the International conference (Petrozavodsk, 21–25 september, 2014) / Eds. D. Subetto, T. Regerand, A. Sidorova. Petrozavodsk: Karelian Research Centre RAS, 2014. P. 83.

*Shelekhova T. S., Kolka V. V., Korsakova O. P.* Post-glacial and Holocene evolution stages of the water bodies on the Pomor White sea coast, based on diatom analysis of bottom sediments (Sumsky Posad area, Karelia, Russia) // Ibid. P. 88–89.

## **PALEO GEOGRAPHIC CONDITIONS OF SEDIMENTATION ON THE WHITE SEA KARELIAN AND POMOR COASTS**

**T. S. Shelekhova, N. B. Lavrova**

*Institute of Geology, KarRC RAS*

The results of pollen and diatom analyses and radiocarbon dating of bottom sediments from small lakes are reported. One of the lakes is located on the Karelian coast of the White Sea and the other one on the Pomor coast. Vegetation dynamics from the Younger Dryas to present time was reconstructed. The paleoindicators of marine and marine-freshwater transition sedimentation conditions were identified. The characteristics of diatom complexes were revealed for each paleoclimatic period and various sediment facies. Sedimentation on the Karelian coast (Lake Engozero) began in a sea-basin environment, and its detachment took place in the Preboreal. Onega Bay was separated from the White Sea basin by a glacier front, and sedimentation in Lake Levisgorskoye (Sumsky Posad) began in a periglacial lake environment in the Younger Dryas.

## ИЗУЧЕННОСТЬ ПОЛИГОНАЛЬНЫХ ВОДОЕМОВ СЕВЕРА ЕВРАЗИИ, КАНАДЫ И АЛЯСКИ

**И. В. Ядрихинский, Л. А. Пестрякова, Р. М. Городничев**

*Северо-Восточный федеральный университет им. М. К. Аммосова*

Полигональные водоемы, учитывая их генезис и количество воды, которая содержится в полигонах, на территории Якутии практически остаются неизученными. Только за последние 10-летия в связи с изучением вопросов изменения климата наблюдается активное проявление интереса со стороны российских и зарубежных ученых. Исследование и освоение Арктических островов всегда было и остается сложным и дорогостоящим мероприятием. Новосибирские острова в этом отношении не являются исключением.

Крупный сектор российской Арктики, в котором располагаются Новосибирские острова, исследовался большей частью по периферии материка, островная же часть до недавнего времени была изучена лишь фрагментарно [Анисимов, 2010]. Масштабные экспедиции на начальном этапе изучения Новосибирских островов, охватывавшие большую часть островных площадей, проводились еще до появления многих из аналитических методов, широко применяемых в настоящее время, и поэтому результаты не всегда соответствовали уровню современной науки с ее требованиями к точности, детальности стратиграфических сопоставлений и палеогеографических реконструкций.

В советское время на архипелаге была организована сеть гидрометеорологических станций. Изучением природы Новосибирских островов занимался Арктический научно-исследовательский институт (ныне Арктический и антарктический научно-исследовательский институт). Проведенные работы большей частью носили описательный характер.

Относительно изученным направлением можно считать палеолимнологию. Началом палеогеографических исследований позднего плейстоцена и голоцена региона с использованием спорово-пыльцевого метода и радиоуглеродного датирования были материалы, собранные на о. Котельном [Макеев и др., 1989]. Диатомовый анализ колонок лагунных отложений проводился во ВНИИОкеанологии З. В. Пушиной [Анисимов, 2010]. Палеолимнологические исследования проводятся и в настоящее время.

Исследуются озера Северной Америки, при этом проводится анализ и сопоставление материалов, полученных по единой методике для палеогеографических реконструкций для всего Американского континента [Markgraph et al., 2000]. Европейские палеолимнологические исследования имеют древние традиции. Созданы крупные центры, где ведутся

работы по изучению донных отложений озер, – это Центр палеолимнологических исследований в Англии, Лундский университет, Институт полярных и морских исследований им. А. Вегенера в Германии, исследовательские центры в Бёрне, Стокгольме, Упсале, Хельсинки и ряд других.

Мониторинг различных динамических параметров полигональных водоемов на территории Северо-Востока Якутии проводится на о. Самойловском (дельта р. Лены). Работы выполнялись в рамках программы «Система моря Лаптевых», проекта «Научная станция Самойловский» и грантов немецкого Научно-Исследовательского Общества (DFG) в летние сезоны 2008–2010 гг. и при поддержке гранта российско-германской лаборатории полярных и морских исследований им. Отто Шмидта (ОШЛГУ ААНИИ).

**Исследование химического состава природных вод района исследований.** Первой крупной пионерной работой по исследованию химического состава поверхностных природных вод по праву можно считать диссертационную работу В. П. Волковой «Особенности формирования химического состава природных вод и льдов в условиях сплошного распространения низкотемпературных мёрзлых толщ (на примере мерзлотно-гидрогеологических структур Яно-Индибирского междуречья)». Автор приводит результаты гидрохимического анализа 4623 проб воды различного вида. На спектральный полуколичественный химический анализ были взяты 1734 пробы поверхностных природных вод, 330 подземных льдов (повторно-жильные льды), 115 наледных и 15 озерных льдов [Волкова, 1978]. Помимо этого В. П. Волкова выполнила химический анализ состава атмосферных осадков, как одного из основных факторов формирования химического состава поверхностных вод. Результаты показали, что степень минерализации атмосферных вод колеблется в широких пределах – от 0,009 до 0,064 г/л. Такой широкий диапазон автор объясняет зависимостью от площади и времени выпадения осадков. По химической классификации О. А. Алекина атмосферные воды В. П. Волкова определяет как хлоридно-гидрокарбонатные (реже натриево-кальциевые). Химический состав поверхностных природных вод также определялся для объектов, расположенных на левом берегу р. Берелёх (бассейн р. Индибирки). Воды этого района характеризуются как ультрапресные (0,01–0,03 г/л). Поверхностные и надмерзлотные воды сезонно-талого слоя отнесены к гидрокарбонатному классу со смешанным катионным составом.

Современные исследования об особенностях формирования химического состава вод озер и полигональных водоемов Якутии ведутся в рамках российско-германских проектов и программ. Одной из последних работ, посвященных гидрохимическому составу вод полигональных водоемов, является работа А. А. Четверовой, И. В. Федоровой, Т. М. Потаповой,

Ю. Бойке «Гидрологические и геохимические особенности современного состояния озер о. Самойловский в дельте р. Лены» [2013]. В ней показаны гидрохимические особенности полигонально-термокарстовых водоемов. Результаты лабораторных исследований свидетельствуют о различиях химического состава между разными генетическими типами водных объектов. Полигональные водоемы от более крупных водных объектов отличаются низким содержанием кремния, что объясняется меньшей интенсивностью термокарстовых процессов и поступления кремния из водосборного бассейна.

Комплексные палеолимнологические исследования озер Севера Якутии в рамках международного российско-германского сотрудничества между Северо-Восточным федеральным университетом им. М. К. Аммосова и Институтом полярных и морских исследований им. Альфреда Вегенера с участием РГПУ им. А. И. Герцена, МГУ им. М. В. Ломоносова, КФУ начаты в 2007 г. Донные отложения полигональных водоемов достаточно подробно изучены S. Wetterich, L. Schirmermeister, M. Meuer и др.

В работе Р. М. Городничева «Взаимосвязь состава диатомовых комплексов, морфометрических и гидрохимических характеристик озерных экосистем Якутии» (дис. 2015 г.) рассматриваются морфометрические (длина, ширина максимальная, ширина средняя, максимальная глубина, длина береговой линии, показатель удлинённости, развитие береговой линии, площадь водного зеркала, приблизительный объем) и физико-химические (прозрачность, pH, жесткость общая, минерализация, концентрации ионов кальция, магния, натрия и калия, анионов гидрокарбонатов, сульфатов, хлоридов, железа общего, кремния, аммония и фосфатов) параметры. По морфометрическим параметрам автор характеризует озёрки и очень маленькие водоемы как водоемы с малой глубиной и формой зеркала, близкой к округлой. Воды водных объектов обладают умеренной прозрачностью, по химическому составу относятся к хлоридно-гидрокарбонатному натриево-магниевому-кальциевому классу, ультрапресным, очень мягким, с нейтральным pH. В более чем половине водоемов зафиксировано превышение ПДК<sub>в.р.</sub>, растворенных в воде фосфатов и общего железа.

Особенности формирования химического состава воды и их зависимость от климатических факторов, биота, концентрации растворенных органических веществ, углекислого газа, метана, взвешенных твердых частиц в воде мелководных полигональных водоемов исследовались иностранными специалистами на севере Якутии, Канады и Аляски [Wetterich et al., 2011; Schirmermeister et al., 2012, 2016; Raynolds et al., 2014].

## Литература

*Анисимов М. А.* Развитие природной среды Новосибирских островов в голоцене: Дис. ... канд. геогр. наук. СПб., 2010. 115 с.

*Волкова В. П.* Особенности формирования химического состава природных вод и льдов в условиях сплошного распространения низкотемпературных мерзлых толщ (на примере мерзлотно-гидрогеологических структур Яно-Индигирского междуречья): Дис. ... канд. геол.-минер. наук. М., 1978.

*Четверова А. А., Федорова И. В., Потапова Т. М., Бойке Ю.* Гидрологические и геохимические особенности современного состояния озер о. Самойловский в дельте р. Лены // Проблемы Арктики и Антарктики. 2013. № 1 (95). С. 97–110.

*Raynolds M. K., Walker D. A., Ambrosius K. J. et al.* Cumulative geocological effects of 62 years of infrastructure and climate change in ice-rich permafrost landscapes, Prudhoe Bay Oilfield, Alaska // Landscape and permafrost changes in the Prudhoe Bay Oilfield, Alaska. Alaska Geobotany center Publication aGc14-01, 2014. 84 p.

*Schirrmeister L., Pestryakova L., Wetterich S., Tumskoy V.* (eds.). Joint Russian-German Polygon Project East Siberia 2011–2014: The expedition Kytalyk 2011. Reports on Polar and Marine Research 653. 2012. 153 p.

*Schirrmeister L., Pestryakova L., Schneider A., Wetterich S.* Studies of polygons in Siberia and Svalbard. Reports on Polar and Marine Research 697. 2016. 275 p.

*Wetterich S., Schirrmeister L., Kholodov A.* The joint Russian-German expedition BERINGIA/KOLYMA 2008 during the International Polar Year (IPY) 2007/2008. Berichte zur Polar- und Meeresforschung (Reports on Polar and Marine Research), Bremerhaven, Alfred Wegener Institute for Polar and Marine Research, 636. 2011. 48 p.

## CURRENT STATE OF KNOWLEDGE ON POLYGONAL WATER BODIES OF NORTHERN EURASIA, CANADA AND ALASKA

**I. V. Yadrinhinskiy, L. A. Pestryakova, R. M. Gorodnichev**

*M. K. Ammosov North-Eastern Federal University, Yakutsk*

Polygon ponds, considering their genesis and the amount of water contained in the polygons in the territory of Yakutia, Canada and Alaska, remain practically unstudied. Only in the last 10 years in connection with the study of climate change there is strong interest from Russian and foreign scientists. The research and exploration of the Arctic Islands has always been and remains difficult and costly. New Siberian Islands in this respect are no exception.

Научное издание

**ОЗЕРА ЕВРАЗИИ:  
ПРОБЛЕМЫ И ПУТИ ИХ РЕШЕНИЯ**

МАТЕРИАЛЫ  
1-й МЕЖДУНАРОДНОЙ КОНФЕРЕНЦИИ  
(11–15 сентября 2017 г.)

*Печатается по решению Ученого совета  
Института водных проблем Севера  
Карельского научного центра РАН*

Редактор *Л. В. Кабанова*  
Оригинал-макет *Т. Н. Люрина*  
Работа с английским текстом *О. С. Кислова*  
Фотографии на обложке *И. Ю. Георгиевского*  
Обложка *М. С. Богданова*

Подписано в печать 30.06.2017.  
Формат 60x84 <sup>1</sup>/<sub>16</sub>. Гарнитура Times.  
Уч.-изд. л. 35,0. Усл. печ. л. 37,7.  
Тираж 300 экз. Заказ № 443

Карельский научный центр  
Редакционно-издательский отдел  
185003, г. Петрозаводск, пр. А. Невского, 50