

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК
Институт озероведения



ЛАДОГА



Публикация осуществлена на средства гранта
Всероссийской общественной организации
«Русское географическое общество»

Санкт-Петербург
2013

Под редакцией
Академика РАН, проф. В.А.Румянцева
д-ра физ.-мат. наук С.А.Кондратьева

Рецензент д-р биол. наук, проф. В.Г.Драбкова

Ладога

Настоящая монография, обобщающая материалы многолетнего комплексного изучения Ладожского озера специалистами Института озераедения РАН и других научных организаций, состоит из девяти глав. Первая глава посвящена вопросам истории возникновения и развития Ладожского озера. Излагается общая концепция происхождения озерной котловины, раскрывающая палеолимнологические и геологические аспекты этого процесса. Во второй главе представлена физико-географическая характеристика водосборного бассейна. Дается описание характеристик подстилающей поверхности, рельефа и почвенного покрова. Описание гидрологического режима водосбора является основой для последующей оценки водного баланса Ладожского озера. Представлены результаты количественной оценки природной и антропогенной составляющих нагрузки на озеро и его водосбор. Здесь же представлены особенности и закономерности формирования климатических характеристик на водосборной территории озера. Третья глава посвящена детальному описанию физико-географических характеристик Ладожского озера. Представлена карта глубин, анализируются особенности подводного рельефа. Значительное внимание уделено распределению нано-масштабной фракции частиц донных отложений по площади акватории. Здесь же дается описание береговой линии и основных островов. Гидрологические характеристики озера подробно представлены в четвертой главе, включающей разделы с результатами изучения водного баланса и колебаний уровня, особенностей формирования течений и волнения, термического и ледового режимов, а также прозрачности и цветности водных масс. В пятой главе дается описание гидрохимических характеристик Ладожского озера. Представлена динамика и пространственное распределение по акватории следующих показателей: содержания кислорода и значений рН, концентраций биогенных элементов, органического вещества и взвесей, металлов, нефтяных углеводородов и фенолов. Анализируются общая минерализация воды, ее ионный состав и электропроводность. Результаты гидробиологических исследований Ладожского озера содержатся в шестой главе. Представлены результаты анализа динамики и пространственного распределения характеристик следующих гидробиологических сообществ: высшей водной растительности, перифитона, фитопланктона, бактериопланктона, зоопланктона, зообентоса, а также рыбного населения. Уделено значительное внимание появлению и развитию в озерной экосистеме гидробионтов-вселенцев. Седьмая глава посвящена оценке качества воды в Ладожском озере и его экологического состояния по гидрохимическим и гидробиологическим показателям. В восьмой главе представлены результаты исследования трансформации экосистемы Ладожского озера методами математического моделирования. Показано, что снижение антропогенной нагрузки не является универсальным средством возвращения озера в естественное состояние или по крайней мере предотвращения его дальнейшей деградации. В девятой главе дается оценка природно-ресурсного потенциала озера и водопользования, представлены перспективы использования озера как источника водных, биологических, рыбных, а также рекреационных ресурсов. Уделено внимание состоянию и развитию судоходства в акватории озера.

В заключении приводится оценка перспектив развития Ладожского озера, а также будущих научных исследований этого исключительно важного и интересного объекта природной среды

северо-запада России. Обосновывается необходимость принятия специального Федерального закона «Об охране Ладожского озера», который не позволит поставить экосистему озера под угрозу полной деградации. Закон должен заполнить существующие в природоохранном законодательстве лакуны и определить порядок использования источников централизованного питьевого водоснабжения, а также ориентировать расположенные на водосборе Ладоге субъекты РФ на проведение скоординированной политики в вопросах охраны озера и его водосбора.

Ladoga

This monograph, generalizing the materials of the multi-year integrated study of the Lake Ladoga specialists of the Institute of Limnology RAS and other scientific organizations consists of nine chapters. The first Chapter devoted to the history of emergence and development of the Lake Ladoga. Describes the overall concept of the origin of lake basin including palaeolimnological and geological aspects. In the second Chapter presents the physical-geographical characteristics of the drainage basin. A description of the characteristics of the underlying surface and a relief and soil cover. The description of the hydrological regime of the basin is the basis for the subsequent assessment of the water balance of Lake Ladoga. Presented are the results of the quantitative assessment of natural and anthropogenic components of the load to the lake and its catchment. Here are the peculiarities and regularities of the formation of the climatic characteristics of the catchment area of the lake. The third Chapter is devoted to a detailed description of the physical-geographical characteristics of the Lake Ladoga. Is a map of depths and analyzes the characteristics of underwater terrain. Considerable attention is paid to the distribution of nano-scale fraction of the particles of the bottom sediments in the area of water area. Here is a description of the coastline and the main Islands. The hydrological characteristics of the lake are presented in detail in the fourth Chapter, including chapters with the results of the study of water balance and level fluctuations, features of formation of currents and waves, thermal and ice regimes, as well as the transparency and color of the water masses. In the fifth Chapter provides a description of the hydrochemical characteristics of the Lake Ladoga. Shows the dynamics and spatial distribution in the water area of the following indicators: the contents of oxygen and pH, concentrations of nutrients, organic matter and suspended solids, metals, petroleum hydrocarbons and phenols. Analyzes the total mineralization of the water, the ion composition and conductivity. The results of hydrobiological research of Lake Ladoga are contained in the sixth Chapter. Presents the results of the analysis of the dynamics and spatial distribution of the characteristics of the following hydrobiological communities: the higher aquatic vegetation, periphyton and phytoplankton, bacterioplankton, zooplankton, zoobenthos, as well as the fish population. Given considerable attention to the appearance and development in the lake ecosystem hydrobionts alien species. The seventh section is devoted to the evaluation of the quality of water in Lake Ladoga and its ecological status by hydrochemical and hydrobiological indicators. In the eighth Chapter presents the results of investigation of transformation of the ecosystem of Lake Ladoga methods of mathematical modeling. It is shown that the reduction of the anthropogenic load is not a universal means of the return of the lake in the natural state or, at least, to prevent its further degradation. In the ninth Chapter provides an assessment of natural-resource potential of the lake and water use, are presented prospects of use of the lake as a source of water, biological, fish, and recreational resources. Attention is paid to the state and development of navigation in the water area of the lake.

In conclusion, the estimation of prospects of development of Lake Ladoga, as well as on future research this very important and interesting object of the natural environment of the North-West of Russia. The necessity of the adoption of the special Federal law «On protection of Lake Ladoga», which does not allow to put the ecosystem of the lake under the threat of complete degradation. The law should close the existing environmental legislation flaws in relation to the sources of centralized drinking water supply, as well as to lead the regions located within the catchment area of Lake Ladoga on conducting coordinated policy in questions of protection of the lake and its catchment.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	
Глава 1 История возникновения и развития Ладожского озера	
1.1 Позднеплейстоценовая и голоценовая история озера (<i>Л.А. Кудерский, Т.В. Сапелко, Д.А. Субетто</i>).....	
1.2 Формирование фауны озера (<i>Л.А. Кудерский</i>).....	
Глава 2 Водосбор Ладожского озера	
2.1 Характеристики подстилающей поверхности (<i>С.А. Кондратьев, Г.А. Алябина, И.Н. Сорокин</i>).....	
2.1.1 Рельеф	
2.1.2 Почвенный покров и растительность	
2.2 Гидрографическая сеть и гидрология (<i>Т.П. Гронская, С.А. Кондратьев</i>)...	
2.2.1 Реки	
2.2.2 Озера	
2.2.3 Оценка стока воды на основе гидрологической модели	
2.3 Формирование нагрузки на водосбор и озеро (<i>С.А. Кондратьев, Г.Ф. Расплетина, Е.Г. Маркова</i>).....	
2.3.1 Внешняя нагрузка на озеро по данным наблюдений	
2.3.2 Точечные источники антропогенной нагрузки	
2.3.3 Рассредоточенная нагрузка	
2.3.4 Природная и антропогенная составляющие нагрузки	
2.3.5 Критическая нагрузка	
2.4 Климат водосбора Ладожского озера (<i>Г.В. Менжулин</i>).....	
2.4.1 Климатический режим водосбора по данным реанализа	
2.4.2 Изменения климатического режима и его современное состояние .	
Глава 3 Физико-географическая характеристика озера	
3.1 Глубины и подводный рельеф (<i>М.А. Науменко, В.А. Гузиватый, С.Г. Каретников</i>)	
3.2 Донные отложения (<i>Д.А. Субетто, Ш.Р. Поздняков, А.Е. Рыбалко</i>).....	
3.3 Береговая зона Ладожского озера (<i>А.П. Алхименко, В.Н. Рыбакин</i>).....	
Глава 4 Гидрология	
4.1 Схема мониторинга Ладожского озера (<i>М.А. Науменко, В.А. Гузиватый, С.Г. Каретников</i>)	
4.2 Водный баланс и многолетние колебания уровня ладожского озера (<i>А.М. Догановский, Н.В. Мякишева (РГГМУ), М.А. Науменко</i>).....	
4.2.1 Введение	
4.2.2 Водный баланс озера	
4.2.3 Особенности многолетних колебаний уровня озер	
4.2.4 Особенности колебаний климатических характеристик	
4.3 Динамика вод Ладожского озера (<i>М.А. Науменко</i>).....	
4.4 Термический режим Ладожского озера (<i>М.А. Науменко, В.А. Гузиватый, С.Г. Каретников</i>).....	
4.4.1 Среднегодовой ход температуры и теплосодержания Ладожского озера	
4.4.2 Весенняя термическая фронтальная зона	

	4.4.3	Прибрежные апвеллинги
	4.5	Ледовый режим (С.Г. Каретников, М.А. Науменко).....
	4.6	Пространственное распределение и многолетние тренды прозрачности воды Ладожского озера (М.А. Науменко).....
	4.7	Распространение вод притоков на акватории озера (А.М. Крючков).....
Глава 5		Гидрохимия
	5.1	Общая минерализация и ионный состав воды (О.М. Сусарева)
	5.2	Кислород и значение рН (О.М. Сусарева).....
	5.2.1	Кислород
	5.2.2	Водородный показатель (рН)
	5.3	Биогенные элементы (Т.Н. Петрова).....
	5.3.1	Соединения фосфора
	5.3.2	Соединения азота
	5.3.3	Минеральный растворенный кремний
	5.4	Органическое вещество (Т.Н. Петрова).....
	5.4.1	Органическое вещество в воде притоков Ладожского озера
	5.4.2	Система органического углерода воды Ладожского озера
	5.5	Взвешенные вещества (Т.Н. Петрова, Ш.Р. Поздняков)
	5.6	Металлы (О.М. Сусарева, Т.Н. Петрова)
	5.7	Нефтяные углеводороды (В.А. Щербак)
	5.7.1	Нефтяные углеводороды в воде притоков озера
	5.7.2	Нефтяные углеводороды в воде Ладожского озера
	5.8	Фенолы (В.А. Щербак)
	5.8.1	Поступление фенолов с речным стоком
	5.8.2	Фенолы в воде Ладожского озера
Глава 6		Гидробиология
	6.1	Высшая водная растительность
	6.1.1	Видовое и ценотическое разнообразие высших водных и прибрежно-водных растений в литоральной зоне Ладожского озера (И.М. Распопов).....
	6.1.2	Пространственная структура сообщества макрофитов Ладожского озера и факторы, ее регулирующие (А.Г. Русанов).....
	6.2	Перифитон
	6.2.1	Структура и функционирование перифитона в притоках Ладожского озера (Е.В. Станиславская)
	6.2.2	Структура и функционирование перифитона в литорали Ладожского озера (М.А. Рычкова)
	6.3	Фитопланктон
	6.3.1	Фитопланктон притоков Ладожского озера (И.С. Трифонова, О.А. Павлова, А.Л. Афанасьева)
	6.3.2	Фитопланктон Ладожского озера (Г.И. Летанская, Е.В. Протопопова)
	6.4	Бактериопланктон
	6.4.1	Бактериопланктон притоков Ладожского озера (Е.Н. Чеботарев) ..
	6.4.2	Бактериопланктон Ладожского озера (Л.Л. Капустина).....
	6.5	Зоопланктон (Н.В. Родионова)
	6.6	Зообентос
	6.6.1	Макрозообентос притоков Ладожского озера (В.П. Беляков)
	6.6.2	Бентос озера (Е.А. Курашов, М.А. Барбашова, Д.С. Дудакова)
	6.6.6.1	Макробентос
	6.6.6.1	Мейобентос
	6.7	Виды-вселенцы в экосистеме озера (Е.А. Курашов, М.А. Барбашова,

Д.В. Барков, Д.С. Дудакова, Л.А. Кудерский, А.Г. Русанов).....

Глава 7	Оценка экологического состояния Ладожского озера и качества его вод
7.1	Оценка экологического состояния озера и качества его вод по гидрохимическим показателям (<i>Т.Н. Петрова, О.М. Сусарева, В.А. Щербак</i>)
7.2	Оценка экологического состояния озера и качества его вод по гидробиологическим показателям.....
7.2.1	Оценка трофического статуса Ладожского озера (<i>Г.И. Летанская, А.Г. Русанов</i>)
7.2.2	Качество воды Ладожского озера по микробиологическим показателям (<i>Л.Л. Капустина</i>)
7.2.3	Индикация экологического состояния Ладожского озера по зоопланктону (<i>И.Н. Андроникова</i>)
7.2.4	Макробентос как индикатор состояния озера (<i>М.А. Барбашова</i>) ...
7.2.5	Мейобентос как индикатор состояния озера (<i>Е.А. Курашов, Д.С. Дудакова</i>)
Глава 8	Исследование трансформации Ладожского озера методами математического моделирования (<i>Л.А. Руховец, Г.П. Астраханцев, В.В. Менишуткин, Т.Р. Минина, Н.А. Петрова, В.Н. Полосков</i>)
8.1	Воспроизведение круглогодичной циркуляции Ладожского озера
8.2	Оценка возможных изменений гидротермодинамического режима Ладожского озера вследствие глобального потепления
8.3	Воспроизведение функционирования экосистемы Ладожского озера
8.4	Результаты исследований Ладожского озера методами математического моделирования.
Глава 9	Природно-ресурсный потенциал и водопользование
9.1	Озеро как источник водных ресурсов (<i>С.А. Кондратьев, Ш.Р. Поздняков</i>)
9.2	Биоресурсы и рыболовство (<i>Л.А. Кудерский</i>)
9.3	Судоходство (<i>А.П. Алхименко, В.Н. Рыбакин</i>)
9.4	Рекреационные ресурсы (<i>А.П. Алхименко, В.Н. Рыбакин</i>)
Заклучение
Литература

Введение

Решением Президиума АН СССР от 31 августа 1944 г. в г. Ленинграде была образована Лаборатория озераведения, преобразованная впоследствии в Институт озераведения. В настоящее время Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт озераведения Российской академии наук (ИНОЗ РАН) является ведущим научным учреждением России в области лимнологии. Объектами исследований являются озера, водохранилища, эстуарии и озерно-речные системы. Работы Института направлены на создание теоретических и прикладных основ лимнологии, методов комплексного изучения функционирования озерных экосистем под воздействием природных и антропогенных факторов, восстановления озер и водохранилищ, их использования для целей питьевого водоснабжения, рыболовства и рекреации. В Институте успешно развиваются методы математического моделирования для прогностических оценок влияния антропогенных факторов, глобальных и региональных климатических изменений на водный режим озер, для описания процессов, осуществляющих связь озер и их водосборных территорий. Для выполнения экспериментальных работ по изучению Ладожского озера ежегодно организуются серии экспедиционных выездов на специально оборудованном судне Института озераведения «Галан» в исследуемые районы Ладожского озера в различные периоды гидрологического года с последующей обработкой, анализом и обобщением полученных материалов. Периоды проведения экспедиционных исследований выбираются в соответствии с характерными периодами качественных изменений в гидродинамическом, гидрофизическом, гидрохимическом и гидробиологическом режимах озера. Кроме того, выполняются экспедиционные исследования водосбора Ладожского озера, его притоков и водоемов, входящих в состав гидрографической сети озера.

В связи с грядущим семидесятилетним юбилеем института на заседании Ученого совета Института было принято решение о подготовке и публикации монографии, содержащей результаты многолетних комплексных исследований Ладожского озера, на протяжении многих десятилетий являющегося основным объектом изучения Института.

По геологическим меркам Ладога очень молодое озеро, а река Нева (фактически — протока из Ладоги в Финский залив) еще моложе — около 3,5 тыс. лет. Однако за это время из Ладоги через Неву прошел объем воды, равный двенадцати Байкалам — в

полтора раза больше, чем тогда же из Байкала вытекло в Северный Ледовитый океан через Ангару. Таким образом, по активным водным ресурсам Ладожское озеро не только не уступает Байкалу, но и значительно превосходит его. Что же касается уникального природно-исторического потенциала Ладоги и ее социально-экономической значимости, то здесь преимущества Ладоги еще заметнее.

Прежде всего, Ладожское озеро — крупнейшее в Европе — является безальтернативным источником водоснабжения Санкт-Петербурга, многих городов Ленинградской области (Приозерска, Волхова, Новой Ладоги, Сясьстрога и др.) и Республики Карелия (Питкяранты, Импилахти, Сортавалы и др.). Надо также иметь в виду, что уже сегодня многие регионы России испытывают острый дефицит пресной воды, который будет только усиливаться. Не исключено, что в отдельные наиболее засушливые годы ладожская вода может потребоваться для удовлетворения запросов питьевого водоснабжения некоторых наиболее нуждающихся в воде регионов. Воды Ладоги практически полностью определяют сток реки Невы, что оказывает существенное воздействие на состояние омывающего побережья трех стран Финского залива и формирование вод Балтийского моря. Ладожское озеро играет ключевую роль в экономике Европейской части страны в целом не только как крупнейший источник водных ресурсов, но и как важное звено исторической водной транспортной магистрали, связывающей Северо-Запад с центральными и южными регионами России и обеспечивающей выход на зарубежные рынки через Финский залив и Балтийское море. Водосбор Ладожского озера характеризуется высоким уровнем хозяйственного освоения. Концентрация производственной деятельности здесь гораздо выше общероссийских показателей.

Район Ладожского озера и Приладожья обладает богатой историей, являясь колыбелью нашей государственности (которой недавно исполнилось 1150 лет), оплотом русского православия, важным воднотранспортным узлом, древним оборонительным поясом страны, прикрывавшим ее от многочисленных недругов с севера и запада. Именно вдоль берегов Ладожского озера и реке Волхов проходила северная часть знаменитого пути из «варяг в греки». От многовековой деятельности населения этих мест сохранились сотни и тысячи памятников истории и культуры русского и других народов: крепостей, монастырей, скитов, других архитектурных сооружений, произведений скульптуры. Регион обладает неоценимым рекреационно-туристическим потенциалом, использование которого находится в зачаточном состоянии.

Неслучайно Петр I выбрал для новой столицы России место рядом с Ладогой. Первое, что необходимо для города, это — вода. Полноводная Нева, сток которой мало

меняется в течение года, уже в течение трех веков обеспечивает ладожской водой население и промышленность огромного города и его окрестностей. Нева и Ладога являются неотъемлемой частью важнейших внутренних и внешних судоходных систем, связывающих Санкт-Петербург со всем миром. Как показала прошедшая Великая Отечественная Война, наличие большого озера в непосредственной близости от города не позволяет осуществить его полную блокаду.

Поразительно богаты и разнообразны биологические ресурсы озера. Особенно славится Ладога своими рыбными запасами, включающими такие ценные виды рыб, как ладожский лосось, сиг (несколько подвигов), паляя, ряпушка, хариус. При этом основу уловов составляет не так много массовых видов: корюшка, судак, лещ, сиг, ряпушка, окунь и плотва.

Важен тот факт, что участки литоральной зоны Ладожского озера и водоемы вокруг него используются для гнездования многими видами птиц (более 250) и служат также стоянками птиц на беломоро-балтийском пролетном пути. Разнообразна фауна прибрежных территорий: 58 видов млекопитающих, 5 видов амфибий и 5 видов рептилий. Особое своеобразие придает Ладожскому озеру обитание в нем единственного представителя ластоногих – ладожского подвида кольчатой нерпы (*Phoca hispida ladogensis* Nordq.).

Состояние озера и окружающей среды вокруг Ладоги является ключевым фактором, влияющим на вектор развития и качество жизни нескольких миллионов человек, проживающих на территории около 260 тыс. км², представляющей собой водосборный бассейн озера, расположенный на большей части северо-запада России и восточной Финляндии. В течение нескольких десятилетий прошлого века из-за несовершенства и несоблюдения природоохранного законодательства промышленными, сельскохозяйственными и жилищно-коммунальными предприятиями, судоходными, рыболовецкими и туристическими компаниями, а также иными организациями состоянию экосистемы Ладожского озера был нанесен значительный ущерб. К концу 60-х гг. в Ладоге появились признаки начавшихся негативных изменений, вызванные развитием хозяйственной деятельности в бассейне без принятия расположенными на водосборе субъектами РФ необходимых скоординированных природоохранных мер. Период с начала 1970-х и до конца 1980-х гг. были фактически временем экологической катастрофы.

За два десятилетия Ладога совершила стремительный скачок из олиготрофного состояния в мезотрофное, отдельные районы приобрели черты эвтрофных водоемов. Иными словами, увеличившееся поступление в озеро питательных веществ, прежде всего соединений фосфора и азота, стимулировало массовое развитие водорослей

фитопланктона (примерно в 4–5 раз), макрофитов и обрастаний. «Цветения воды», обусловленные интенсивным развитием цианобактерий (сине-зеленых водорослей), которые были характерны для Ладоги и в олиготрофный период, с развитием антропогенного эвтрофирования стали более частым явлением. Прозрачность воды, составлявшая ранее в открытых участках озера 8–10 м, снизилась в среднем до 3 м.

Процесс эвтрофирования сопровождался изменением ряда физико-химических характеристик воды, в частности периодическим снижением концентрации растворенного кислорода в гипolimнионе. В местах, находящихся под непосредственным влиянием сточных вод, стали образовываться «мертвые зоны», где беспозвоночные бентоса отсутствовали. К таким зонам примыкали обширные полисапробные районы, в которых типичные представители ладожской фауны не встречались. Из-за загрязнения Ладожского озера тяжелыми металлами, нефтепродуктами и различными другими органическими соединениями, в том числе токсичными, у ряда гидробионтов в бентосе и планктоне были выявлены характерные морфологические деформации, а у рыб отмечен высокий процесс токсикозов: в Волховской губе у 70–80%, в Свирской губе у 50–60%, в устье реки Видлица у 60% исследованных рыб.

По инициативе Института озероведения в 1986 г. была приостановлена деятельность Приозерского ЦБК, сбрасывающего сточные воды в озеро. В результате гидроэкологическая ситуация в водоеме существенно улучшилась. Последующий экономический спад и соответствующее снижение антропогенной нагрузки на озеро также способствовали постепенному улучшению его состояния. Тем не менее, эвтрофирование Ладожского озера по-прежнему является реальной угрозой для экологической обстановки на северо-западе России.

Основные положения государственной стратегии РФ по охране окружающей среды и обеспечению устойчивого развития, утвержденные Указом Президента РФ от 4 февраля 1994 г. № 236, предусматривают как одно из основных направлений работы сохранение природных комплексов Онежского и Ладожского озер. Тем не менее, научно обоснованная и официально утвержденная на государственном уровне стратегия рационального использования водных ресурсов этой крупнейшей пресноводной системы в настоящее время отсутствует.

Глава 1. История возникновения и развития Ладожского озера

1.1. Позднеплейстоценовая и голоценовая история озера

В плейстоценовый период четвертичной системы, несмотря на его кратковременность (800–10 тыс. лет назад), занятая в настоящее время Ладожским озером и его частным водосбором территория многократно подвергалась существенным преобразованиям, важнейшими причинами которых были оледенения (окское, днепровское, московское, валдайское), перемежавшиеся межледниковьями (лихвинское, одинцовское, микулинское) (Стратиграфия СССР..., 1982). В геологической летописи достаточно полно отражены валдайское оледенение и послевалдайское время. Следы предшествовавших событий сохранились в ограниченных объемах, так как формировавшиеся в течение каждого из них отложения в значительной степени уничтожались в ходе экзарационных и эрозионных процессов, происходивших при развитии очередных покровных ледников. В связи с этим детальное восстановление палеогеографической обстановки рассматриваемой территории в периоды, предшествовавшие валдайскому оледенению, остается пока проблематичным. Тем не менее, наличие озерных и озерно-аллювиальных отложений отмечается уже для межледниковий раннего плейстоцена (800–400 тыс. лет назад), а также для лихвинского и одинцовского межледниковий среднего плейстоцена (380–240 и 180–130 тыс. лет назад). При этом известно, что озеро, существовавшее в одинцовском межледниковье, было обширным и покрывало значительные площади в области контакта Балтийского щита и Русской платформы (Бискэ, 1978).

Межледниковые озера раннего и среднего плейстоцена, размещавшиеся на месте современной Ладоги и ее частного водосбора, лишь условно могут рассматриваться как ее древние предшественники. Дело в том, что нет геологических свидетельств преемственности между ними и Ладогой, так как эти межледниковые озера исчезали при последующем развитии покровных оледенений.

Более полная информация имеется по истории территории и водных объектов последнего (микулинского) межледниковья верхнего плейстоцена, предшествовавшего последнему (валдайскому) оледенению. Межледниковье пришлось на период 130–110 тыс. лет назад и включало ряд теплых и холодных этапов (Стратиграфия СССР...,

1982). В отдельные этапы климатические условия были теплее современных (Былинский, 1989). Палеогеографическая обстановка в течение этого времени была неоднозначной. На протяжении части межледниковья ладожская котловина входила в состав морского бассейна, известного на Западе как Эемское море и тянувшегося через котловину Онежского озера к Белому морю (бореальная трансгрессия) и далее на восток (Гричук, 1965). Море имело большие глубины, достигавшие на участках современной Ладоги 120–150 м (Бискэ, 1978). Предположительно к этой же морской трансгрессии относятся мгинские отложения, вскрытые в южной части ладожского бассейна (Апухтин, Краснов, 1967; Краснов и др., 1995).

На части современного ладожского водосбора в период микулинского межледниковья существовали разнотипные малые озера (Карельский перешеек, восточное побережье Ладоги, бассейн реки Свирь), осадки которых представлены озерными, озерно-аллювиальными, озерно-болотными отложениями (Усикова и др., 1970; Плешивцева и др., 1998).

Микулинское межледниковье сменилось самым холодным периодом плейстоцена – оледенением эпохи «большого валдая» (110–10 тыс. лет назад), вслед за которым наступил современный период, считающийся очередным межледниковьем. Продвигавшийся к югу ледник заполнил котловину Ладоги и подпрудил реки, имевшие сток в северном направлении, а также озера, располагавшиеся на ладожском водосборе, и участки межледникового моря. У переднего края ледника возникли приледниковые водоемы, по существу бывшие своеобразным продолжением межледниковых. При последовавшей затем дегляциации рассматриваемой территории приледниковые водоемы переместились к северу, включая Ладожскую котловину, и обеспечили тем самым опосредованную преемственность между современной Ладогой и межледниковыми водными объектами. Эта преемственность особенно четко проявилась в истории формирования биоты (см. следующий раздел).

Валдайский покровный ледник достиг максимального развития около 18–17 тыс. лет назад. К этому времени ладожский ледниковый поток продвинулся далеко к югу до междуречья верховьев Западной Двины и Днепра (Чеботарева, 1969; Знаменская и др., 1977).

Последовавшее затем отступление ледника в северо-западном направлении носило стадийный характер и было относительно быстрым. Уже 12,6 тыс. лет назад, на лужско-невской стадии, край его располагался в 20–50 км южнее современной береговой линии Ладоги (рис. 1.1.1). Ото льда освободилась часть ладожского водосбора, которая оказалась затопленной Нижне-Лужским плесом приледникового озера Рамсея, имевшего сток в

западном направлении (Квасов, 1990). Этот период дегляциации рассматриваемой территории можно обозначить как начало новейшего этапа существования водной системы Ладожского озера.

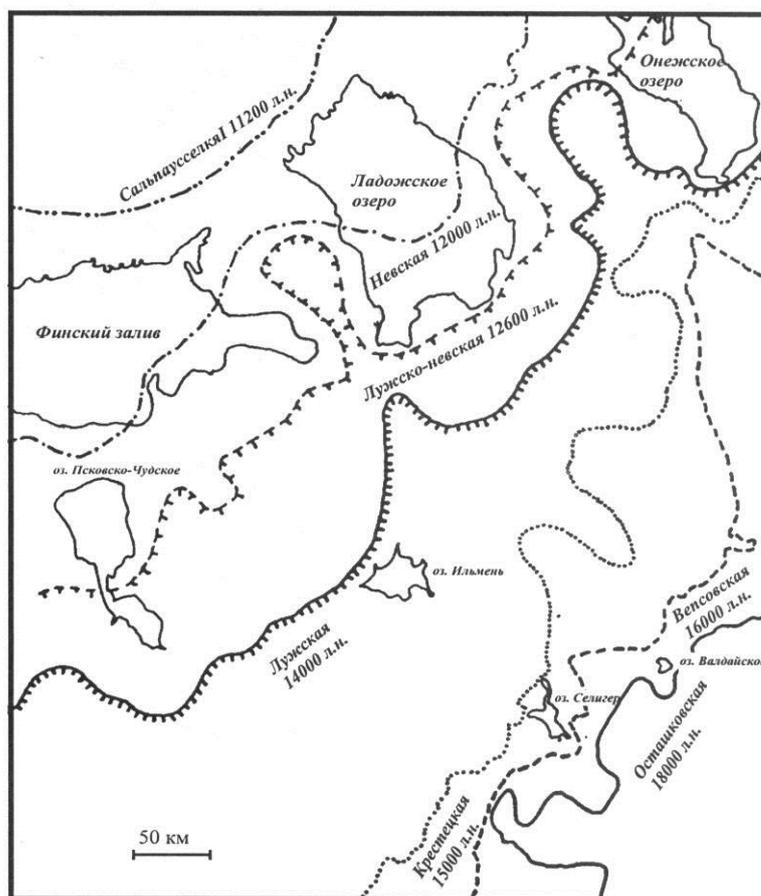


Рис. 1.1.1. Границы осцилляций последнего оледенения на территориях, прилежащих к современному бассейну Ладожского озера.

В дальнейшем, начиная с невской стадии, происходило освобождение ото льда наиболее глубоководных центрального и северного районов озера, и 12 тыс. лет назад, после спуска приледникового озера Рамсея, здесь образовался Ладожский залив Балтийского ледникового озера. Центральная часть Карельского перешейка в то время представляла собой остров (рис. 1.1.2). По водосбору озера были распространены тундрово-степные приледниковые ландшафты.

Ладожский залив был олиготрофным глубоководным и холодноводным приледниковым водоемом. Экосистема залива находилась под доминирующим влиянием талых ледниковых вод и характеризовалась низкой биологической продуктивностью, в связи с чем формировавшиеся в то время донные отложения содержали весьма незначительное количество органического вещества. Отличительная черта донных отложений Балтийского ледникового озера, не повторявшаяся в последующие периоды

ладожской истории, — их градационная слоистость, благодаря которой они получили название «ленточные глины». Эти отложения характеризуются чередованием слоев двух типов: тонких глинистых, относительно темных, образовывавшихся зимой, и более мощных алевритовых с примесью песчаных фракций и светлоокрашенных, образовывавшихся летом. Строгое сезонное соответствие обоих типов слоев позволяет использовать ленточные глины в качестве своеобразного календаря, дающего возможность устанавливать продолжительность соответствующих этапов истории водоема. Мощность ленточных глин в котловине Ладожского озера достигает 20–30 м (Субетто, 2009),

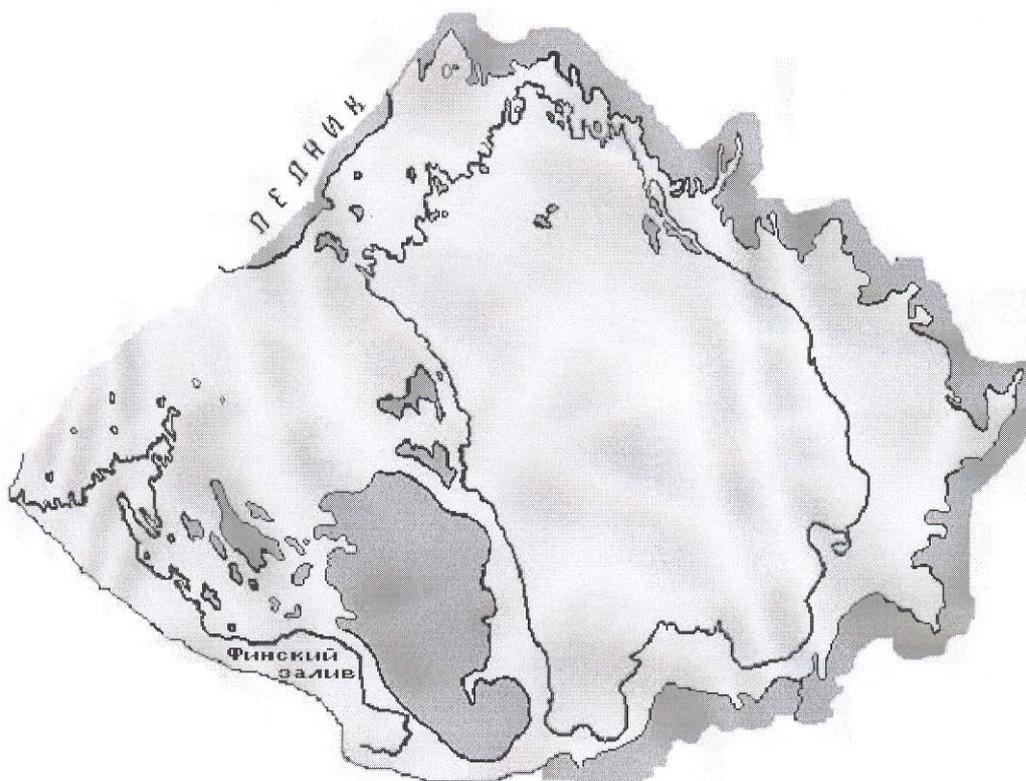


Рис. 1.1.2. Ладожский (восточный) залив Балтийского ледникового озера.

Для ленточных глин отмечается большое видовое разнообразие диатомей, но их количество было невелико: встречались лишь единицы. В диатомовых комплексах характерны планктонные виды, обитатели холодноводных бассейнов. Низкая продуктивность экосистемы Ладожского залива обуславливалась, во-первых, малой прозрачностью воды, поступавшей из тающего ледника, во-вторых, невысокими температурами воды и коротким вегетационным периодом, типичным для позднеледниковья.

Ладожский залив Балтийского ледникового озера просуществовал около 1,5–2 тыс. лет и после спуска Балтийского ледникового озера 10 тыс. лет назад превратился в отдельный водный объект. Тем самым Ладога впервые в новейшее время стала самостоятельным озером, сток из которого первоначально осуществлялся по трассе бывшего пролива в северной части Карельского перешейка. Считается, что спуск Балтийского ледникового озера произошел катастрофически и кратковременно (Субетто, 2009). Это озеро оказалось последним приледниковым водоемом на территории северо-запада Русской равнины. Вместе с тем временной рубеж его спуска (10 тыс. лет назад) рассматривается как окончание Валдайской эпохи и плейстоцена в целом и начало голоцена (Давыдова и др., 1998).

Исчезновение Балтийского ледникового озера совпало по времени с изменениями климатических условий: холодный арктический поздний плейстоцен сменился более теплым и влажным голоценом. Это повлекло за собой смену характера осадконакопления в озерах. Падает темп седиментации осадков. Серые минерогенные глинистые отложения сменились бурыми, зеленовато-коричневыми органогенными осадками — илами и сапропелями (Субетто, 2006), произошло обогащение осадков органическим веществом. Численность диатомей в отложениях оставалась низкой, но их видовое разнообразие сократилось.

В бассейне Ладоги в рассматриваемый период произошло такое важное событие, как появление поселений человека на севере Карельского перешейка (Герасимов, Субетто, 2009).

В связи со спуском Балтийского ледникового озера и появившейся связью с океаном, в Балтику стали поступать морские воды. Возникло солоноватоводное Иольдиевое море (10–9,5 тыс. лет назад). Долгое время считалось, что это море проникало в котловину Ладожского озера и даже Онежского, а также тянулось в восточном направлении. Однако затем было установлено, что такая связь отсутствовала, так как уровень воды в озере был выше, чем в море, и Ладога на протяжении иольдиевой стадии продолжала существовать как отдельный водный объект. Сток в Иольдиевое море из Ладоги происходил в северной части Карельского перешейка в субширотном направлении по оси современных городов Приозерск — Выборг.

Как самостоятельный водоем Ладога просуществовала сравнительно недолго и снова превратилась в восточный глубоководный залив теперь уже Анцилового озера, сменившего Иольдиевое море около 9,5 тыс. лет назад. Анциловая трансгрессия Балтики около 9 тыс. лет назад привела к подпору ладожского стока, подъему уровня воды в нем, затоплению северной части Карельского перешейка и появлению широкого пролива

между заливом и озером (рис. 1.1.3). Во время максимума трансгрессии происходило частичное подтопление южных мелководий Ладоги (Субетто, 2007).

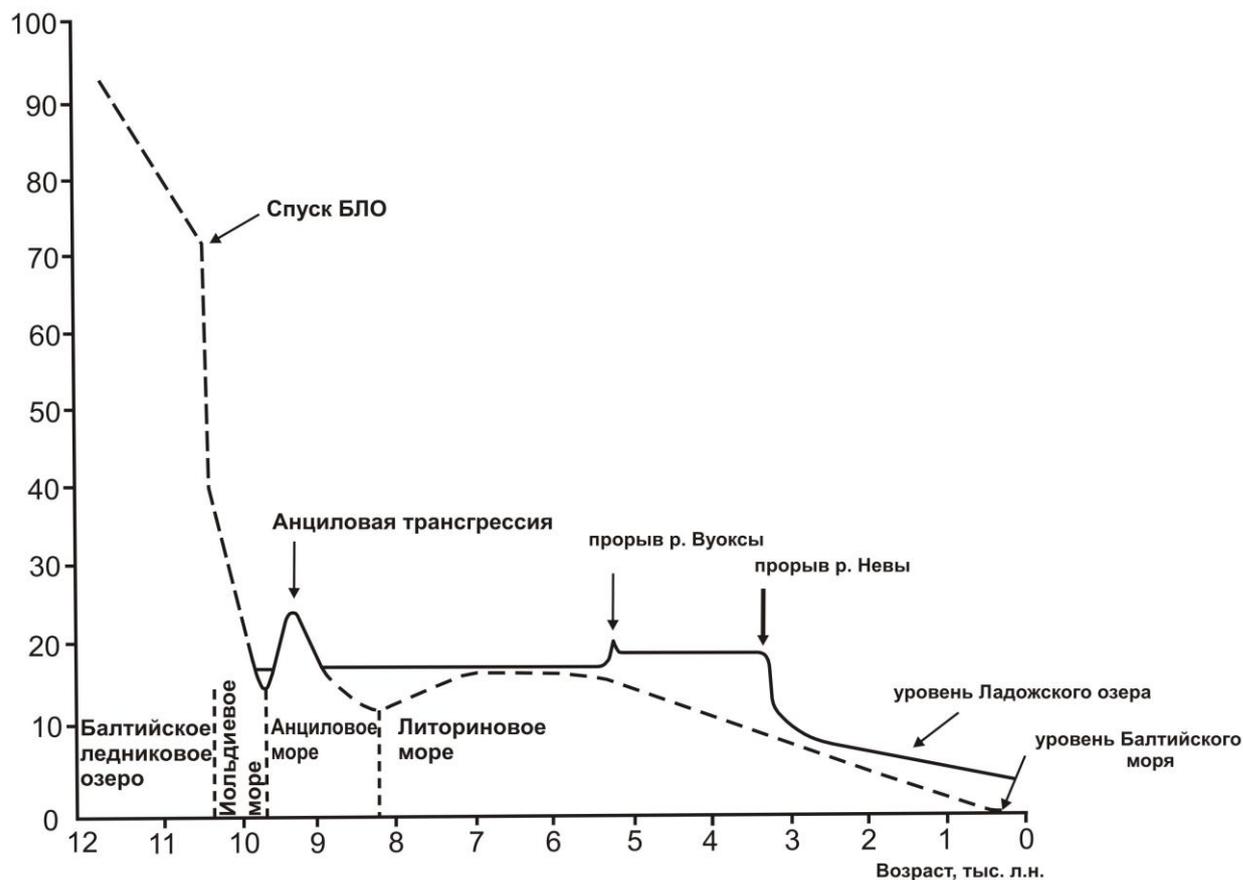


Рис. 1.1.3. Кривая изменений уровней Ладожского озера, м (непрерывная линия) и Балтийского моря, м (прерывистая линия) за последние 12 тыс. лет (Saarnisto, Grönlund, 1996) с добавлениями). БЛО — Балтийское ледниковое озеро.

В Ладожском заливе Анцилового озера отмечался рост продуктивности экосистемы и, в связи с этим, увеличение содержания органики в донных отложениях. В них возросло присутствие диатомей, из которых большая группа бентосных видов вошла в состав доминантов. Разнообразие диатомей увеличилось за счет видов, характерных для умеренной зоны. Водосборы водоема на этой стадии развития были покрыты лесной растительностью.

В Балтике стадия Анцилового озера сменилось стадией Литоринового моря. Ладожское озеро окончательно превратилось в существующий по настоящее время самостоятельный пресный водоем. Наступил заключительный этап истории водоема и всей его системы (8 тыс. лет назад — настоящее время). Уже в начале этого этапа отмечалось потепление климата, обусловившее развитие на водосборах смешанных хвойно-широколиственных лесов с примесью дуба, липы, вяза, клена, что способствовало

росту содержания органики в донных отложениях. В осадках также увеличилось видовое разнообразие и общее количество диатомей.

Крупнейшим событием, связанным с заключительным этапом и, более того, всей историей озера, можно считать ладожскую трансгрессию, последовавшую за существенным увеличением водного баланса водоема, повлекшим за собой значительное повышение уровня воды в нем. Причиной этой трансгрессии явилось изменение направления водного стока озерной системы Сайма, расположенной в юго-восточной части Финляндии. В связи с изостатическим поднятием этой территории сток, поступавший отсюда в Ботнический, а позднее в Финский залив из примыкающей к ладожскому бассейну системы озера Сайма, изменил направление и, образовав реку Вуокса около 5 тыс. лет назад, увеличил приходную часть водного баланса Ладожского озера примерно на одну треть. Уровень воды в Ладоге стал повышаться и достиг максимальных отметок по разным данным около 3,1–2,0 тыс. лет назад (рис. 1.1.4) (Бискэ и др., 2007; Александровский и др., 2009).

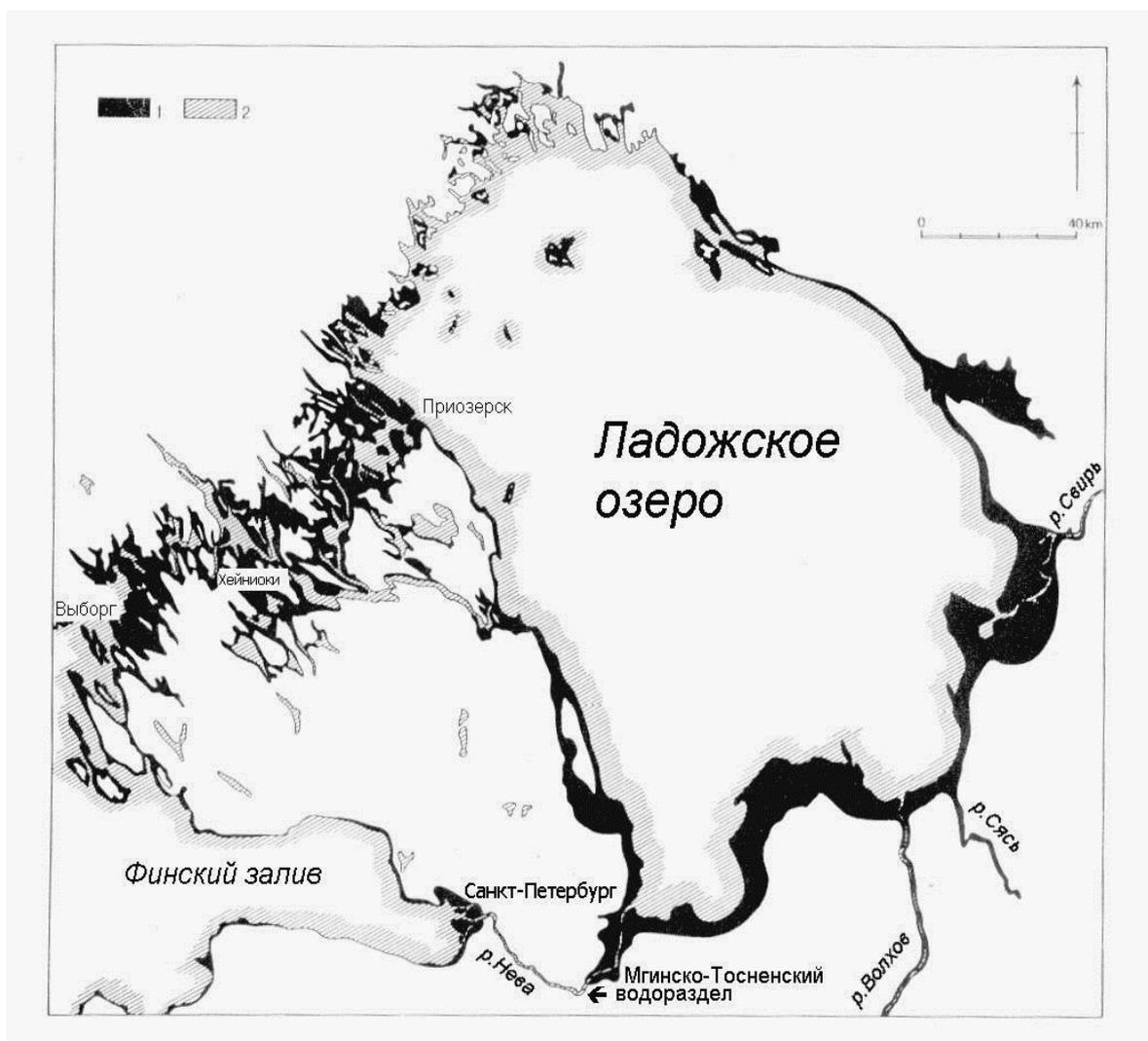


Рис 1.1.4. Очертания Ладожского озера и его соединения с Балтикой в северной части Карельского перешейка во время максимума ладожской трансгрессии до прорыва реки Невы (1 — черная окраска). Современные очертания Ладожского озера после перелива его вод через Мгинско-Тосненский водораздел и формирования реки Невы (2 — серая окраска) (Saarnisto, Grönlund, 1996, с дополнениями).

К этому времени уровень воды в озере поднялся до водораздела между впадавшей в Ладогу рекой Мгой и впадавшей в Финский залив рекой Тосной. Ладожские воды прорвали сложенный рыхлыми породами водораздел и размывли его, в результате чего образовалась река Нева. Сток из Ладожского озера, осуществлявшийся ранее по озерно-речной системе в северной части Карельского перешейка, переместился в эту реку. В короткие сроки уровень воды в озере понизился примерно на 10 м и достиг современной отметки 5 м над уровнем моря. В итоге очертания береговой линии и размеры акватории Ладоги приняли современный вид.

Таким образом, в позднем плейстоцене и голоцене за относительно короткий период (около 13 тыс. лет) территория, занятая Ладожским озером и его частным водосбором, претерпела сложные изменения в соответствии с общими преобразованиями палеогеографической обстановки северо-запада европейской части России. В котловине озера последовательно происходили такие процессы, как полное перекрытие ледниковым щитом, образование плеса и заливов крупных приледниковых водоемов и Анцилового озера, появление самостоятельного водного объекта — Ладожского озера (табл. 1.1.1).

Таблица 1.1.1.

Этапы истории Ладожского озера и климатические периоды

Состояние Ладоги	Возрастной рубеж, лет назад	Климатический период	Возрастной рубеж, лет назад
Озеро	0–8000	Современный–Субатлантический (SA)	0–2500
		Суббореальный (SB)	2500–5000
		Атлантический (AT)	5000–8000
Залив Анцилового озера	8000–9500	Бореальный (BO)	8000–9000
Озеро	9500–10000	Пребореальный (PB)	9000–10000
Залив Балтийского ледникового озера	10000–12000	Поздний дриас (DR ₃)	10000–11000
Плес приледникового озера Рамсея	12000–13000	Аллерёд (Al) и средний дриас (DR ₂)	11000–12500
Ледник	Более 13000	Бёллинг (BÖ)	12500–13000

На рассматриваемой территории в позднплейстоценовое и голоценовое время происходили крупные изменения климата. В самом общем виде можно отметить, что от

начала освобождения ладожской котловины от ледника и до настоящего времени климат существенно потеплел. Однако в деталях изменения климатических условий не представляли собой плавного тренда. На протяжении этого отрезка ладожской истории неоднократно отмечались случаи резких колебаний климата, причем обобщенный тренд потепления прерывался рядом значительных похолоданий. Общий размах колебаний летних (июльских) температур воздуха в сравнении с их современной величиной достигал по отдельным этапам 9 °С, что рельефно отражено на рис. 1.1.5.

С начала освобождения рассматриваемого региона от ледника господствовал резко континентальный сухой и холодный климат. Однако уже в бёллинге и аллерёде летняя температура воздуха приблизилась к современной и оставалась близкой к ней на протяжении примерно 2 тыс. лет до позднего дриаса, когда произошло резкое ее снижение (холодное событие 10,4–10 тыс. лет). Затем в пребореальном периоде летняя температура воздуха вновь приблизилась к современным величинам и уже не опускалась ниже этого уровня (за исключением небольших периодов) до настоящего времени. В последующем бореальном периоде потепление усилилось и достигло первого оптимума около 9 тыс. лет назад.

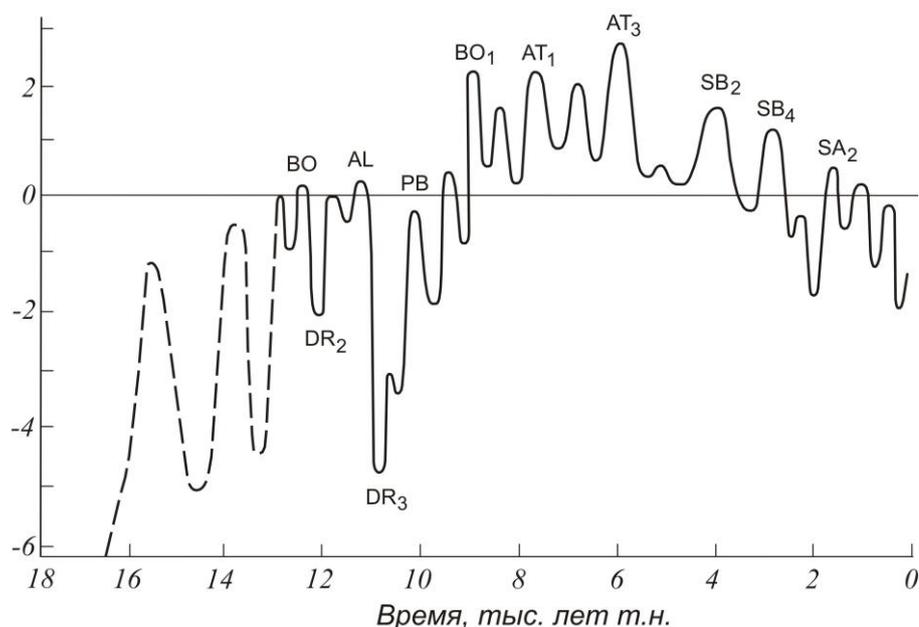


Рис. 1.1.5. Отклонения летней температуры воздуха Δt °С (по вертикальной оси) от современной для зоны 60–75° с. ш. (по Борзенковой, 1992).

С началом бореала завершается первая фаза истории ладожского климата. Он характеризовался общим потеплением, но был существенно холоднее современного. В

связи с улучшением климатических условий некоторые изменения происходили в это время в биоте озера, что уверенно отмечается на примере флоры диатомовых водорослей. Бедная по видовому составу и количественному развитию флора диатомовых с переходом к бореалу становится богаче по числу видов, ее продуктивность возрастает. Увеличивается численность диатомовых в донных отложениях, которые обогащаются органическим веществом (Давыдова, 1985).

Дальнейшее потепление происходило в атлантический период, составивший вместе с бореальным вторую, наиболее теплую фазу истории ладожского климата. Во время второй фазы 6,2–5,3 тыс. лет назад летние температуры воздуха были (с колебаниями) на 2–4 °С выше современных в связи с чем этот период обозначается как климатический оптимум голоцена. Вместе с тем он оказался самым теплым в истории Ладожского озера.

Климатические условия периода оптимума оказали значительное влияние на состояние биоты озера. В частности, в это время в Ладогу и водоемы ее частного водосбора вселились многочисленные южные относительно тепловодные виды, придав фауне современный характер, смешанный в биогеографическом отношении (см. следующий раздел).

Последовавшая за второй третья климатическая фаза (5,3 лет назад – настоящее время) отличалась устойчивым похолоданием, а летние температуры воздуха опустились ниже отмечавшихся во время климатического оптимума. Климат приобрел современные параметры. Лишь в последний период времени в ладожском регионе наблюдается некоторое повышение температур воздуха, что рассматривается как следствие наблюдающегося глобального потепления.

Таким образом, на формирование геосистемы Ладожского озера влияли тектонические и климатические факторы. Основные этапы истории озера в конце позднего плейстоцена и голоцене связаны со стадиями Балтики: озеро Рамсея, Балтийское ледниковое озеро, ильдиевая стадия, Анциловое озеро, Литориновое море. Ладожское озеро на разных этапах своего развития являлось заливом Балтики или самостоятельным водоемом. Современное озеро начало формироваться около 5 лет назад. Окончательный разрыв Ладожско-Балтийского соединения произошел около 3,7 лет назад. В это время уровень Ладожского озера упал до современных отметок.

1.2. Формирование фауны озера

Фауна Ладожского озера и водоемов его частного водосбора в целом богата, и в этом отношении Ладога превосходит другие большие пресные водоемы северо-запада европейской части России. Она молода, так как оказалась здесь сравнительно недавно с момента возникновения Нижне-Лужского плеса приледникового водоема Рамсея около 12,6 тыс. лет назад, после освобождения этой территории от ледникового покрова. Историю формирования фауны Ладоги целесообразно рассмотреть на примере рыбного населения, которое изучено в этом отношении достаточно подробно (Кудерский, 1990; 1998; 2003; 2007; Kudersky, 1997). Такое сужение проблемы обозначенной в названии раздела вполне целесообразно, постольку поскольку пути формирования фауны в целом в этом регионе в общих контурах аналогичны формированию ихтиофауны.

В идеальном варианте для реконструкции путей формирования видового состава рыбного населения водоемов необходимо привлечение материалов по палеонтологии, биогеографии (с учетом экологии рыб) и геологической истории становления водных систем. Однако в случае Ладожского озера такие всеобъемлющие сведения отсутствуют. В связи с неоднократными оледенениями и уничтожением основной массы доледниковых и межледниковых отложений, в ладожском регионе практически не сохранились какие-либо палеонтологические свидетельства о рыбах в слоях старше позднеледниковых и голоценовых. Поэтому при реконструкции былых ихтиофаун и вероятных путей их преобразований приходится ограничиваться использованием той информации, которая может быть почерпнута из палеолимнологической истории озера, ихтиогеографии и экологии рыб. Хотя и биогеографические и палеолимнологические сведения носят преимущественно косвенный характер в отношении к проблеме формирования рыбного населения, но в конкретных условиях рассматриваемой территории на основе их анализа можно получить достаточно объективные выводы по обсуждаемому вопросу. К тому же ихтиогеографические материалы оказываются достаточно мощным самостоятельным инструментом, способствующим удовлетворительному анализу палеолимнологических явлений (Кудерский, 1987).

В Ладожском озере в настоящее время обнаружено 43 аборигенных вида круглоротых и рыб и 1 вид, натурализовавшийся в результате саморасселения. По числу

видов рыбное население озера совместно с водоемами его частного водосбора превосходит такие крупные озера бассейна восточной части Финского залива, как Онежское — 36 видов, Псковско-Чудское и Сайма — по 32 вида, Ильмень — 25 видов.

Для понимания истории формирования современного рыбного населения Ладоги важна такая его черта, как неоднородность в экологическом отношении. Все обитающие в нем виды достаточно четко подразделяются на три основные группы: холодноводные, относительно тепловодные и фоновые. Последних можно не рассматривать детально, так как они не несут четкой информации, необходимой при анализе проблемы происхождения ихтиофауны.

Большое видовое разнообразие рыбного населения и его экологическая неоднородность обусловлены, во-первых, особенностями термического режима озера, связанными с его географическим положением, и, во-вторых, сложной историей образования самого водоема в позднеплейстоценовое и голоценовое время. Ладожское озеро — глубоководный и холодноводный водоем. Однако в ряде районов (преимущественно в южной части) есть обширные мелкие и хорошо прогреваемые заливы и губы. Кроме того, благоприятные в термическом отношении условия наблюдаются во многих малых мелководных водоемах частного водосбора Ладоги. Отмеченные различия в условиях обитания позволяют сохраняться как холодноводным, так и относительно тепловодным видам, что в конечном итоге придает рыбному населению озера и водоемам его бассейна смешанный в экологическом отношении характер. Различающиеся по отношению к температурному фактору виды распространены в современном озере достаточно своеобразно и в полном соответствии со своей экологической спецификой. Основной комплекс холодноводных рыб (а также реликтовых беспозвоночных) населяет открытые глубоководные и более холодноводные участки акватории. В то же время относительно тепловодные виды преимущественно обитают в мелководных прибрежных наиболее прогреваемых участках и губах, сосредоточенных в основном в южной части озера.

Хотя палеонтологических материалов по рыбному населению ладожского региона в предплейстоценовое время практически не сохранилось, но, учитывая современное географическое распространение обитающих здесь видов, можно обоснованно считать, что в этот период в водоемах рассматриваемой территории существовали представители таких родов, как *Salmo*, *Salvelinus*, *Coregonus*, *Thymallus*, *Osmerus*, *Lota*, *Triglopsis*, а из круглоротых *Lampetra*. Учитывая экологические особенности ныне живущих видов этих родов, допустимо полагать, что в предплейстоценовое время их представители были

холодноводными. Существовали и тепловодные формы, относящиеся к другим родам, но какие-либо данные (включая косвенные) по этому вопросу отсутствуют.

Холодноводность видов, относившихся к перечисленным родам, позволила им пережить неоднократно происходившие климатические катаклизмы и сохраниться до настоящего времени. Вполне возможно, что в те периоды в водных объектах ладожского региона могли обитать также представители родов, включающих современные фоновые виды, в частности *Esox*, *Rutilus*, *Leuciscus*, *Gasterosteus*, *Perca* и др. Ареалы рыб перечисленных холодноводных и фоновых родов неоднократно перемещались к югу в эпохи развития очередных оледенений и вновь сдвигались к северу при исчезновении ледниковых покровов. Во время межледниковий эти рыбы населяли образовавшиеся водоемы. При этом следует отметить, что в межледниковья часть видов этих родов могла обитать в пресноводных, часть — в солоноватоводных условиях. К последним могут быть отнесены проходные и полупроходные виды таких родов, как *Salmo*, *Salvelinus*, *Coregonus*, *Osmerus*, а также *Lampetra*. Исходя из анализа современного видового состава ладожской ихтиофауны, можно вполне обоснованно допустить, что перечисленный набор родов существовал и в последнее (микулинское) межледниковье, и ихтиофауна его водоемов оказалась наиболее древней предшественницей холодноводной части современной ладожской ихтиофауны. В связи с этим есть все основания рассматривать эту группу видов ладожских рыб в качестве реликтов микулинского времени.

Так как отношение холодноводной и тепловодной экологических групп рыб к такому решающему экологическому фактору, как температура воды, существенно различается, то их совместное проникновение в озеро исключается, и *a priori* каждая из групп вселялась своими путями. Как следует из истории озера (см. предыдущий раздел), в течение начальных этапов существования водных объектов предшественников озера, первые вселенцы в соответствии с климатическими условиями того времени были холодноводными. В связи с этим на первых этапах становления водных предшественников озера в них могла существовать первая экологическая группа рыб и частично третья. Они составили первую волну вселенцев. Присутствие тепловодных видов исключалось. Из современной ихтиофауны к холодноводным видам первой волны могут быть отнесены: ладожская *Lampetra fluviatilis* (L.) и ручьевая *L. planeri* (Bloch) миноги, озерный лосось *Salmo salar m. sebago* Girard, озерная форель *S. trutta m. lacustris* L., палия *Salvelinus lepechini* (Gmelin), сига *Coregonus lavaretus lavaretus* L., ряпушка *C. albula* L., хариус *Thymallus thymallus* (L.), корюшка *Osmeus eperlanus* (L.), налим *Lota lota* (L.), реликтовая рогатка *Trigloopsis quadricornis lönnnbergi* Berg. К ним следует добавить из реликтовых беспозвоночных планктонного лимнокалянуса *Limnocalanus macrurus* Sars и

бентосных и нектобентосных гаммаракантуса *Gammaracantus lacustris* Sars, понтопорею *Pontoporeia affinis* Lindstrom, палласею *Pallasea quadrispinosa* Sara, мизиду *Mysis relicta* Loven, а из млекопитающих также ладожскую нерпу *Phoca hispida ladogensis* Nordquist. Вся эта совокупность видов попала в озеро из перелившихся в котловину Ладоги предшествовавших ей приледниковых водоемов. В свою очередь, в приледниковых водоемах холодноводные элементы рыбного населения и фауны озера в целом оказались при подпоре водных (морских и пресных) объектов микулинского межледниковья Валдайским ледником. Они представляли остатки межледниковой фауны, так как ее тепловодная часть погибла при имевшем в то время место похолодании, связанном с наступлением ледника.

В связи с такой особенностью начального этапа появления, исходные элементы ладожской фауны (холодноводные виды) представляют собою комплекс организмов, существовавших в приледниковых водоемах, куда они попали из водных объектов (участков моря, озер) микулинского межледниковья. Поэтому исходный набор видов по существу оказывается сообществом микулинских реликтов. В отношении сохранившихся холодноводных видов приледниковые водоемы выполнили роль рефугиумов, в которых эти виды пережили длительный неблагоприятный период. При этом в своеобразных условиях приледниковых водоемов некоторые сохранившиеся виды претерпели изменения, благодаря которым в современной ихтиофауне они оказались представленными рядом форм, как, например, сиги, ряпушка, паляя и др.

Таким образом, холодноводная часть рыбного населения наглядно демонстрирует опосредованную преемственность межледниковых микулинских водных объектов и современной Ладоги, а также водоемов ее водосбора.

С началом распада Валдайского ледника его южный край вместе с примыкающими к нему приледниковыми водоемами стал довольно быстро перемещаться в северном направлении. В результате этого входящие в первую экологическую группу холодноводные виды вновь оказались в Ладожской котловине при возникновении в ее южной части плеса озера Рамсея, относившегося к Балтийской системе приледниковых водоемов. Дальнейшее развитие ладожской ихтиофауны протекало как в связи с рыбным населением водоемов последовательно сменявшихся в балтийской котловине, так и самостоятельно. Среди первых общебалтийских водоемов значительную роль в формировании холодноводного комплекса рыб Ладоги сыграло Балтийское ледниковое озеро. В период его существования произошли, во-первых, объединение в едином водоеме рыбного населения различных южнобалтийских приледниковых озер, и, во-вторых, расширение до общебалтийских масштабов ареалов различных видов. Ладожская

ихтиофауна представляла в это время составную часть балтийского пресноводного комплекса рыб, и ее можно рассматривать как наиболее полный фрагмент ихтиофауны периода Балтийского ледникового озера.

Рыбное население Ладоги испытало отдельные изменения в период ее вхождения в качестве залива в состав Анцилового озера. С этим временем связано появление некоторых особенностей у ряда видов ладожских рыб. Так, реликтовая рогатка по ряду признаков приобрела промежуточное положение между популяциями этого вида из Финского залива и Онежского озера. Следы влияния Анцилового озера отмечаются у ладожского лосося. Эта рыба как проходная форма имела возможность мигрировать в нерестовый период из Анцилового озера по существовавшему проливу в его Ладожский залив и размножаться там в ряде рек. Поэтому стадо лосося, связанное с рекой Хитолой, расположенной вблизи этого пролива, оказывается по морфологическим признакам ближе к балтийскому лососю, чем размножающееся в реке Свири, которая наиболее удалена от указанной бывшей водной связи.

Наиболее существенные изменения в рыбном населении Ладоги произошли во вторую, самую теплую фазу истории ладожского климата, которая наступила около 9 тыс. лет назад и характеризовалась интенсивным потеплением. В течение бореального и атлантического климатических периодов в рассматриваемом регионе отмечались наиболее теплые климатические условия за всю поздне- и послеледниковую историю. Потепление достигло максимума в атлантический период во время так называемого «климатического оптимума» голоцена (6,2–5,3 тыс. лет назад).

Значительное потепление создало благоприятные условия для появления в Ладоге тепловодных рыб, которые составили вторую волну вселенцев. Озеро и водоемы его частного водосбора пополнились 15 новыми для региона видами, в числе которых оказались голавль *Leuciscus cephalus* (L.), красноперка *Scardinius erythrophthalmus* (L.), жерех *Aspius aspius* (L.), верховка *Leucaspius delineatus* (L.), линь *Tinca tinca* (L.), густера *Blicca bjorkna* (L.), белоглазка *Abramis sapa* (L.), синец *Abramis ballerus* (L.), сырть *Vimba vimba* (L.), чехонь *Pelecus cultratus* (L.), золотой карась *Carassius carassius* (L.), сом *Silurus glanis* (L.), судак (*Sander lucioperca* (L.) и др. К ним может быть добавлен в настоящее время отсутствующий берш *Sander volgense* (Gmelin), остатки которого обнаружены в археологическом материале на южном побережье озера. Для большинства приведенных видов ладожский бассейн — наиболее северная часть ареала. В более высокие широты они не проникают из-за неблагоприятных термических условий. Это обстоятельство усиливает их индикаторное значение при анализе истории формирования рыбного

населения Ладоги. В озере группа тепловодных видов наиболее полно представлена в южной части, включая Волховскую губу и бассейн Волхова.

Для перечисленных тепловодных вселенцев характерны две черты. Во-первых, в связи с встречаемостью у северной границы ареалов, большинство из них оказываются редкими и малочисленными и практически не имеют промыслового значения (либо имеют, но незначительное). Во-вторых, подавляющее число видов относится к семейству карповых. Поэтому их появление изменило общий зоогеографический облик ладожской ихтиофауны. В добореальное время она была лососево-сиговой с примыкающими фоновыми видами и соответствовала современной Ледовитоморской провинции циркумполярной подобласти Голарктики в понимании Л.С. Берга (1949). С вселением многих тепловодных видов карповых рыб она приобрела смешанный лососево-сигово-карповый облик, причем появились отдельные черты, свойственные Средиземноморской подобласти Голарктики. В связи с этим не случайно обсуждается вопрос об уточнении положения ладожского бассейна в структуре зоогеографических подразделений, установленных для водоемов Севера Европы (Китаев, Стерлигова, 2001). Следует подчеркнуть, что появление тепловодных видов не привело к «усреднению» видового состава рыбного населения по озеру в целом, а каждая из двух экологических групп рыб (как отмечено выше) заняла в основном свою нишу. В итоге в озере возникли две ихтиозоны: одна (в открытой акватории) населена преимущественно холодноводными видами — выходцами из приледниковых водоемов, а во второй, мелководной (прибрежной), обитают тепловодные рыбы, появившиеся в период голоценового климатического оптимума.

Рыбы, составившие вторую волну вселенцев, по географическому распространению относятся к ихтиофауне, характерной для бассейнов Черного и Каспийского морей. В связи с этим они объективно оказываются выходцами из этой зоогеографической области. Высокая степень изученности четвертичной истории северо-западного региона европейской части России позволяет наметить наиболее вероятные пути проникновения второй волны вселенцев в северном направлении. Анализируя расположение основных крупных водных артерий на стыке бассейнов Балтийского, Черного и Каспийского морей и особенности рельефа этой территории можно прийти к выводу, что расселение рыб, относящихся ко второй волне, происходило во время плювиального этапа атлантического периода по направлению Верхний Днепр — Ловать — Ильмень — Волхов — Ладога. Вполне возможно, что некоторые из тепловодных видов расселялись по направлению Верхняя Волга — Мста — Ильмень — Ладога. На данном этапе изучения этой проблемы наиболее вероятным направлением вселения рыб второй

волны следует признать первое. По водоемам-донорам эти виды следует считать тепловодными понто-каспийскими иммигрантами.

Таким образом, рыбы заселяли Ладожское озеро и водоемы его частного водосбора двумя волнами:

1) первую волну, относительно бедную в видовом отношении, составили холодноводные остатки ихтиофауны микулинского межледниковья, вселявшиеся из приледниковых водоемов на начальных этапах истории озера;

2) вторую волну, более богатую по числу видов, образовали тепловодные южные выходцы, проникшие из бассейна Верхнего Днепра (возможно, отчасти из Верхневолжского бассейна) в период голоценового климатического оптимума.

В соответствии с выделенными двумя волнами заселения рассматриваемого региона и с учетом экологических особенностей, рыбное население Ладожского озера и водоемов его частного водосбора вполне закономерно разделяется на два блока: микулинских реликтов и понто-каспийских иммигрантов.

Формирование фауны Ладожского озера тесно связано с историей самого озера. В соответствии с вышеизложенными этапами развития озера: приледникового водоема и Литоринового моря. В течение начальных этапов формирования геосистемы Ладожского озера первые вселенцы в соответствии с климатическими условиями того времени были холодноводными. Значительное потепление создало благоприятные условия для появления в Ладоге тепловодных рыб, которые составили вторую волну вселенцев.

Глава 2. Водосбор Ладожского озера

Водосборный бассейн Ладожского озера простирается от 64° до 56° с. ш. и от 26° до 38° в. д. Его площадь превышает 282 тыс. км² (Науменко, Каретников, 2005). Наибольшая протяжённость с севера на юг достигает 1100 км, что предопределяет географическую зональность территории водосбора. Площадь водосбора в 14,6 раза превышает площадь водного зеркала озера, поэтому процессы загрязнения и эвтрофирования Ладожского озера в значительной степени связаны с притоком химических веществ с водосборной площади.

2.1. Характеристики подстилающей поверхности

2.1.1. Рельеф

Совокупность геологических, орографических и гидрографических особенностей бассейна позволяет выделить в его структуре ряда вторичных бассейнов. Это Сайма-Вуоксинский (I), Онежско-Свирский (II) и Ильмень-Волховский водосборы (III), а также собственный (частный) водосбор Ладожского озера (IV), представленные на рис 2.1.1. Значения площадей указанных водосборов, полученные с использованием цифровой модели рельефа (Науменко, Каретников, 2005), приведены в табл. 2.1.1.

Северная часть водосбора Ладожского озера расположена в пределах Балтийского кристаллического щита, южная — на Русской платформе. Граница между двумя этими частями проходит приблизительно по линии г. Выборг — г. Приозерск — устье реки Видлицы — исток реки Свири. Кристаллический щит сложен дислоцированными породами архейского и протерозойского возраста. Преобладают породы кислого состава — граниты, гнейсы, кварциты. Докембрийские породы выходят на дневную поверхность и лишь местами прикрыты четвертичными отложениями небольшой мощности, имеющими грубый механический состав, а по химическому составу мало отличающиеся от коренных пород. Для рельефа северной части водосбора, выработанного в коренных породах тектоническими и экзогенными процессами, характерно чередование скалистых сельговых гряд и межсельговых понижений, вытянутых с северо-запада на юго-восток. Сельги обычно короткие и узкие, моренные отложения на них размыты. К межсельговым понижениям приурочена современная молодая гидросеть. На территории

Балтийского щита, в пределах северной части Ладожско-Онежского водораздела, значительную площадь занимает Западно-Карельская возвышенность, протянувшаяся в юго-восточном направлении. Её средние высотные отметки колеблются в пределах 200–400 м. Грядовый эрозионный рельеф на этом участке водосбора сочетается с аккумулятивными формами: озами, камами, моренными холмами.

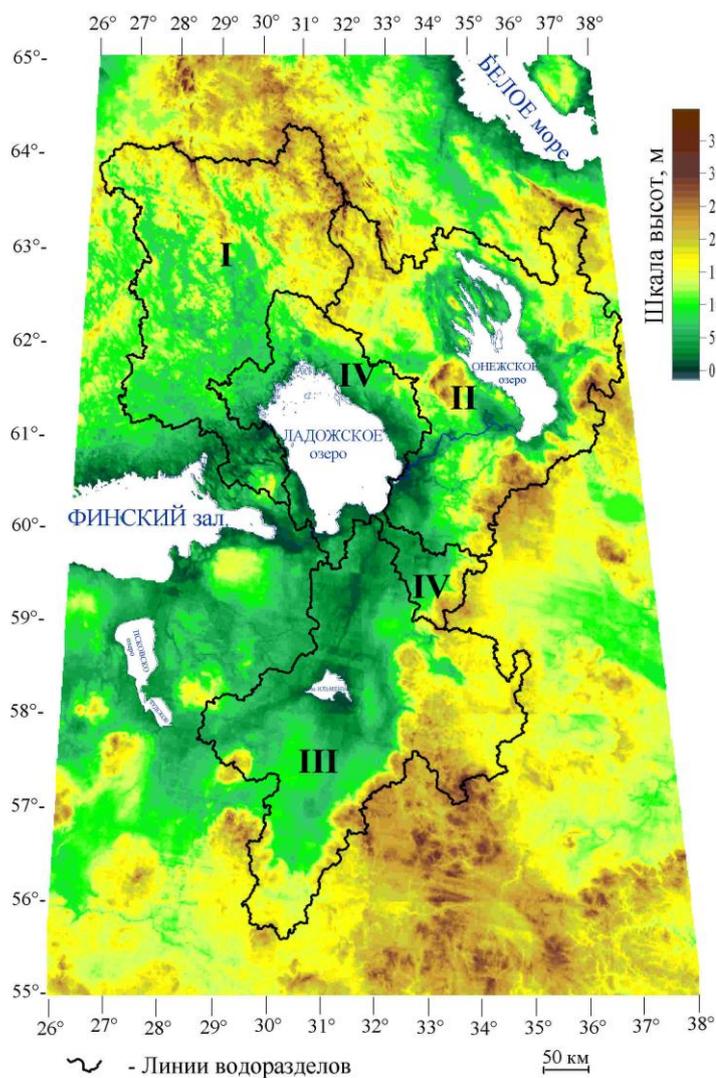


Рис. 2.1.1. Общий и вторичные водосборы Ладожского озера (Науменко, Каретников, 2005).

Таблица 2.1.1.

Площади общего и вторичных водосборов Ладожского озера, км² (Науменко, Каретников, 2005)

Весь водосбор	Сайма-Вуоксинский (I)	Онежско-Свирский (II)	Ильмень-Волховский (III)	Собственно Ладожский (IV)
282664	69838	82255	82232	48339

От Западно-Карельской возвышенности к Онежскому и Ладожскому озерам поверхность снижается до 90–100 м и начинает преобладать холмисто-равнинный рельеф с высотами 30–70 м. Южная часть территории бассейна Ладожского озера является областью распространения палеозойских отложений и отличается равнинным рельефом с широким распространением аккумулятивных форм. Наибольшую площадь здесь занимает Ловать-Ильмень-Волховская низина, приуроченная к понижению в рельефе коренных девонских пород. Глубина залегания кристаллического фундамента достигает 500–1000 м. В позднеледниковое время низина была занята озерно-ледниковым водоемом, в котором отлагались ленточные глины, являющиеся основной почвообразующей породой. Ленточные глины подстилаются мореной или водно-ледниковыми песками. Четвертичные отложения в значительной степени нивелировали неровности коренного рельефа, поэтому эта часть водосбора Ладожского озера представляет плоскую, слабо-террасированную равнину, лежащую в пределах абсолютных высот 5–35 м. Ловать-Ильмень-Волховскую низину опоясывают возвышенности высотой до 300 м, где преобладают холмистые ледниковые формы рельефа. С запада и юга это Лужская, Судомская, Бежаницкая и Вязовская возвышенности, с юго-востока — Валдайская возвышенность с абсолютными отметками от 150 до 300 м, с северо-востока — Вепсовская возвышенность и Тихвинская гряда.

2.1.2. Почвенный покров и растительность

На территории водосборного бассейна Ладожского озера распространены следующие элементарные процессы почвообразования: оподзоливание, гумусонакопление, глееобразование, торфонакопление.

Процесс *оподзоливания* развивается в почвах автоморфного местоположения в условиях промывного типа водного режима под хвойными и мелколиственно-хвойными лесами. При разложении растительного опада, бедного зольными элементами и поступающего преимущественно на поверхность почвы, образуются агрессивные органические кислоты. Под их воздействием идет интенсивное кислотное выветривание материнской породы и вынос с нисходящим током влаги продуктов распада минералов в нижние горизонты. Главную роль в разложении первичных и вторичных минералов играют фульвокислоты. По мере вертикальной фильтрации, фульвокислоты насыщаются ионами железа, алюминия и других зольных элементов, их комплексные соединения с этими элементами теряют миграционную способность, выпадают в осадок, формируя на некоторой глубине (30–60 см) иллювиальный горизонт. Непосредственно под подстилкой образуется подзолистый горизонт, состоящий из кварца. На песчаных материнских породах формируются иллювиально-железистые подзолы, по мере увеличения влажности местности — иллювиально-гумусо-железистые подзолы и иллювиально-гумусовые подзолы. На суглинистых и глинистых материнских породах — подзолы и подзолистые почвы без выраженного иллювиально-гумусового горизонта.

Процесс *гумусонакопления* (дерновый процесс) на данной территории возможен в двух случаях:

- 1) высокое содержания в материнской породе щелочноземельных оснований, что влечёт за собой их высокое содержание в растительном опаде;
- 2) поступление органических веществ в почву не только на ее поверхность, но и в толщу почвы при отмирании корневой системы травяной растительности.

Последний процесс протекает под хвойно-лиственными лесами с выраженным подлеском и наземной травяной растительностью. Под лесной подстилкой формируется гумусовый горизонт.

Процесс *глееобразования* идёт в анаэробных условиях при застаивании вод на поверхности почвы или выклинивании почвенно-грунтовых вод в толщу почвы. Из-за анаэробного распада органического вещества в почве развиваются восстановительные процессы, которые увеличивают подвижность железа, марганца, азота, фосфора. На протекание этого процесса в почвах указывает образование характерного горизонта, окрашенного в голубые и зеленые тона. По мощности глеевого горизонта почвы подразделяются на глееватые и глеевые.

Процесс *торфонакопления* идёт в условиях постоянного избыточного увлажнения. При этом минерализация отмерших растительных остатков затруднена, доминирует процесс их консервации. Формирование болотных почв может идти в условиях

избыточного атмосферного увлажнения (верховые болотные почвы) или за счет питания грунтовыми водами (низинные болотные почвы). На территории северо-запада России широко распространен процесс поверхностного заболачивания почв при периодическом застаивании влаги. На поверхности подзолистой или дерново-подзолистой почвы образуется торфянистый горизонт. Как правило, в таких условиях идет сочетание болотного процесса, оподзоливания и оглеения. На материнских породах суглинистого состава развиваются торфянисто-подзолисто-глеевые почвы, на породах легкого механического состава торфяно-подзолистые почвы с иллювиальным гумусовым горизонтом.

На степень проявления элементарных почвообразующих процессов оказывает влияние химический и гранулометрический состав материнских пород, растительный покров, геоморфологические особенности местности. Сочетание элементарных процессов дает большое разнообразие типов почв, которое, в свою очередь, определяет структуру почвенного покрова территории. Важным фактором формирования почвенного покрова является избыточное увлажнение большей части бассейна Ладожского озера, особенно в области распространения озерно-ледниковых и моренных равнин.

Доминирующим типом почвообразования в бассейне Ладожского озера является подзолистый. Его крайнее проявление наблюдается на северо-востоке бассейна, в области распространения подзоны северной тайги. По мере перехода к подзонам средней и южной тайги в почвах наряду с процессом подзолообразования протекает процесс накопления гумуса. В зависимости от интенсивности проявления каждого из этих процессов формируются дерново-подзолистые почвы разной степени оподзоливания, в основном дерново-средне- и сильноподзолистые почвы. В зоне хвойно-широколиственных лесов преобладает процесс гумусонакопления и развиты преимущественно дерново-слабо-подзолистые почвы.

Процесс оглеения почв при условии их избыточного увлажнения может протекать и в зоне тайги, и в зоне хвойно-широколиственных лесов. Степень его проявления и распространения зависит от геоморфологических особенностей местности и гранулометрического состава материнских пород. Этим процессом могут быть затронуты все типы почв: подзолистые, дерново- подзолистые, дерновые, болотные.

Интразональными являются почвы болот. Тип болотных почв (верховые, переходные, низинные) зависит от геоморфологических особенностей местности.

В бассейне Ладожского озера встречаются локальные морены, обогащенные карбонатным материалом из-за близкого залегания коренных осадочных карбонатных пород ордовика и девона (область Балтийско-Ладожского уступа, водосборы рек Шелонь

и Полисть, мелкими контурами в области краевых морен). Здесь формируются азональные для северо-запада карбонатные почвы. Тип почв зависит от содержания карбонатов в материнской породе и глубине их залегания. При глубине залегания карбонатов до одного метра от дневной поверхности в почвах преобладает дерновый процесс и формируются дерново-карбонатные почвы. При глубине залегания карбонатов свыше одного метра начинает проявляться процесс оподзоливания и формируются дерново-карбонатные почвы выщелоченные и оподзоленные, вплоть до образования дерново-подзолистых почв.

К азональным относятся дерновые литогенные почвы на водосборе Онежского озера. Эти почвы развиты под хвойными и мелколиственно-хвойными лесами с мохово-травяным покровом на элюво-делювии коренных пород, богатых силикатами кальция и магния, основных и ультраосновных пород (диабазы, базальты, шунгитовые сланцы). Состав и свойства этих пород препятствуют проявлению подзолистого процесса.

Большая протяженность бассейна Ладожского озера в меридиональном направлении определяет проявление зональности в растительном покрове. Водосбор расположен в зоне тайги и зоне смешанных лесов. Для территории наиболее типичны еловые леса, характер которых существенно меняется с севера на юг – от среднетаежных черничных зеленомошников к южнотаежным с дубравными элементами в травяном покрове и к сложным ельникам с широколиственным подлеском в зоне смешанных лесов. В последней встречаются и широколиственные леса, площадь которых значительно сократилась из-за распашки территории.

Зональный ряд растительных сообществ наиболее четко прослеживается на плакорных местоположениях с суглинистыми бескарбонатными почво-грунтами. Карбонатность почвообразующих пород способствует продвижению растительности, свойственной зоне смешанных лесов, в таежную зону. Типы хвойных лесов зависят от гранулометрического состава почво-грунтов: на песчаных отложениях произрастают сосновые леса, на суглинках и глинах — еловые. Заболоченность лесов сглаживает их зональные различия. На территории бассейна Ладожского озера широко распространены болота. Преобладающим типом болот являются олиготрофные сфагновые верховые болота, менее распространены болота низинного типа (осоковые и осоково-пушицевые).

В зоне тайги различаются три геоботанические подзоны: северная, средняя и южная. Северная тайга занимает северо-восточную часть собственного водосбора Ладожского озера и северную и северо-восточную часть водосбора Онежского озера и ограничена 63° с. ш. Это область сельгового ландшафта, где на более высоких отметках произрастают сосновые леса, а на пониженных элементах рельефа — типичные темнохвойные разреженные еловые леса с примесью березы

Средняя тайга простирается до 60° с. ш., примерно по линии, соединяющей южные границы Ладожского и Онежского озер. В ее пределах наиболее четко выражены особенности растительного покрова этой подзоны: характерны ельники-черничники без подлеска со сплошным покровом зеленых мхов и сомкнутым древостоем.

Южная тайга занимает большую часть бассейна Ладожского озера. Граница между южной тайгой и зоной хвойно-широколиственных лесов идет около 59° с. ш., однако носит условный характер, поскольку климатические условия меняются постепенно, рельеф местности однообразен, велико влияние антропогенного фактора. Коренным типом растительности являются ельники-кисличники с примесью незначительного количества широколиственных древесных пород — клена, вяза, липы. Значительное участие в травяно-кустарничковом ярусе принимают бореальные травянистые растения (кислица, мелкие папоротники, майник). Моховой покров развит слабее, чем в средней тайге.

Зона смешанных лесов характеризуется коренными широколиственно-хвойными лесами. Широколиственные породы представлены дубом, кленом, липой, лещиной, ясенем. Хорошо развит кустарниковый ярус из шиповника, жимолости, бересклета. Более половины занятой лесами площади представлено мелколиственными лесами.

Вынос органического вещества и биогенных элементов. Характеристики подстилающей поверхности определяют природную (фоновую) нагрузку на озеро, формирующуюся за счет выноса с водосбора химических веществ под воздействием стока. На основе результатов многолетних стационарных и полевых исследований на водосборах северо-запада России, подверженных минимальному антропогенному воздействию, выполнена количественная оценка модулей природного выноса органического вещества, общего фосфора и общего азота с водосбора Ладожского озера (Кондратьев и др., 2010). За основу принята схематизация различных типов подстилающей поверхности в области Балтийского кристаллического щита и Русской равнины, представленная на рис. 2.1.2.

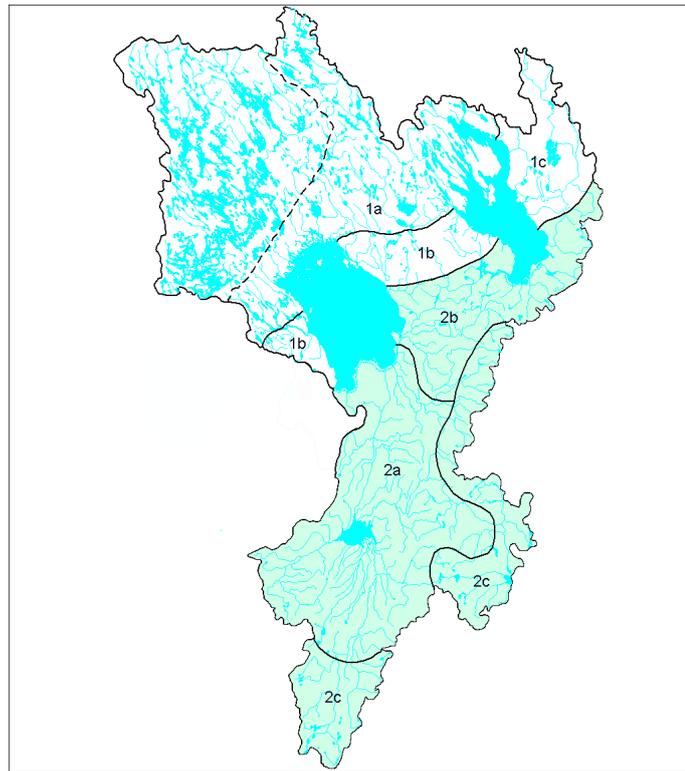


Рис. 2.1.2. Регионализация модулей природного (фонового) выноса органического вещества ($C_{орг}$), общего фосфора ($P_{общ}$) и общего азота ($N_{общ}$) в областях Балтийского кристаллического щита (1) и Русской равнины (2).

Результаты оценки выноса органического вещества и биогенных элементов с различных частей водосбора Ладожского озера содержатся в табл. 2.1.2. Как следует из приведенных материалов, вынос $C_{орг}$ в бассейне Ладожского озера определяется, прежде всего, химическим составом почвообразующих пород и геоморфологическими особенностями ландшафта. В области Балтийского кристаллического щита (районы 1a–1c) значительные колебания модулей выноса $C_{орг}$ ($0,9–8,6 \text{ т км}^{-2} \text{ год}^{-1}$) связаны с разнообразием химического состава кристаллических пород, различной мощностью четвертичных отложений и распространением сельгового ландшафта. В области Русской равнины (районы 2a–2c) модули выноса $C_{орг}$ изменяются в гораздо меньшем диапазоне ($2,0–5,8 \text{ т км}^{-2} \text{ год}^{-1}$), что может быть объяснено выравненностью и однородностью рельефа. Модули выноса $P_{общ}$ на территории бассейна Ладожского озера изменяются в пределах $0,6–14,5 \text{ кг км}^{-2} \text{ год}^{-1}$. Наименьшие их значения относятся к области сельгового ландшафта, развитого на кислых породах ($0,6–6,1 \text{ кг км}^{-2} \text{ год}^{-1}$). Наибольшие ($13–14,4 \text{ кг км}^{-2} \text{ год}^{-1}$) характерны для дерново-литогенных почв (район 1c). В целом вынос $P_{общ}$ связан с интенсивностью миграции $C_{орг}$ в ландшафте. Анализ данных табл. 2.1.2 не позволяет выявить чёткую зависимость выноса $N_{общ}$ от расположения водосборов в области

Балтийского щита или Русской равнины. Наименьшие значения модулей выноса $N_{\text{общ}}$ (от 160 до 300 кг км⁻²год⁻¹) характерны для водосборов, расположенных в холмисто-моренном рельефе (район 2с), наибольшие (от 330 до 550 кг км⁻²год⁻¹) — в районах 1б и 1с. Небольшая амплитуда колебаний значений модулей выноса $N_{\text{общ}}$, по-видимому, является следствием того, что массообмен с атмосферой представляет собой основную составляющую азотного баланса как для водоемов, так и для водосборов изучаемого региона.

Таблица 2.1.2.

Модули выноса органического вещества, общего фосфора и общего азота с водосбора Ладожского озера для различных типов подстилающей поверхности

Номер района (рис. 2.1.2) и характеристика подстилающей поверхности	$C_{\text{орг}}$, т км ⁻² год ⁻¹	$P_{\text{общ}}$, кг км ⁻² год ⁻¹	$N_{\text{общ}}$, кг км ⁻² год ⁻¹
1а – Сельговый ландшафт. Примитивно-аккумулятивные почвы, карликовые подзолы, глееподзолистые почвы, низинные болотные почвы, развитые на делювии кислых изверженных пород.	0,9–2,9	0,6–6,1	250–300
1б – Кристаллический фундамент, перекрытый маломощной толщиной четвертичных отложений. Подзолы и дерново-подзолистые глеевые почвы в сочетании с торфяно-болотными и болотными почвами низинного типа.	4,3–5,0	8,0–10,6	330–550
1с – Дерновые литогенные почвы, иллювиально-железо-гумусовые подзолы, торфяно-болотные почвы, развитые на делювии основных и ультраосновных изверженных пород.	5,3–8,6	13,0–14,4	300–500
2а – Водно-ледниковые и моренные равнины. Сочетание средне и сильноподзолистых почв с дерново-подзолисто-глеевыми и торфяно-подзолисто-глеевыми почвами.	3,9–4,4	5,5–8,2	240–400
2б – Низменный моренный рельеф. Сочетание подзолистых почв, торфяно-подзолисто-глеевых и болотных почв верхового и переходного типов.	5,4–5,8	13,2–13,8	230–450
2с – Возвышенный холмисто-моренный рельеф. Преобладают развитые на промытых карбонатных и безкарбонатных суглинках автоморфные слабоподзолистые и дерново-	2,0–3,3	2,2–2,5	160–300

2.2. Гидрографическая сеть и гидрология

Как отмечалось выше, водосборный бассейн Ладожского озера состоит из водосборов рек Свирь, Вуокса и Волхов, соединяющих Ладогу соответственно с озерами Онежское, Сайма и Ильмень, а также ряда малых рек, впадающих непосредственно в Ладожское озеро (рис. 2.2.1). Значения площадей указанных водосборов приведены в табл. 2.1.2.

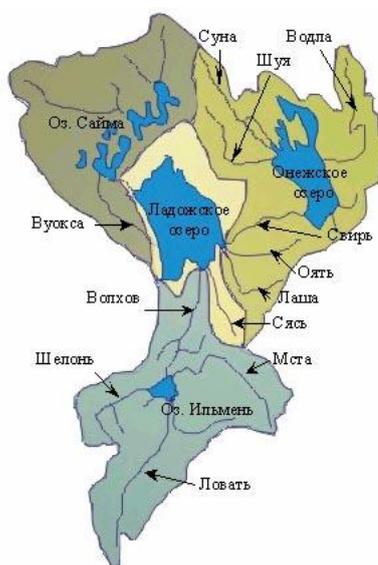


Рис. 2.2.1. Схема водосборов основных притоков Ладожского озера.

Территория бассейна покрыта густой сетью водотоков, многочисленными озерами и обширными болотами. Густота речной сети составляет в среднем $0,45 \text{ км км}^{-2}$. Наиболее значительными водотоками являются реки: Волхов, Свирь, Вуокса, Сясь, Оять, Паша и Мста. В основном водотоки имеют небольшие уклоны (до $20\text{--}40 \text{ см км}^{-1}$) и спокойное течение. Лишь при пересечении кристаллических пород, моренных возвышенностей и гряд на перекатах и порогах скорость течения может резко возрастать. Реки располагаются обычно по наиболее низким участкам — по оси древних днищ водоемов. В период регрессии водоемов здесь существовали заливы или проливы между соседними водоемами. Поэтому основные реки водосбора в настоящее время представляют протоки, через которые крупные озера сбрасывают свои воды.

Водоразделы рек обычно выражены неясно. Истоки нередко довольно близко подходят друг к другу. Часть рек берет начало из крупных озер, часть вытекает из малых озер. Некоторые водотоки берут начало из болотных массивов. Сравнительно редкую

категорию представляют реки, берущие начало из ключей (у подножья Силлурийского плато, по правобережью Мсты, у Боровичей) (Давыдов, 1955). Устья рек, впадающих в водоемы, имеют характер плоских дельт (притоки оз. Ильмень) или лиманов (устье реки Свирь).

Реки бассейна Ладожского озера имеют смешанное питание с преобладанием снегового (от 40 до 50% годового стока) с высоким половодьем, низкой летней и зимней меженью и подъемами уровня воды осенью под влиянием обложных дождей. Эти черты режима рек в ряде случаев нарушаются в результате регулирующего влияния озер, что наиболее ярко проявляется на крупных реках, имеющих характер протоков, соединяющих большие озера.

Озера, занимающие около 14% площади водосбора, играют весьма заметную роль в общем гидрографическом облике данной территории. Наряду с наиболее значительными озерами (Онежское, Ильмень и расположенное на территории Финляндии озеро Сайма) здесь имеется большое количество средних и малых озер. Наиболее ярко выражено скопление озер в системе реки Вуокса, в долине реки Свирь, в верховьях реки Сясь, а наибольшее количество озер и других водоемов — на Карельском перешейке. Большинство озер имеет ледниковое происхождение. Почти все они продолговатой формы, вытянуты с северо-запада на юго-восток, через многие из них протекают реки. На востоке и юго-востоке территории представлены карстовые озера. В Карелии и в бассейне реки Волхов встречаются озера болотного типа, незначительные по площади (не более 0,5–1 км²), с илистым дном. Большинство озер – проточные. Такое скопление озер связано с историей развития рельефа — сравнительной «молодостью» его современной поверхности, позже других районов Европейской территории России освободившейся от ледникового покрова; поэтому сравнительно слабоврезанная речная сеть еще не успела после отступления ледника понизить уровень озер и заполнить наносами их котловины (Соколов, 1964). Преобладают озера, образовавшиеся в результате аккумулятивной и эрозионной деятельности ледника. Котловины малых и средних озер приурочены главным образом к понижениям между моренными грядами и холмами или образованы в результате подпруживания речных долин ледниковыми отложениями.

Почти пятая часть территории (около 17%) занята болотами. Распространению болот способствует избыточная влажность, плоский рельеф и близкое к поверхности залегание грунтовых вод. Более половины общей площади болот — крупные болотные массивы с площадью свыше 1000 га. Крупнейшими из них являются Зеленецкий Мох (60,2 тыс. га в бассейне реки Сясь), Соколий и Гладкий Мох (29,4 тыс. га, между реками

Сясь и Паша). Наибольшее количество болот распространено в бассейнах рек Волхов, Свирь и Вуокса (Соколов, 1964).

2.2.1. Реки

Характеристики водосборов и средние многолетние расходы воды основных притоков Ладожского озера представлены в табл. 2.2.1.

Таблица 2.2.1

Характеристики водосборов и средние многолетние расходы воды притоков
Ладожского озера

Река	Длина, км	Площадь водосбора, км ²	Озерность, %	Заболоченность, %	Расход воды, м ³ с ⁻¹
Свирь*	224	9820 (84400)	1 (12–15)	14	653
Вуокса*	156	7130 (67300)	10	3,6	642
Волхов*	224	13000 (80290)	—	8,7	569
Паша	242	6650	1	18	78
Оять	266	5220	3	11	59
Сясь	260	7330	1	16	65
Янисйоки	126	3900	14	5	41,7
Олонка	87	2620	3	10	35
Хиитолан	60	1370	14	4	10,7
Иййоки	40	318	8	14	1,5
Мийнола	16	230	2	10	5,2
Тохма	74	1600	6	6,6	9,2
Уксунйоки	121	1080	6	9	15
Тулемайоки	55	1720	5	16	21,8
Видлица	67	1320	9	9	18,5
Тулокса	77	900	2	11	8,6
Лава	—	572	—	—	4,2
Назия	—	322	—	—	2,1

Авлога	—	385	—	—	~1
--------	---	-----	---	---	----

Примечание: * — собственный водосбор (от истока из озера до устья), в скобках — общая площадь водосбора.

Наиболее крупными притоками являются Свирь с востока, Волхов и Сясь с юга и Вуокса с запада. Ниже приведено описание наиболее крупных рек водосбора Ладожского озера.

Река Свирь вытекает из Онежского озера и впадает в Ладожское озеро. Большая часть бассейна реки принадлежит бассейну Онежского озера (74%), остальная — частному водосбору реки. Длина реки Свирь — 224 км, площадь ее водосбора (с учетом Онежского озера) 84,4 тыс. км². Средняя ширина реки 180–200 м, средняя скорость течения 1,3–1,5 м с⁻¹, среднегодовой расход воды — 790 м³ с⁻¹. Густота речной сети – 0,52 км км⁻². Наиболее крупными притоками являются Паша и Оять. В долине реки много низин и болот. Устьями рек Свирь, Оять и Паша образуется заболоченная дельта реки Свирь. На реке Свирь находятся две ГЭС: Верхне-Свирская (в 130 км от устья, у впадения реки Ивина) и Нижне-Свирская (в 80 км от устья, у г. Лодейное поле). Река судоходна на всем протяжении и служит частью Волго-Балтийского водного пути и Беломорско-Балтийского канала. Водный режим реки Свирь определяется характером уровня Онежского озера, а также работой Верхне-Свирской, Нижне-Свирской ГЭС, и в нижнем течении — режимом уровня воды Ладожского озера. Нижне-Свирская ГЭС, расположенная на расстоянии около 80 км от устья реки Свирь, построена в 1933 г. Через четыре года, примерно в 120 км от устья Свири, вступила в строй Верхне-Свирская ГЭС. После завершения строительства плотины уровень воды в реке поднялся, и в месте впадения реки Ивина возник Ивинский разлив площадью 183 км². Плотины гидроэлектростанций разделили Свирь на три части. Водный режим верхнего участка реки зависит от состояния Онежского озера, на водный режим нижнего участка существенное влияние оказывает Ладожское озеро, а среднего — режим работы ГЭС. Основное питание реки — воды Онежского озера, в бассейне собственно Свири питание носит смешанный характер с преобладанием снегового. Расход Свири при выходе из Онежского озера составляет около 72% расхода в устье. Онежское озеро обуславливает значительную зарегулированность водного режима Свири. Влияние озера несколько ослабевает под влиянием притоков. Уровненный режим значительно различается в верховьях и низовье реки. Вблизи истока режим уровня Свири следует за режимом уровня Онежского озера. В отдельные годы отчетливо выражено весеннее половодье, характеризующееся небольшими (менее 1 м) подъемами уровня и плавным снижением

уровня до нового весеннего подъема. В другие годы наблюдается значительное повышение уровня воды летом с максимумом в июне – июле. Иногда максимальный уровень воды вызывается зазорами осенне-зимнего периода. В среднем течении весеннее половодье выражено более отчетливо и характеризуется подъемом уровня воды до 3,5 м. Летом при сравнительно устойчивой межи наблюдаются подъемы уровня воды, вызванные дождями. Подъем уровня осенью под влиянием обложных дождей – обычное явление. Сток Свири распределен в году довольно равномерно: весна — 35%, лето — 19%, осень — 28% и зима — 18% от годового объема. Максимальный расход воды реки превышает минимальный в 11 раз. Годовой ход стока и уровня воды в естественных условиях характеризовался высоким весенним половодьем, низкой зимней и летней меженью и летне-осенними паводками, вызываемыми дождями. Внутригодовое распределение стока ниже действующих ГЭС определяется их работой (рис. 2.2.2). Среднегодовой расход реки Свирь в створе XII ГЭС за период 1953–2008 гг. равен $589 \text{ м}^3 \text{ с}^{-1}$.

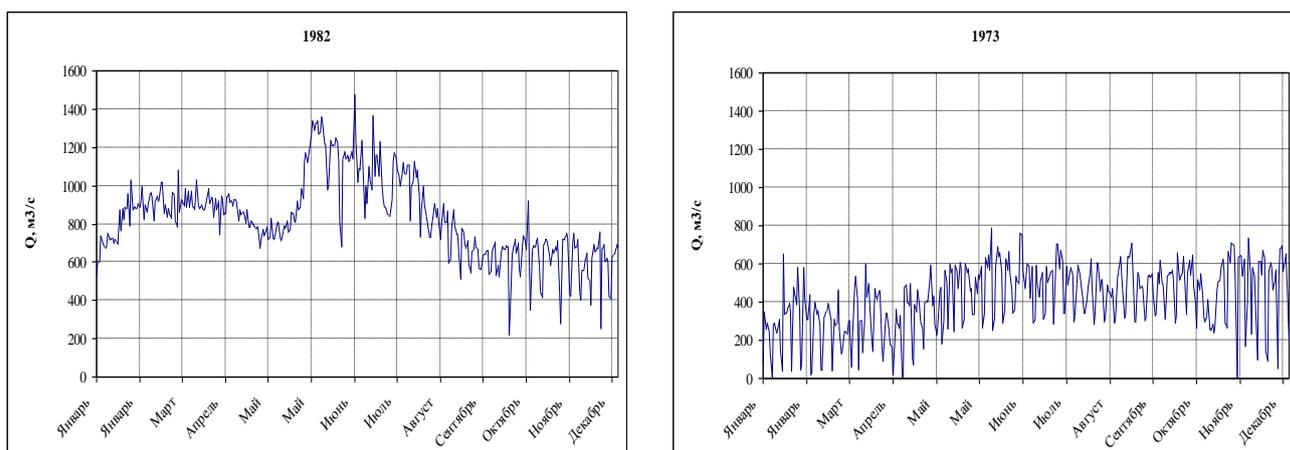


Рис. 2.2.2. Гидрограф стока реки Свирь — XII ГЭС в многоводный (1982) и маловодный (1973) годы.

Свирь имеет своеобразный ледовый режим. Порожистые участки являются местами образования донного льда, шути и зажоров, как правило, на одних и тех же местах. В отдельные годы шуга забивает около 90% живого сечения русла. Подъем уровня во время зажоров достигает 3 м. Продолжительность осеннего ледохода (примерно 14 дней) растет от верховьев к среднему течению (около 30 дней), затем вновь снижается в устье (около 13 дней). Замерзание реки происходит неравномерно, раньше замерзают плесовые участки — во второй половине ноября; порожистые участки покрываются льдом лишь в начале декабря. В отдельные годы сплошной ледяной покров на порогах отсутствует. Из-за порожистости русла в верховьях река замерзает позднее. В суровые

зимы толщина ледяного покрова достигает 0,6 м. Весенний ледоход (вторая половина апреля), наблюдается дважды: раньше проходит речной лед, а затем, несколько позднее - озерный. Продолжительность ледохода в верховьях — 32 дня (из-за поступления льда из Онеги), она быстро снижается до 10 дней в низовье. Затопы льда образуются ближе к устью, что связано с более поздним вскрытием Ладоги.

Основными притоками Свири являются реки *Оять* и *Паша*. Река Оять берет начало в северо-восточных отрогах Валдайской возвышенности и впадает в реку Свирь с левого берега в 15 км от ее устья. Длина реки — 266 км, площадь водосбора составляет 5,22 тыс. км². Река в верховьях маловодна, в среднем течении – порожистая, извилистая и течет в глубокой и широкой долине. Река Паша, наиболее крупный левый приток реки Свирь, берет начало на западном склоне Вепсовской возвышенности (на высоте 115 м), вытекает из озера Паш-озеро, впадает в реку Свирь в 8 км от ее устья и имеет разветвленную сеть притоков. Длина реки Паша — 242 км, средний уклон — 0,44 м км⁻¹, а площадь водосбора реки составляет 6,65 тыс. км². Русло большей частью песчаное, местами каменистое, на порогах галька с валунами или плиты известняка, берега в основном высокие, покрытые хвойными и смешанными лесами.

Реки Оять и Паша имеют смешанное питание с преобладанием снегового. Годовой ход стока и уровней воды характеризуется высоким весенним половодьем, низкой зимней и летней меженью и летне-осенними паводками, вызываемыми дождями. В многоводные годы паводки наблюдаются и в течение летнего периода. Реки замерзают обычно в первой половине ноября, причем образование ледостава на порожистых участках значительно запаздывает и в некоторые годы происходит в первой половине января. Средняя толщина ледяного покрова равна 0,4–0,5 м, а наибольшая достигает 0,8 м. Вскрываются реки во второй половине апреля. На реках в среднем и нижнем течении при замерзании образуются зажоры и затопы льда. Зажоры формируются ниже порожистых участков, а затопы — в хвосте зажоров и местах с малой льдопропускной способностью русла. Образованию затопов льда в устьях Ояти и Паши способствует более раннее вскрытие этих рек по сравнению с рекой Свирь. Толщина льда в зажорах достигает 1 м, а в затопках 3 м, чему соответствуют и большие подъемы уровней: до 6,5 м над меженным уровнем. Подпор от затопов в устье распространяется на расстояние до 8 км. Повторяемость затопов льда на различных участках рассматриваемых рек находится в пределах от 20 до 60%. Средний многолетний годовой расход воды рек Оять и Паша составляет соответственно: 48 и 74 м³ с⁻¹.

Река Сясь берет начало на западном склоне Валдайской возвышенности в Новгородской области и впадает в Ладожское озеро к востоку от устья Волхова. Длина

реки — 260 км, а площадь водосборного бассейна составляет 7,33 тыс. км². В междуречьях Волхов – Сясь и Сясь – Паша находятся наиболее крупные болотные массивы. Средний годовой расход воды за многолетний период 61 м³ с⁻¹. Река имеет смешенное питание с преобладанием снегового. Годовой ход уровня на устьевом участке в значительной степени обусловлен влиянием подпора от Ладожского озера, но весенний подъём уровня зависит от объема речного половодья. Весеннее половодье обычно начинается в марте – начале апреля и продолжается около месяца. Межень наступает в основном в середине или в конце мая. В маловодные годы межень достаточно устойчивая. В многоводные годы наблюдаются осенние паводки (рис. 2.2.3). Большая часть стока приходится на весенний период — 56%. Для Сяси характерен повышенный сток осени, составляющий около 23% годового. Сток зимнего периода — 12%, он больше стока лета (9%). Замерзает река обычно в первой половине ноября, причем образование ледостава на порожистых участках запаздывает и в некоторые годы происходит в середине января. Вскрывается река во второй половине апреля.

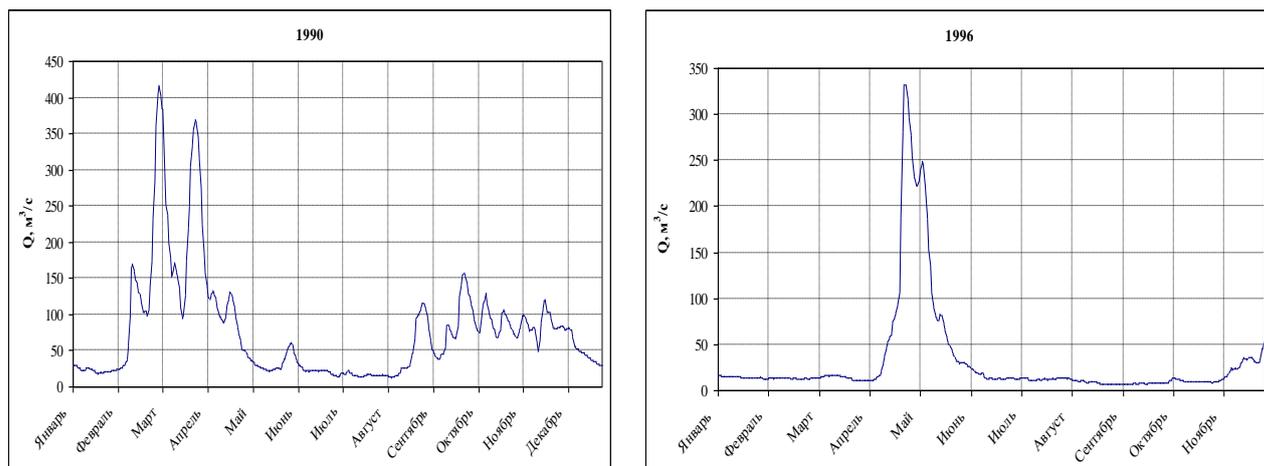


Рис. 2.2.3. Гидрограф стока реки Сясь – д. Яхново в многоводный (1990) и в маловодный (1996) годы.

Река Волхов вытекает из озера Ильмень и впадает в Ладожское озеро с южного берега. Длина реки — 224 км. Устье реки представляет собой рукав шириной 0,5 км. Бассейн озера Ильмень имеет площадь 67,2 тыс. км², а бассейн собственно реки Волхов — 13 тыс. км², что составляет 16% от общей площади водосбора. Средний годовой расход воды за период 1881–2008 гг. равен 569 м³ с⁻¹. В 1926 г. на Волхове в 27 км от устья была построена Волховская ГЭС. Отметка НПУ водохранилища принята равной 15,74 м БС, что несколько выше порога стока реки из озера (примерно 15,0 м). В 1929 г. на гребне плотины была установлена временная надстройка, которая позже была замененная

капитальной, обеспечивающая отметку НПУ 17,25 м БС (при наивысшей допустимой 17,85 м). Таким образом, Волхов на всем протяжении от истока до плотины зарегулирован, находится в зоне переменного подпора и представляет собой русловую часть Волховского водохранилища.

Водный режим реки Волхов характеризуется отчетливо выделяющимися двумя фазами: весеннего половодья и осенне-зимнего паводка, — и достаточно плавным очертанием гидрографа. Пик половодья значительно превышает пик осенне-зимнего паводка. Половодье на реке Волхов является наиболее выраженной фазой водного режима. Подъем уровня воды половодья всегда бывает менее продолжительным, чем спад. Средняя продолжительность подъема составляет 54 суток, тогда как спада — 154. Обычно весенний подъем уровня воды начинается в конце марта – начале апреля и достигает своего максимума в начале мая. Спад весеннего половодья растягивается с мая до сентября – октября. В конце лета – начале осени отмечаются минимальные расходы воды. Осенне-зимние паводки наблюдаются чаще всего в ноябре – первой половине декабря. С декабря по март происходит понижение уровня воды в реке. Графики ежедневных расходов реки Волхов за многоводный и маловодный годы приведены на рис. 2.2.4.

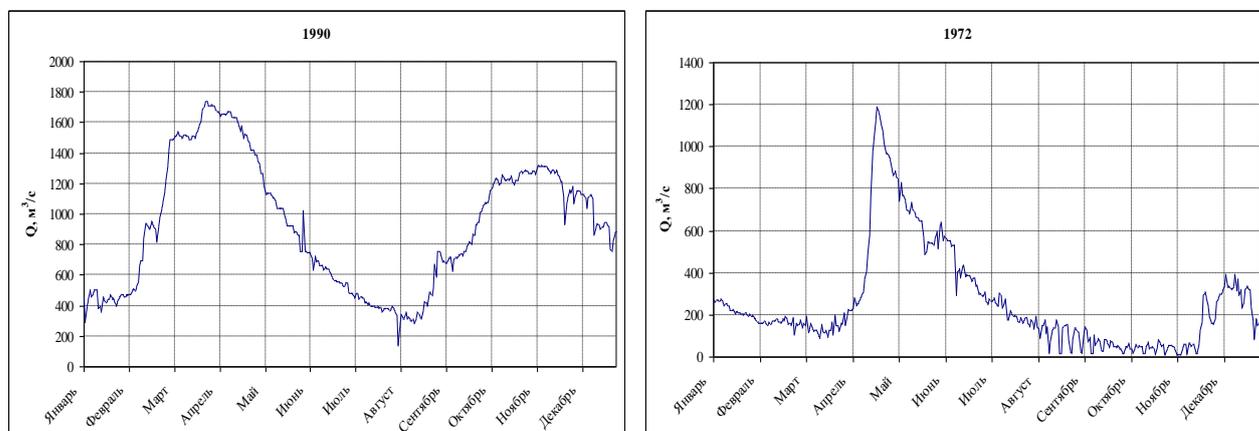


Рис. 2.2.4. Гидрограф стока реки Волхов — VI ГЭС в многоводный (1990) и в маловодный (1972) годы.

Вследствие малых скоростей течения почти на всем протяжении условия замерзания Волхова приближаются к озерным или точнее — лиманным. Замерзание происходит равномерно на всем протяжении реки. Замерзает Волхов в среднем в середине ноября, вскрывается в конце второй декады апреля. Из-за недостаточности для образования заторов ледяного материала и малых скоростей течения заторы льда на реке в период ее вскрытия образуются крайне редко.

Река Вуокса — наиболее крупная река Карельского перешейка. Вуокса берет начало из финского озера Сайма и впадает в Ладожское озеро с его западного берега. Длина Вуоксы — 153 км. Площадь водосбора реки составляет 68,7 тыс. км², на территории Российской Федерации площадь водосбора — 6,69 тыс. км² (около 10%). Русло реки представляет собой сложную систему озер и проток. В реку впадает 12 рек длиной больше 10 км и свыше 500 малых водотоков. Длина всех водотоков составляет примерно 2,2 тыс. км и они, как правило, короткие, не более 20 км. Наиболее крупные притоки Вуоксы — реки Бегуновка, Волчья и Вьюн. В Ладожское озеро река впадает двумя рукавами: северным и южным. Южный рукав является основным, а по северному рукаву проходит незначительная часть стока. До середины прошлого столетия река Вуокса протекала только по северному рукаву. Озеро Суходольское соединялось с Вуоксой, не имея стока в Ладожское озеро. Для поиска новых водных путей в 1818 г. озеро Суходольское было соединено с Ладожским озером (современная река Бурная), что привело к падению уровня озера Суходольское на 6 м, а в 1857 г. озеро было соединено с Вуоксой Лосевской протокой, в результате чего река Бурная превратилась в основной рукав Вуоксы. В бассейне реки не менее 3,5 тыс. озер. Сток реки зарегулирован многочисленными озерами и четырьмя водохранилищами ГЭС. На территории Ленинградской области расположены гидроэлектростанции: Светогорская (г. Светогорск) и Лесогорская (п. Лесогорский). Река Вуокса приносит в Ладожское озеро в среднем 18,8 км³ воды в год, что составляет 28,3% общего притока в Ладожское озеро. На рис. 2.2.5 приведено внутригодовое распределение стока Вуоксы в естественных условиях (до ее зарегулирования).

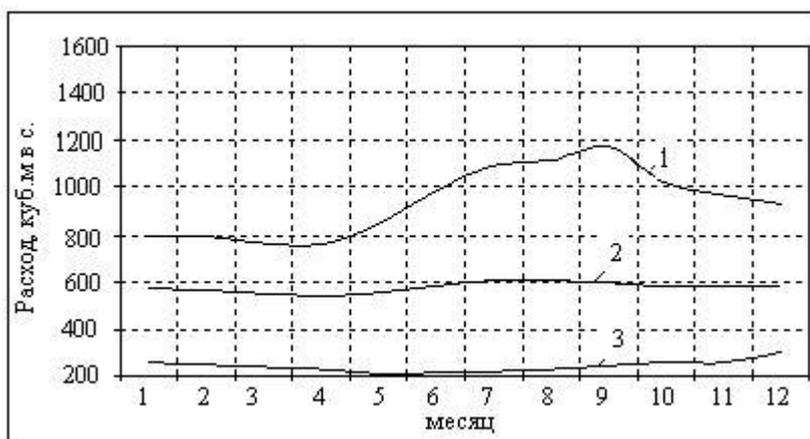


Рис. 2.2.5. Внутригодовое распределение стока реки Вуокса: 1 — многоводный год, 2 — средний по водности год, 3 — маловодный год.

В отличие от большинства рек Северо-Запада, на которых четко выделяется период весеннего половодья, летне-осенней и зимней межени, на Вуоксе наблюдается сглаженный сток в течение всего года. В многоводные годы характерен повышенный сток в теплый период. В настоящее время водный режим реки определяется влиянием озер и работой ГЭС. Наиболее четко прослеживается недельное регулирование стока Вуоксы. Средний годовой расход Вуоксы за период 1945–2008 гг. в створе X ГЭС составил 550 м³/с. Закономерности в сроках наступления дат вскрытия и замерзания по длине реки не наблюдается. Порожистые участки Вуоксы не замерзают в течение всей зимы; на них, как правило, образуются только забереги и ледяные перемычки между выступающими из воды камнями. Замерзание плесов обычно происходит в ноябре – декабре. Вскрытие наступает в среднем в конце апреля – начале мая. Для Вуоксы характерны резкие подъемы уровня воды, обусловленные зажорами и заторами на суженных участках реки.

Реки бассейна Онежского озера. В Онежское озеро впадает более 40 притоков, большинство из которых имеют малую площадь водосбора. Наиболее значительные из них: Шуя, Суна и Водла (табл. 2.2.2).

Таблица 2.2.2

Основные притоки Онежского озера (Давыдов, 1955)

Название	Длина, км	Площадь водосбора, км ²
Шуя	192	9470
Суна	232	7730
Водла	149	13220

Речная сеть южной и северной частей бассейна Онежского озера значительно различаются: северные реки характеризуются слабо углубленными и неразработанными руслами, проложенными в кристаллических породах, изобилующими порогами и водопадами. Продольный профиль их долин еще не выработан. Многие реки северной части бассейна Онежского озера представляют протоки между озерами, расположенными уступами, снижающимися с северо-запада на юго-восток. Другие являются остаточными водотоками бывших больших потоков, спускавших в прошлом воды послеледниковых озер. Эти реки текут в настоящее время по днищу древних водоемов. Для них характерно чередование озеровидных расширений и порожистых участков.

Южные реки характеризуются хорошо разработанными долинами. Течение у них значительно медленнее, озерность незначительна, устья имеют вид эстуария. В верховьях южных рек развиты карстовые явления.

Значительной густотой речной сети характеризуется юго-восточная часть бассейна озера. Чрезвычайно слабо развита сеть притоков на западном побережье озера. Рек здесь почти нет, а имеются лишь ручьи с небольшими водосборами.

Реки бассейна озера Ильмень. Наиболее значительными притоками озера Ильмень являются Мста, Пола, Ловать и Шелонь (табл. 2.2.3).

Таблица 2.2.3

Основные притоки озера Ильмень

Название	Длина, км	Площадь водосбора, км ²
Мста	445	23300
Пола	267	7420
Ловать	530	21900
Шелонь	249	9710

Река Мста имеет самую большую площадь водосбора среди всех притоков озера Ильмень. Истоком Мсты является река Цна, впадающая в проточное озеро Мстино, из которого Мста и вытекает. Река впадает в озеро Ильмень недалеко от истока Волхова. Верхняя часть бассейна Мсты имеет озерность около 3,5%. Нижняя часть бассейна расположена в пределах Приильменской низменности и сильно заболочена. Основные притоки Мсты – левые Березай и Холова, правый – Уверь. Все притоки представляют собой небольшие реки: площадь водосбора самой крупной из них, Увери, — 3,82 тыс. км².

В верхнем течении до впадения Увери Мста протекает в неглубокой долине, представляющей собой ложбину древнего ледникового протока. Ниже впадения Увери Мста образует многочисленные пороги. Между порогами в русле располагаются глубокие плесы. Ниже порогов река течет в узкой и неглубокой долине по Мстинской впадине. Ниже по течению долина реки имеет вид узкого каньона, врезанного в девонские породы. Более широкий каньон, но менее ярко выраженный, располагается ниже с. Белое. Ниже устья реки Велма Мста протекает в узкой и неглубокой долине в пределах Приильменской низменности. В нижнем течении реки пороги отсутствуют. В 29 км от устья Мсты от нее отходит Вишерский канал, а на 11 км от устья — Сиверсов канал, соединяющий Мсту с Волховом. По этому каналу в межень протекает основной расход Мсты. Мста входит в состав Вышневолоцкой системы, являющейся первым искусственным водным путем,

построенным в России в 1703–1709 гг. при Петре I. В прошлом Мста использовалась для судоходства на всем протяжении (Давыдов, 1955).

По характеру водного питания река Мста принадлежит к рекам смешанного типа с преобладанием снегового, со значительной долей дождевого и меньшей — подземного питания. По характеру водного режима Мста относится к рекам восточно-европейского типа. Основная фаза в гидрологическом режиме реки — весеннее половодье, начинающееся в среднем в первой половине апреля. Максимальный уровень воды наблюдается чаще в двадцатых числах апреля, после чего наблюдается спад. Летняя межень устанавливается в июле и продолжается до сентября, когда наблюдаются подъемы уровня воды под влиянием обложных дождей. Летняя межень нарушается дождевыми паводками, которые наблюдаются не каждый год. Средний годовой расход Мсты у д. Девкино равен $184 \text{ м}^3/\text{с}$. Большая часть стока приходится на весну и составляет 54%, сток лета — 11%, осени — 23% и зимы — 12% годового.

Осенний ледоход на ряде участков реки наблюдается не ежегодно, повторяемость его составляет около 25%. Осенний ледоход растянут, прерывист и продолжается от 10 дней до месяца. На порожистых участках образуется внутриводный лед. Замерзает река в последней декаде ноября. Река вскрывается в середине апреля. Средняя продолжительность весеннего ледохода 4–6 дней. На порожистых участках ледоход сопровождается заторами.

2.2.2. Озера

Гидрологический режим большинства естественных озер Ладожского бассейна имеет сходные черты. Режим уровней озер характеризуется максимальным подъемом в период весеннего снеготаяния и относительно устойчивой летней и зимней меженью. Осенью наблюдаются небольшие подъемы уровней, вызванные дождями этого периода. Амплитуда колебания уровня воды озер в основном не превышает 1,5 м, на малых озерах возможны подъемы уровня до 3 м. Наименьшими амплитудами уровней отличаются болотные озера. Прогревание водоемов, как правило, начинается в апреле, максимальных значений температура воды достигает в конце июля. Охлаждение водоемов начинается в августе – сентябре, ледостав устанавливается в зависимости от метеорологических условий в октябре – декабре. Продолжительность ледостава до 180 дней, максимальная толщина льда — до 1 м.

Основными озерами водосбора Ладожского озера являются Онега, Ильмень и Сайма.

Онежское озеро – второе по величине озеро Европы. Водосборный бассейн озера составляет 62,8 тыс. км², основная часть его расположена на территории Республики Карелия. Площадь зеркала озера с островами равна приблизительно 10 тыс. км², без островов — 9,7 тыс. км². Объем водной массы 292 км³ (Ладожское озеро. Мониторинг..., 2000). Показатель удельного водосбора — 6,5. Обмен водной массы озера осуществляется примерно 1 раз в 6 лет. Береговая линия озера в его северной части сильно изрезана и расчленена длинными узкими губами и заливами, вытянутыми с севера на юг. Южная, юго-восточная и западная части береговой линии озера правильны и сглажены. Средняя глубина озера — 31 м, а наибольшая — 120 м.

Дно Онежского озера отличается чрезвычайно сложным строением. Дно озера в прибрежной зоне сложено каменистыми и песчаными грунтами, переходящими постепенно в илистые. Значительная часть дна озера покрыта илом. На акватории озера больше 1300 островов. Преобладающее большинство сосредоточено в северной части озера. Самый большой остров – Климецкий, площадью 148 км² (Давыдов, 1955).

В Онегу впадают около 50 рек и свыше 1000 малых водотоков. Вытекает из озера река Свирь. Озеро служит важным звеном Волго-Балтийского и Беломорско-Балтийского водных путей. Уровень воды в озере зарегулирован водохранилищем Верхне-Свирской ГЭС (площадь зеркала водохранилища равна приблизительно 116 км²).

Прозрачность воды озера различна в разных частях и меняется по сезонам. Преобладающее значение прозрачности 4–5 метров. По характеру термического режима Онежское озеро относится к типу озер умеренных широт с отчетливо выраженной прямой стратификацией летом, обратной — зимой и гомотермией весной и поздней осенью. Обратная стратификация, характерная для зимнего периода, сохраняется до апреля, но в апреле уже наблюдается подледный нагрев воды. В мае, вскоре после вскрытия, происходит весенняя циркуляция воды и намечается прямая стратификация. В июле устанавливается хорошо выраженная прямая стратификация и образуется слой скачка, расположенный на глубине 5–10 м. В июле – августе продолжается дальнейший нагрев слоев, по данным озерных постов, наступает в июле – августе.

Замерзание озера начинается в конце октября в наиболее защищенных от ветра частях прибрежной зоны. Первое появление сала и заберегов, как правило, наблюдается в юго-восточной части озера, затем на севере в концевых частях губ и в заливах, и только во второй и третьей декадах ноября забереги появляются в более открытых частях озера западного и восточного берегов. Устойчивый ледяной покров в центральной глубоководной части устанавливается в последних числах декабря. Весной (в апреле) вдоль берегов образуются закраины, а на юге начинается увеличение большой полыньи от

истоков Свири в сторону озера. В центральной части озера ледяной покров распадается на отдельные поля и льдины. Небольшая часть льда ветром выбрасывается на берег и отмели, образуя торосы высотой до 5 метров. В северных губах лед тает на месте. Из южных районов он прибывает к истоку Свири, где тает иногда в течение месяца. Вынос льда в Свирь незначителен. Окончательное очищение озера ото льда происходит в среднем во второй половине мая; в холодные весны лед в северных частях озера задерживается до июня. В теплую весну озеро очищается ото льда в конце апреля. В среднем продолжительность ледостава в открытой части от 30 до 100 дней, в прибрежной зоне от 130 до 210 дней.

Уровенный режим Онежского озера формировался в естественных условиях до 1951 г., когда была построена Верхне-Свирская ГЭС. Средний годовой уровень за период естественного режима 1884–1951 гг. был равен 0,96 м (над «0» графика), а в 1953–2005 гг. составил 1,31 м. Максимальный средний годовой уровень воды 0,23 м был зарегистрирован в 1940 г. – во время самого низкого стояния уровня Ладоги. После строительства ГЭС уровень воды озера не опускался ниже 0,84 м, а максимальный средний годовой уровень в 1962 г. на 10 см превысил значение 1904 г. Таким образом, в результате ввода в строй ГЭС амплитуда колебания среднего годового уровня воды Онеги сократилась с 1,30 м до 0,79 м. Ход уровня воды озера внутри года характеризуется следующими особенностями. Вскоре после начала снеготаяния и поступления талых вод в озеро по рекам начинается подъем уровня воды. В конце июня достигается максимум, после чего уровень снижается и его спад продолжается до октября. Затем наблюдается подъем, обусловленный влиянием осенних дождевых паводков. Этот подъем достигает максимума в начале зимы, а затем уровень озера постепенно снижается до предвесеннего минимума (конец апреля). Продолжительность весеннего подъема около двух месяцев, высота подъема в среднем 0,5 м. Спад уровня происходит медленно. Иногда падение уровня воды не наблюдается, а идет его непрерывный подъем до осеннего максимума. Меженный уровень воды обычно высок, превышая на 10–20 см зимний, и наступает в среднем в сентябре – октябре. Продолжительность межени летом 2–3 месяца, в дождливое лето она сокращается до 1 месяца. Среднегодовой водный баланс Онежского озера за период 1932–2005 гг. приведен на рис. 2.2.6. В приходной части водного баланса озера преобладает приток воды по рекам — 74,8%, а в расходной части — сток по реке Свирь (84%). Объем осадков на акваторию озера превышает испарение с его поверхности.

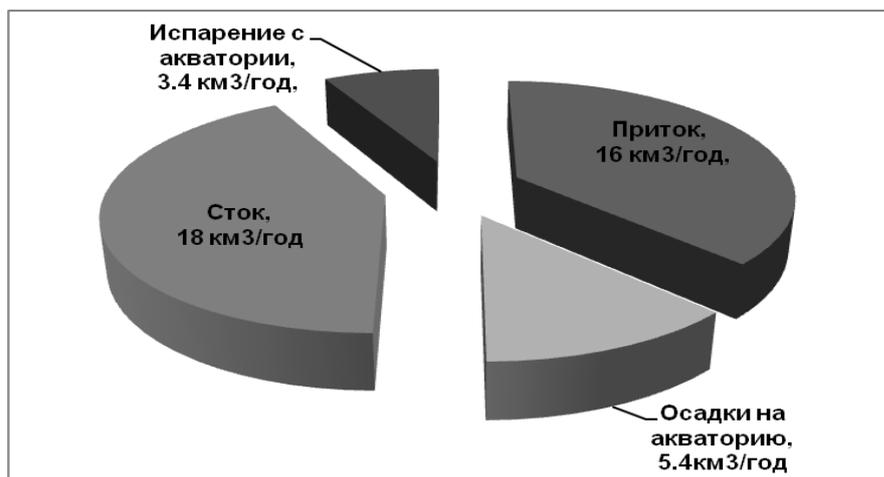


Рис. 2.2.6. Структура среднего многолетнего годового водного баланса Онежского озера.

Озеро Ильмень десятое по площади озеро Европы расположено среди обширной Приильменской низины. Площадь водосборного бассейна озера составляет 67,2 тыс. км². Площадь зеркала, так же как и его глубины, сильно меняется вместе с колебаниями уровня. При низком стоянии уровня воды площадь зеркала озера сокращается до 620 км², при высоком — увеличивается почти в 3,5 раза, достигая 2,2 тыс. км². При среднем многолетнем уровне воды площадь зеркала — 1,1 тыс. км². Коэффициент удельного водосбора при средней многолетней площади озера составляет 61,4. В озере в среднем сосредоточено 2,85 км³ воды. Период водообмена составляет полтора месяца.

Озеро мелкое с плоским дном, покрыто мощным слоем (до 9 м) ила с большим содержанием органического вещества. Прибрежные участки сложены песками. Берега озера преимущественно низкие, заболоченные. Только юго-западный берег, сложенный известняками, высокий и представляет собой обрыв, у подножья которого расположен узкий пляж. Особенно низок и заболочен восточный берег. В значительной степени берега озера созданы дельтами впадающих рек, которые состоят из многочисленных плоских пойменных островов, разделенных протоками.

Вследствие малых глубин вода озера летом хорошо прогревается и наблюдается незначительная прямая стратификация. Наибольшее нагревание происходит в июле. В конце ноября или к началу декабря, после образования ледяного покрова, под влиянием накопленного в толще воды тепла и развивающихся в ней биохимических процессов постепенно происходит нагревание придонных слоев. Это явление обуславливает образование полыньи в истоке Волхова. Замерзает озеро в среднем в конце ноября. От момента появления сала до ледостава проходит от 7 до 30 дней. Вскрывается озеро в конце апреля.

Прозрачность воды невелика — от 0,15 до 1 м.

Среди других водоемов озеро Ильмень отличается большой амплитудой колебания уровня, достигающей за многолетний период 7,4 м. Для годового уровня воды характерно быстрое повышение в период весеннего снеготаяния. Подъем уровня озера начинается в конце марта – начале апреля. Высокий уровень воды обычно держится недолго. Спад растянут и продолжается до сентября. Осенний подъем обычно незначителен. Минимальный уровень чаще всего наблюдается осенью или в конце зимы. Годовая амплитуда уровня воды не превышает 6 м. После сооружения Волховской ГЭС в результате подпора уровень воды озера Ильмень несколько повысился.

Структура водного баланса озера Ильмень за период 1932–2005 гг. (Водные ресурсы..., 2008) приведена в табл. 2.2.4.

Таблица 2.2.4

Структура водного баланса озера Ильмень

Приход	Приток, км ³ год ⁻¹	17,4
	Осадки на акваторию озера, км ³ год ⁻¹	0,70
Расход	Сток по Волхову, км ³ год ⁻¹	17,6
	Испарение с акватории озера, км ³ год ⁻¹	0,57
Изменение объема	км ³ год ⁻¹	0,02

Озеро Сайма, четвертое по площади зеркала озеро Европы, представляет собой систему озер в юго-восточной части Финляндии. Котловины озер тектонического происхождения, расширены и сглажены покровным ледником. Площадь озера составляет 4,38 тыс. км² (www.tem.fi/island), максимальная глубина озера — 86 м, средняя — 17 м. Площадь водосбора — 62,2 тыс. км². Коэффициент удельного водосбора равен 14,2. В озере содержится около 36 км³ воды. Время условного водообмена составляет около двух лет. Берега озера сильно изрезаны, часто скалисты. Длина береговой линии около 15 тыс. км. На акватории расположено несколько тысяч островов, имеющих различную площадь. Иногда название Сайма относят только к южной части озера площадью 1,7 тыс. км². Максимальный уровень воды в озере наблюдается летом, минимальный — ранней весной. Сайма покрыта льдом с декабря по май. Сайменским каналом Сайма соединена с Финским заливом. Из озера вытекает река Вуокса

2.2.3. Оценка стока воды на основе гидрологической модели

В случае отсутствия данных натуральных наблюдений характеристики стока могут быть рассчитаны с использованием гидрологической модели. Схема такой модели, разработанной в Институте озероведения РАН (Кондратьев, Шмакова, 2005), приведена на рис. 2.2.7. Модель описывает процессы снегонакопления и снеготаяния, испарения и увлажнения почв зоны аэрации, формирования стока с разделением на быструю (поверхностную и подповерхностную) и медленную (грунтовую) составляющие. Форма гидрографа стока в значительной степени определяется озерностью водосбора, т. е. процентом площади водосбора, занятой озерами. В процессе моделирования водосбор представляется в виде однородной имитирующей емкости, накапливающей поступающую воду и затем постепенно ее отдающей. Модель может работать как с месячным шагом по времени, так и с годовым.



Рис. 2.2.7. Схема гидрологической модели водосбора и водного баланса водоема (Кондратьев, Шмакова, 2005).

Верификация гидрологической модели выполнена на ряде водосборов бассейна Ладожского озера и Финского залива (Кондратьев, Шмакова, 2005; Кондратьев, 2007; Кондратьев и др., 2010). На рис. 2.2.8 приведены результаты расчетов гидрографов стока с водосбора реки Тигода (створ Любань), имеющего относительно небольшую площадь водосбора (589 км²) и незначительную озерность, а также с водосбора реки Нева (створ Новосаратовка) общей площадью около 281 тыс. км² и озерностью 6,4%. Следует обратить внимание на различную форму гидрографов стока рассмотренных рек. Соотношение максимальных и минимальных расходов зависит от зарегулированности (озерности) водосбора. Если для Тигоды значения расходов воды в период весеннего половодья могут быть в десятки и даже сотни раз выше меженных расходов, то для Невы — не более чем в 2–3 раза. Как видно из приведенных графиков, используемая гидрологическая модель учитывает указанные особенности формирования стока.

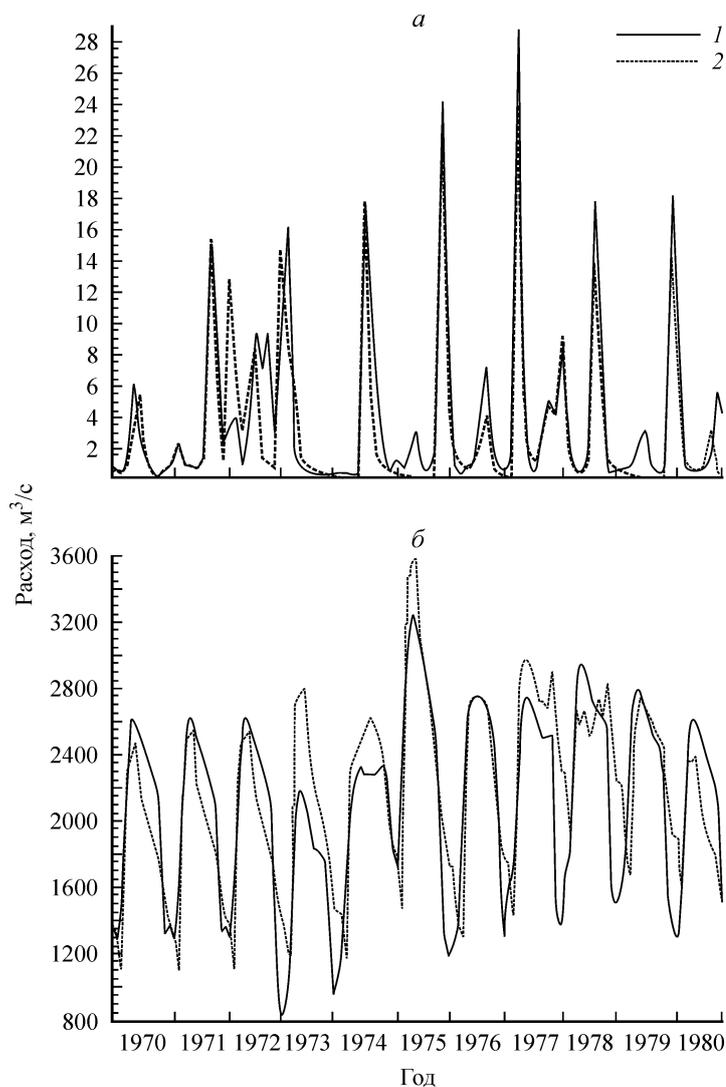


Рис. 2.2.8. Измеренные (1) и рассчитанные (2) расходы воды для реки Тигода (а) и Невы (б).

2.3. Формирование нагрузки на водосбор и озеро

Нагрузка на водный объект – это количество вещества, поступившего в водоем за рассматриваемый интервал времени и, возможно, пересчитанное на единицу площади акватории или объем водной массы. Суммарная нагрузка состоит из внешней нагрузки, сформированной в результате поступления веществ извне, и внутренней нагрузки, сформированной за счет образования веществ внутри водного объекта или в результате их поступления из донных отложений. По отношению к источникам формирования внешняя нагрузка разделяется на точечную и рассредоточенную (диффузную). Точечная нагрузка формируется за счет сбросов очищенных и неочищенных сточных вод промышленных,

муниципальных и сельскохозяйственных предприятий. Рассредоточенная нагрузка формируется за счет выноса веществ со всей площади водосбора. Это эмиссия химических веществ из почв, смыв поверхностных загрязнений.

В зависимости от происхождения источника нагрузка может классифицироваться как естественная или антропогенная. Основным источником формирования естественной нагрузки является вынос химических веществ с естественных ландшафтов (лесов, болот, лугов естественного происхождения и др.) под воздействием дождевого и талого стоков. Антропогенная составляющая складывается из сбросов сточных вод промышленных, муниципальных и сельскохозяйственных предприятий, а также выноса растворенных и взвешенных примесей с сельскохозяйственных угодий, пашень, пастбищ, удобряемых и заброшенных территорий.

Впервые понятие нагрузки было введено Сойером (Sawyer, 1947) в рамках исследования зависимости трофического уровня водоема от массы поступающего в него фосфора и азота. Позже широкое распространение получили задачи, связанные с оценкой нагрузки разнообразными химическими веществами (металлы, нефтепродукты, токсиканты и др.). В «классическом» представлении нагрузка имеет размерность $[ML^{-2}T^{-1}]$, где M — масса, L — расстояние, T — время, т. е. поступление вещества пересчитывается на единицу площади. Затем в практику лимнологических исследований введено понятие объемной нагрузки (Гусаков, 1987), т. е. нагрузки на единицу объема озера $[ML^{-3}T^{-1}]$. Часто используется также понятие водной нагрузки (Vollenweider, 1975; Расплетина, Гусаков, 1982; Расплетина, 1984), по сути, представляющей собой слой стока с водосбора, пересчитанный на площадь акватории водоема. В последующие годы с легкой руки зарубежных исследователей (Pitkänen et al., 1999) термин «нагрузка» стал использоваться для обозначения поступления вещества в водный объект в целом, в этом случае размерность нагрузки составляет $[M T^{-1}]$. В настоящей работе, возможно, не уделено должного внимания сохранению первоначальной терминологии, и понятие «нагрузка» используется в широком смысле этого слова, т. е. охватывает все перечисленные выше возможные значения.

Одной из основных экологических проблем Ладожского озера и водоемов их водосборного бассейна является антропогенное эвтрофирование (Антропогенное эвтрофирование..., 1982), интенсивность которого зависит, в основном, от фосфорной нагрузки на водоем. Поэтому одним из основных изучаемых химических элементов являются фосфор и его соединения.

1.3.1. Внешняя нагрузка на озеро по данным наблюдений

Как отмечалось ранее, приток воды в озеро по рекам составляет более 85% всей приходной части водного баланса Ладоги. При этом около 90% от общего притока поступает по трем крупнейшим рекам: Свири, Волхову и Вуоксе. Вынос химических веществ с водой рек в озеро можно рассматривать как интегральный показатель природных условий водосбора и хозяйственной деятельности на его территории.

В Главе 5 подробно показано, что конце 1970-х – начале 1980-х гг. фосфорная нагрузка на Ладогу с речным стоком составляла 6–7 тыс. т Р год⁻¹, в настоящее время в озеро поступает 3–4 тыс. т Р год⁻¹ в зависимости от водности года, из которых около 50% – природная составляющая. Критическая концентрация Р_{общ} в воде Ладожского озера, соответствующая критической нагрузке на водоем, оценивается в 31 мкг л⁻¹. Указанное значение близко к концентрациям, наблюдавшимся в конце 1970-х гг. Уменьшение фосфорной нагрузки на озеро привело к снижению его концентрации в озерной воде и уменьшению отношения критической концентрации общего фосфора к его среднему содержанию до 0,5. Азотная нагрузка на Ладожское озеро не превышает 5 г м⁻²год⁻¹, какого-либо отчетливого тренда в изменении азотной нагрузки не прослеживается.

Межгодовые колебания концентраций общего органического углерода в воде рек невелики, а вынос его в озеро составляет примерно 1 млн. т. год⁻¹. Среди металлов в химическом составе вод притоков Ладожского озера важную роль играют железо, алюминий, марганец, медь, свинец, кобальт, цинк. В среднем за год в озеро с водами рек поступает около 46,2 тыс. т железа, 10,6 тыс. т алюминия, 5,1 тыс. т марганца, 0,56 тыс. т меди, 1,08 тыс. т цинка. Рассчитанные значения поступления нефтеуглеводородов в Ладожское озеро с речным стоком в настоящее время составляют около 6–7 тыс. т год⁻¹. При этом современный вынос нефтеуглеводородов притоками примерно в 3 раза превышает уровень выноса 1993 г. Наибольшее поступление фенолов (около 300 т год⁻¹) зафиксировано в 1993 г. В последующие годы фенольная нагрузка на озеро постепенно снижалась и в настоящее время составляет приблизительно 70–80 т год⁻¹.

2.3.2. Точечные источники антропогенной нагрузки

Основными точечными источниками загрязнения Ладожского озера и водных объектов его водосбора являются сточные воды промышленных, муниципальных и сельскохозяйственных предприятий. Количественная оценка нагрузки на водосбор,

сформированной точечными источниками L_p , может выполняться с использованием достаточно простых расчетных зависимостей следующего вида: $L_p = N_p k_p k_t$, где N_p — количество «нагрузкоформирующих единиц», то есть единиц производимой продукции (для промышленных предприятий), голов домашних животных и птицы (для ферм и птицефабрик), жителей (для муниципальных очистных сооружений), k_p — коэффициент эмиссии химического вещества нагрузкоформирующей единицей, k_t — коэффициент, характеризующий снижение концентрации химических веществ в сточных водах после очистки. Для промышленных и сельскохозяйственных предприятий значения указанных параметров уравнения рекомендуется оценивать на основе планов выпуска продукции, поголовья животных и существующих норм водоотведения (Временные..., 1988). Очевидно, что для оценки нагрузки от точечных источников на крупные водосборы необходим значительный объем исходной информации о произведенной продукции, технологических особенностях производства, водопотреблении, технологи очистки сточных вод и т. д. При этом объемы, состав и динамика сбросов загрязненных сточных вод определяются технологическими, социально-экономическими и другими факторами, не всегда имеющими научное объяснение. Возникают трудности при сборе исходных данных и выполнении последующих оценок. Поэтому при выполнении расчетов формирования нагрузки на крупные водные объекты вклад точечных источников описывается приближенно, на основе официальной отчетной статистической информации о проведенных сбросах и в соответствии с официальными перспективными планами совершенствования системы очистки сточных вод на рассматриваемых предприятиях. Несанкционированные и нерегулярные сбросы могут быть учтены только при наличии достоверной информации, что случается крайне редко. В настоящее время основным официальным источником информации о сбросах сточных вод являются статистические формы 2-ТП Водхоз Министерства природных ресурсов и экологии. Данные, содержащиеся в этих формах, приводятся с годовым осреднением, что накладывает соответствующие ограничения на расчетные схемы и математические модели, в которых эти данные используются.

Не все химические вещества, сброшенные в водные объекты водосборного бассейна, достигают Ладожского озера. Часть из них удерживается озерами и гидрографической сетью. Так, по результатам выполненных расчетов (Кондратьев, 2007) Онега и Ильмень удерживают соответственно 76 и 50% поступающего в них фосфора. Сама же Ладога удерживает до 70% фосфорной нагрузки. Методы расчета удержания биогенных веществ и некоторых металлов водными объектами изложены в работе Кондратьева и др. (2010).

На рис. 2.3.1 и 2.3.2. представлена динамика нагрузки $P_{\text{общ}}$ и $N_{\text{общ}}$ на водосбор Ладожского озера (по данным форм 2-ТП Водхоз) с выделением сбросов непосредственно в озеро. Аналогичные графики для нагрузки нефтяными углеводородами и некоторыми металлами приведены на рис. 2.3.3–2.3.6. Приведенные данные показывают, что в начале 1990-х гг. на водосборе Ладожского озера в водные объекты сбрасывалось до 1 тыс. т $P_{\text{общ}} \text{ год}^{-1}$. При этом непосредственно в озеро поступало 30–40 т. Последующий распад СССР и экономический кризис в нашей стране привели к резкому сокращению промышленного и сельскохозяйственного производств. Сократилось число предприятий и соответствующим образом снизилась нагрузка. В начале XXI в. ситуация несколько стабилизировалась, и в настоящее время точечная нагрузка на водные объекты водосбора Ладожского озера составляет около 250 т $P_{\text{общ}} \text{ год}^{-1}$, из них непосредственно в озеро сбрасывается 20–30 т, т. е. около 5% от значения суммарной фосфорной нагрузки на водосбор. Снижение нагрузки от точечных источников загрязнения является одной из основных причин снижения общей фосфорной нагрузки на Ладожское озеро. Аналогичные тенденции характерны и для нагрузки другими рассмотренными химическими веществами (общим азотом, нефтепродуктами, марганцем, медью, железом).

Как отмечалось ранее, в настоящее время в Ладожское озеро с водосбора поступает приблизительно 6–7 тыс. т нефтепродуктов в год, что в 3 раза превышает уровень выноса 1990–х гг. В тоже время официальная государственная статистика по сбросам точечных источников представляет совершенно другую, снижающуюся тенденцию (рис. 2.3.3). Приводимые в 2-ТП Водхоз значения более чем на порядок меньше нагрузки, рассчитанной по данным наблюдений на притоках. Из сказанного следует, что либо на водосборе существуют интенсивные и неучтенные официально источники поступления нефтяных углеводородов в поверхностные воды водосбора, либо официальные статистические формы не отражают объективную ситуацию по сбросам загрязняющих веществ в водные объекты изучаемой территории.

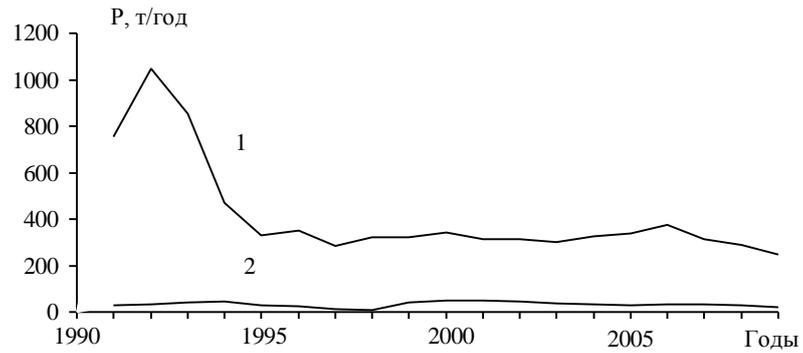


Рис. 2.3.1. Сбросы $P_{\text{общ}}$ точечными источниками в водные объекты водосбора (1), в том числе – непосредственно в озеро (2).

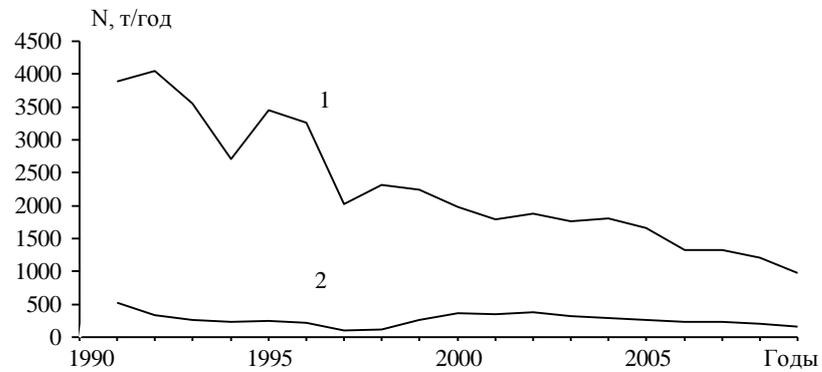


Рис. 2.3.2. Сбросы $N_{\text{общ}}$ точечными источниками в водные объекты водосбора (1), в том числе – непосредственно в озеро (2).

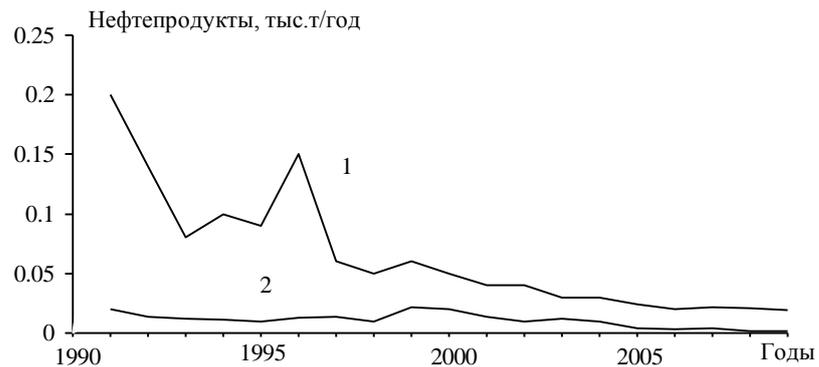


Рис. 2.3.3. Сбросы нефтепродуктов точечными источниками в водные объекты водосбора (1), в том числе – непосредственно в озеро (2).

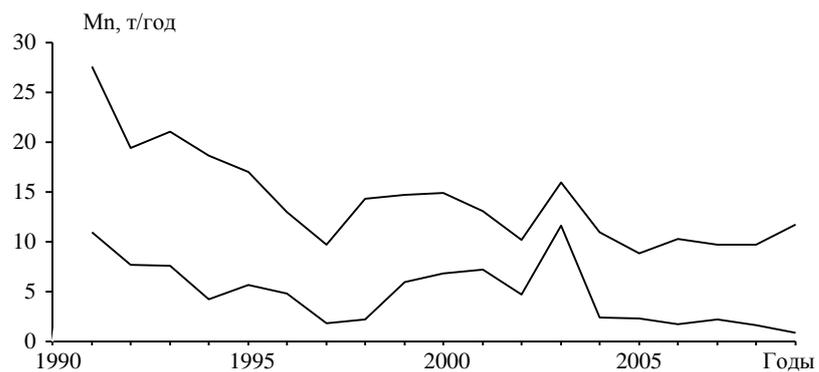


Рис. 2.3.4. Сбросы марганца точечными источниками в водные объекты водосбора (1), в том числе – непосредственно в озеро (2).



Рис. 2.3.5. Сбросы меди точечными источниками в водные объекты водосбора (1), в том числе – непосредственно в озеро (2).

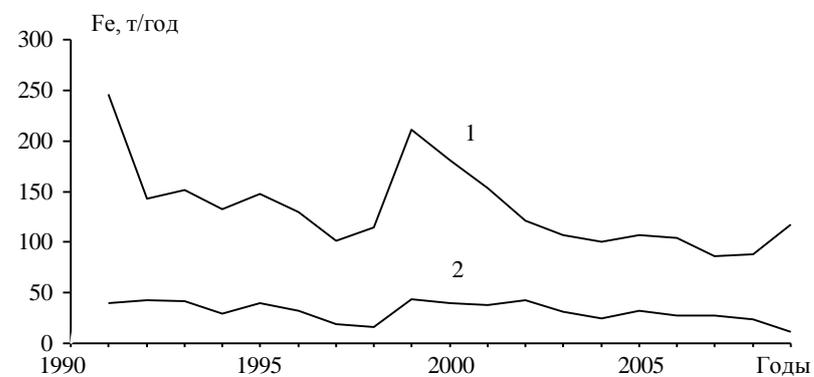


Рис. 2.3.6. Сбросы железа точечными источниками в водные объекты водосбора (1), в том числе – непосредственно в озеро (2).

2.3.3. Рассредоточенная нагрузка

Одной из наиболее значимых составляющих внешней нагрузки на водные объекты является вынос химических веществ с различных типов подстилающей поверхности водосборной территории под воздействием дождевых и талых вод. Такое поступление химических элементов в реки и водоемы получило название рассредоточенной, или диффузной нагрузки. В отличие от нагрузки точечными источниками загрязнения (сбросы промышленных, сельскохозяйственных и муниципальных предприятий) рассредоточенная нагрузка в значительной степени определяется характеристиками подстилающей поверхности и гидрометеорологическими факторами. Рассредоточенная (диффузная) нагрузка на водные объекты водосбора Ладожского озера L_d формируется за счет эмиссии подстилающей поверхностью L_e , внесения минеральных удобрений L_{fert} , воздействия животноводства и птицеводства L_{an} , атмосферного выпадения на поверхность водных объектов водосбора L_{at} и выноса веществ за пределы водосбора с выращенным урожаем L_{crop} : $L_d = L_e + L_{fert} + L_{an} + L_{at} - L_{crop}$.

Количественная оценка биогенной нагрузки L_e , сформированной в результате эмиссии с различных типов подстилающей поверхности, может быть проведена по формуле $L_e = \sum_i k_i F_i$, где k_i — коэффициент эмиссии общего фосфора в водные объекты i -го типа подстилающей поверхности, имеющей площадь F_i . Определение значений k_i , зависящих от характеристик подстилающей поверхности, обычно проводится на основе обобщения и анализа материалов полевых исследований. В табл. 2.3.1 приведены значения коэффициентов эмиссии k_i общего фосфора и общего азота для различных типов подстилающей поверхности (Алябина, Сорокин, 1997; 2001; Rekolainen, 1989), которые успешно использовались при расчетах выноса биогенных веществ с водосбора Ладожского озера (Кондратьев, 2007).

Таблица 2.3.1.

Коэффициенты эмиссии ($\text{кг км}^{-2} \text{ год}^{-1}$) $P_{общ}$ и $N_{общ}$ в стоке с различных типов подстилающей поверхности

Подстилающая поверхность	Смешанная	Лес	Болото	Пахотные земли	Урбанизированная территория
--------------------------	-----------	-----	--------	----------------	-----------------------------

$P_{общ}$	26	5	0,5	16	57
$N_{общ}$	300	250	350	1500	800

Достаточно высокие значения коэффициентов эмиссии для урбанизированных территорий (табл. 2.3.1) представляют вклад рассредоточенного сельского населения, не имеющего подключения к канализационным сетям и очистным сооружениям.

Динамика полевых (пахотных) площадей, формирующих, в соответствии с данными табл. 2.3.1, значимый вклад в рассредоточенную биогенную нагрузку, представлена на рис. 2.3.7. Здесь отражена та же ситуация, которая повлияла на снижение нагрузки от точечных источников. В результате экономического кризиса 1990-х гг. площади сельскохозяйственных полей в изучаемом регионе сократились более чем на 2,5 тыс. км², что естественно привело к снижению выноса биогенных веществ с водосбора.

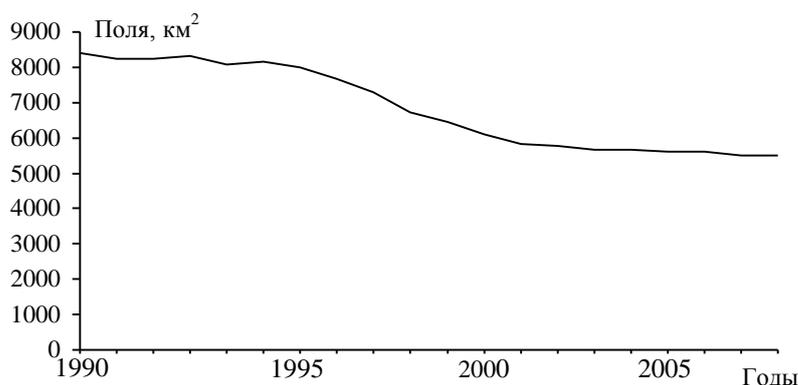


Рис. 2.3.7. Динамика площади сельскохозяйственных полей на водосборе Ладожского озера.

Минеральные удобрения, вносимые на сельскохозяйственные угодья, являются важной компонентой рассредоточенной биогенной нагрузки на водосбор. Выполнять расчет поступления биогенных веществ на водосбор с минеральными удобрениями L_{fert} можно на основе разработанных региональных нормативов их внесения (Справочник..., 1976). Однако в современных условиях реальное внесение минеральных удобрений гораздо ниже рекомендованных значений. Поэтому в расчетах целесообразно использовать информацию, предоставляемую Государственными статистическими организациями. Так, для Ленинградской области источником необходимых данных могут

являться статистические отчеты Комитета по агропромышленному и рыбохозяйственному комплексу Ленинградской области (Основные..., 2008). Если в 1990 г. на 1 га сельскохозяйственных угодий Ленинградской области было внесено около 200 кг минеральных удобрений, то в 2007 г. указанное значение составило 43 кг.

Животноводческие фермы и птицефабрики оказывают воздействие на биогенный баланс водосборов как источники биогенных веществ, содержащихся в навозе и помете. Их последующее хранение и использование в качестве органических удобрений является причиной возникновения еще одной значимой компоненты биогенной нагрузки. Если предположить, что весь образовавшийся на фермах и птицефабриках навоз и помет остается в пределах рассматриваемого водосбора, то приближенная оценка нагрузки L_{an} выполняется следующим образом: $L_{an} = \sum_j k_j N_j$, где k_j – коэффициент эмиссии вещества от одного домашнего животного j -го наименования, N_j – количество домашних животных (или птицы). Нормативные значения коэффициентов k_j для различных домашних животных и птицы представлены в работах (Васильев, Филиппова, 1988; Свод правил ..., 2007) и содержатся в табл. 2.3.2. Динамика поголовья крупного рогатого скота (КРС) на водосборе Ладожского озера представлена на рис. 2.3.8 и иллюстрирует снижение численности КРС более чем на 60% за период с 1990 г. по настоящее время.

Таблица 2.3.2

Коэффициенты эмиссии (кг год⁻¹) $P_{общ}$ и $N_{общ}$ одного домашнего животного и птицы.

Наименование	$P_{общ}$	$N_{общ}$
Крупный рогатый скот	18,9	77,1
Свиньи	3,36	14,4
Куры	0,28	1,14

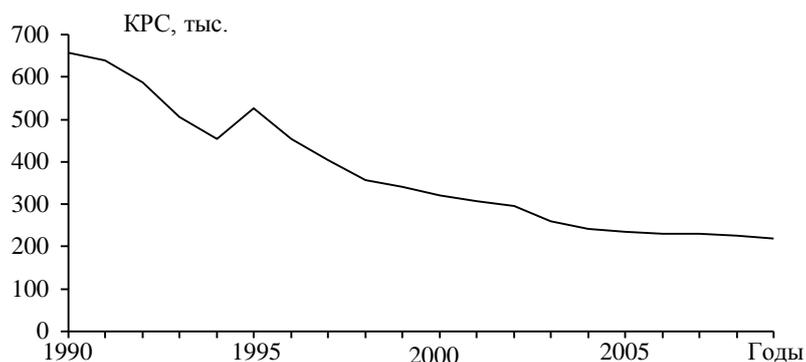


Рис. 2.3.8. Количество голов крупного рогатого скота на водосборе Ладожского озера.

При этом следует помнить, что очистные сооружения животноводческих ферм и птицефабрик отнесены к точечным источникам загрязнения, так как сведения об их сбросах обычно включаются в формы статистической отчетности 2-ТП Водхоз.

Для количественной оценки выноса химических веществ за пределы водосбора с собранным урожаем L_{crop} используется следующая расчетная зависимость:

$$L_{crop} = \sum_s K_s U_s A_s,$$

где K_s — вынос химического вещества с растительной массой урожая

s -вида сельскохозяйственной культуры, U_s — урожайность s -вида сельскохозяйственной культуры, A_s — площадь, занятая s -видом сельскохозяйственной культуры. Рекомендованные значения параметра K_s для различных сельскохозяйственных культур содержатся в специальной литературе (Рекомендации, 1989; Хрисанов, Осипов, 1993). Можно отметить, что в Ленинградской области урожайность зерновых и картофеля практически не изменились за период с 1990 г. (22,9 ц га⁻¹ в 1990 г. и 29,5 ц га⁻¹ в 2007 г. по зерновым и 141 ц га⁻¹ в 1990 г. и 140 ц га⁻¹ в 2007 г. по картофелю). А урожайность овощей открытого грунта существенно возросла с 227 ц га⁻¹ в 1990 г до 326 ц га⁻¹ в 2007 г. (Основные показатели..., 2008). Соответственно увеличился вынос биогенных веществ с урожаем, что способствовало снижению биогенной нагрузки на озеро.

Информация о выносе биогенных веществ с урожаем также может быть получена из расчетов биогенного баланса сельскохозяйственных территорий, выполненных ответственными региональными органами.

Атмосферные выпадения оцениваются как с помощью методов математического моделирования атмосферного переноса примесей, так и по результатам непосредственных измерений химического состава жидких и твердых атмосферных выпадений. С начала 1970-х г. в Европе работает Программа ЕМЕП (Европейская совместная программа

мониторинга и оценки переноса воздушных загрязнений на большие расстояния) (<http://www.emep.int>). В рамках исследований по Программе ЕМЕР разработан ряд моделей, описывающих атмосферный перенос и выпадения на подстилающую поверхность химических, аэрозольных и радиоактивных загрязнений. Модели позволяют оценить уровень фоновых выпадений, сформированных не только близлежащими выбросами, но и расположенными на значительном расстоянии. Однако в реальности всегда имеются неучтенные при моделировании точечные и рассредоточенные источники эмиссии загрязняющих веществ в атмосферу, которые, возможно, никак не влияют на трансграничный перенос примесей, но существенно воздействуют на конкретный водоем или его водосбор, расположенные в зоне выбросов.

Натурное измерение атмосферной нагрузки обычно связано с гидрохимическим анализом проб осадков и последующей интерполяцией и экстраполяцией данных. В исследованиях Института озераведения РАН для акватории Ладожского озера получены следующие оценки атмосферной составляющей биогенной нагрузки: $2 \text{ кг } P_{\text{общ}} \text{ км}^{-2} \text{ год}^{-1}$ и $465 \text{ кг } N_{\text{общ}} \text{ км}^{-2} \text{ год}^{-1}$ (Кондратьев и др., 1997; Ладожское озеро..., 2002). По данным экспериментальных исследований Института водных проблем Севера РАН для условий Карелии атмосферная нагрузка биогенными веществами составляет $3,12\text{--}13,8 \text{ кг } P_{\text{общ}} \text{ км}^{-2} \text{ год}^{-1}$ и $160\text{--}465 \text{ кг } N_{\text{общ}} \text{ км}^{-2} \text{ год}^{-1}$ (Лозовик, Потапова, 2006).

Гораздо менее изученными являются вопросы, связанные с расчетами биологической фиксации и улетучивания азота для крупных речных водосборов, характеризующихся неоднородной ландшафтной структурой и сельскохозяйственной освоенностью. В ряде работ приводятся сведения о коэффициентах биологической фиксации азота некоторыми сельскохозяйственными культурами (Behrendt, Dannowski, 2007). Однако этой информации оказывается явно недостаточно для проведения расчетов азотного баланса водосборов северо-запада России. Исследования улетучивания азота с поверхности крупных гетерогенных водосборов пока не доведены до стадии создания соответствующих расчетных методов, описывающих весь комплекс физико-химических преобразований соединений азота, оказавшихся по разным причинам на поверхности водосбора или в приповерхностном почвенном слое. Поэтому на настоящем этапе создания и развития модели выноса биогенных веществ с водосбора Ладожского озера использовано предположение о равенстве значений поступления азота из атмосферы (выпадения с осадками + фиксация биотой) и улетучивания в результате денитрификации (Behrendt, Dannowski, 2007). Дальнейшие исследования биогенных балансов водосборов должны привести к созданию более детальных научно-обоснованных расчетных методов,

использующих значения физико-химических характеристик подстилающей поверхности и атмосферы.

2.3.4. Природная и антропогенная составляющие нагрузки

Природная (естественная, фоновая) нагрузка биогенными веществами формируется за счет выноса с необрабатываемых земель и части выноса с обрабатываемых земель, происходящего независимо от сельскохозяйственной деятельности. Таким образом, в соответствии с требованиями Хельсинкской Комиссии – ХЕЛКОМ (Guidelines..., 2005), общее направление расчетов фоновой нагрузки заключается в выявлении вклада различных (природных и антропогенных) источников в формирование нагрузки и последующем исключении из рассмотрения антропогенных составляющих. Для оценки природной (естественной, фоновой) составляющей нагрузки можно использовать следующие подходы (Guidelines..., 2005):

- 1) мониторинг небольших водосборов, неподверженных антропогенному воздействию;
- 2) математическое моделирование.

На основе результатов многолетних стационарных и полевых исследований на водосборах северо-запада России, подверженных минимальному антропогенному воздействию, в Институте озероведения РАН выполнена количественная оценка модулей фонового выноса органического вещества, общего фосфора и общего азота с водосбора Ладожского озера, которая подробно изложена в разделе 2.1 (рис. 2.1.2, табл. 2.1.2).

В качестве математической модели, позволяющей выполнять расчеты природной и антропогенных составляющих биогенной нагрузки на Ладожское озеро, использована математическая модель фосфорного баланса Ладожского озера и его водосбора, разработанная в Институте озероведения РАН (Кондратьев, 2007). В пределах каждого водоема и его водосборного бассейна рассчитываются основные элементы фосфорного баланса: фосфорная нагрузка на поверхностные водные ресурсы, фосфорная нагрузка на основные водоемы, фосфороудерживающая способность водных объектов водосбора и основного водоема, вынос фосфора и его поступление в последующие блоки модели. Схема модели приведена на рис. 2.3.9.

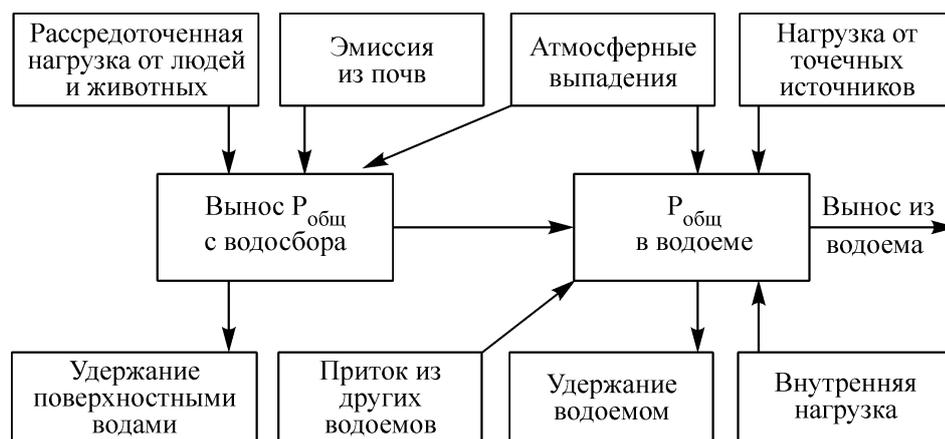


Рис. 2.3.9. Схема модели, рассчитывающей баланс $P_{общ}$ в поверхностных водах водосбора и в водоеме (Кондратьев, 2007).

Результаты моделирования явились основой для оценки вклада различных источников в формирование нагрузки $P_{общ}$ на Ладожское озеро (рис. 2.3.10). Вклад нагрузки $P_{общ}$, сформированной сбросами промышленных, сельскохозяйственных и муниципальных предприятий, в нагрузку на озеро и в настоящее время составляет около 460 т год^{-1} или 12% от значения суммарной нагрузки. Вклад рассредоточенной нагрузки $P_{общ}$, сформированной в результате животноводства — 280 т год^{-1} или 7% суммарной нагрузки. Вклад рассредоточенной нагрузки $P_{общ}$, сформированной антропогенными ландшафтами в нагрузку — 140 т год^{-1} или 4% суммарной нагрузки. Вклад внутренней нагрузки $P_{общ}$ на все водные объекты водосбора в нагрузку на Ладожское озеро составил примерно 1000 т год^{-1} или 27% от значения суммарной нагрузки. Естественная (природная) составляющая фосфорной нагрузки на Ладожское озеро может быть приблизительно оценена в 2–2,2 тыс. т год^{-1} (Кондратьев, 2007).

Полученные результаты представляют интерес, прежде всего, при планировании различных мероприятий по снижению нагрузки на изучаемые объекты, так как с их помощью можно дать приближенную оценку интервала реального снижения нагрузки в результате антропогенных воздействий. Например, очевидно, что мероприятия по снижению рассредоточенной нагрузки на водосборе Ладожского не могут привести к снижению общей нагрузки $P_{общ}$ более чем на 11%.

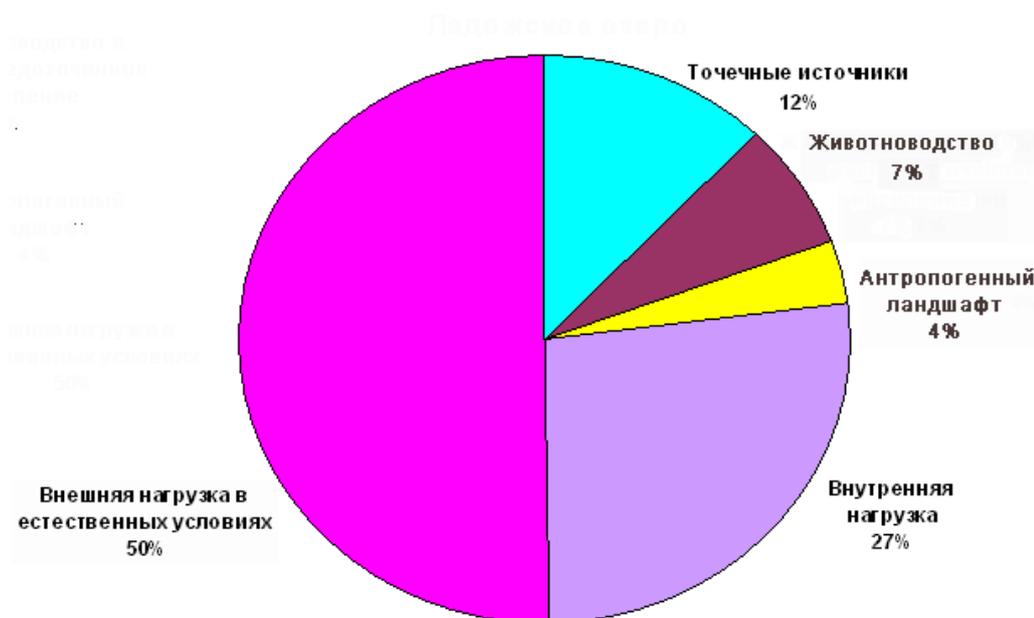


Рис. 2.3.10. Долевой вклад различных источников в формирование фосфорной нагрузки на Ладожское озеро (Кондратьев, 2007).

2.3.5. Критическая нагрузка

Согласно Хендриксену и др. (Hendriksen et al., 1992), критические нагрузки для поверхностных вод определяются количеством поступления в водоем одного или нескольких загрязняющих веществ, которые не оказывают вредного воздействия на наиболее чувствительные компоненты водных экосистем (на современном уровне знаний). Критическая нагрузка на систему водосбор–водоем представляет собой такой уровень поступления вещества извне, который в конечном итоге приводит к достижению в почве, воде, донных отложениях или биоте значения концентрации вещества, соответствующего заданному допустимому (критическому) уровню (Bakker et. al., 1998; De Vries et. al., 1998).

Фолленвейдер (Vollenweider, 1975) предложил графическое представление разграничения между олиготрофными, мезотрофными и эвтрофными озерами в зависимости от притока воды и фосфорной нагрузки. Этот график (рис. 2.3.11) получил название диаграммы Фолленвейдера и может служить основой для приближенного определения значений допустимой фосфорной (L_p) и водной (L_w) нагрузок, при которых озеро сохраняется олиготрофным, а также значения критической нагрузки, после превышения которого озеро может перейти в эвтрофное состояние.

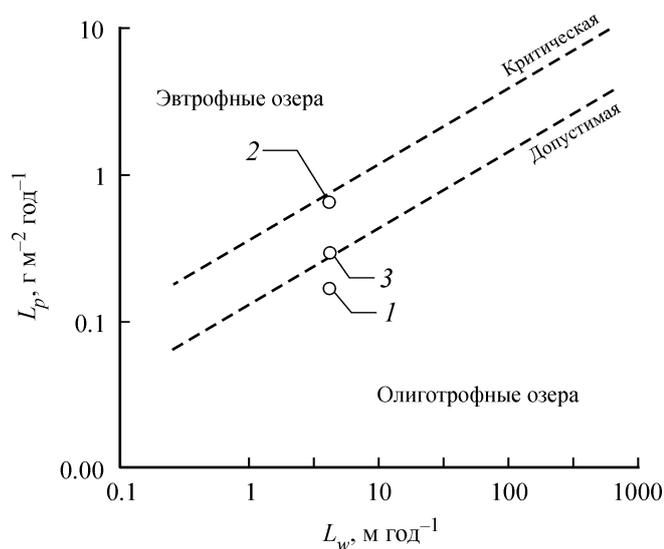


Рис. 2.3.11. Трофический статус озер в зависимости от фосфорной (L_p) и водной (L_w) нагрузок (Vollenweider, 1975), а также фосфорная нагрузка на Ладожское озеро в 1959–1962 гг. (1), 1976–1982 гг. (2), 1996–2001 гг. (3) (Расплетина, 1984).

Здесь под водной нагрузкой понимается отношение годового объема притока в озеро к площади водного зеркала. Последующие исследования (Vollenweider, Dillon, 1974) позволили получить математическое выражение для расчета критической фосфорной нагрузки ($L_{кр}$) на крупные холодноводные водоемы с замедленным водообменом: $L_{кр} = 25L_w(1 + \tau_w^{0.5})$, где 25 — критическая концентрация фосфора в озере (в $\text{мкг} \cdot \text{л}^{-1}$) в период весеннего перемешивания, τ_w (в год) — период полного водообмена озера. В последующие годы термин «критическая нагрузка» стал использоваться применительно к оценке антропогенного воздействия на водные объекты не только фосфором, но и другими химическими элементами, прежде всего — металлами и кислотообразующими веществами (Моисеенко, 1997). Если для фосфорной нагрузки допустимое и критическое значения отличаются друг от друга по соображениям, изложенным выше, то для других химических веществ они практически совпадают.

Упомянутый метод оценки критической нагрузки разработан с ориентацией на средний по водности год. Однако при рассмотрении процесса антропогенного эвтрофирования водоемов необходимо уделять особое внимание межгодовым колебаниям водности, поскольку именно маловодные годы могут являться определяющими при переходе озера к эвтрофному состоянию. В этой связи было введено понятие «объемной» фосфорной нагрузки (Гусаков, 1987), т. е. поступления фосфора на единицу объема озера. Указанная характеристика является показателем внешнего воздействия на димиктические озера умеренной зоны, в которых фосфор, поступивший с водосбора за год, относительно равномерно распределяется по всей водной толще. Критическим значением объемной

фосфорной нагрузки, вызывающей переход озера в эвтрофное состояние, является $100 \text{ мг Р м}^{-3}\text{год}^{-1}$; граница между мезотрофными и олиготрофными определяется значением $50 \text{ мг Р м}^{-3}\text{год}^{-1}$.

Критическая фосфорная нагрузка, рассчитанная для Ладожского озера по уравнению Фолленвейдера-Диллона, составляет $0,47 \text{ г м}^{-2}\text{год}^{-1}$, что соответствует поступлению фосфора в Ладожское озеро с водосборного бассейна $8,3 \text{ тыс. т год}^{-1}$. Как показали результаты наблюдений Института озероведения РАН (Расплетина, 1984; Антропогенное эвтрофирование..., 1982; Современное состояние..., 1987; Ладожское озеро..., 1992), внешняя фосфорная нагрузка на Ладожское озеро в конце 1970-х – начале 1980-х гг. составляла $0,38–0,41 \text{ г м}^{-2}\text{год}^{-1}$. При этой нагрузке, согласно диаграмме Фолленвейдера, озеро находилось на верхней границе мезотрофии и по своему трофическому состоянию соответствовало переходному уровню от мезотрофного к эвтрофному. В 1984–1995 гг. фосфорная нагрузка снизилась до $0,32–0,35 \text{ г м}^{-2}\text{год}^{-1}$, а в последующие годы (1996–2010 гг.) достигла допустимого уровня ($0,15–0,23 \text{ г м}^{-2}\text{год}^{-1}$). При сохранении современных значений поступления фосфора можно гарантировать, что Ладожское озеро избежит экологической катастрофы, связанной с его эвтрофированием.

Критическая концентрация общего фосфора в воде Ладожского озера, соответствующая критической нагрузке на водоем с учетом фактора седиментации, составляет 31 мкг л^{-1} (Антропогенное эвтрофирование..., 1982). Указанное значение близко концентрациям, наблюдавшимся в конце 1970-х гг. Уменьшение фосфорной нагрузки на озеро привело к снижению его концентрации в озерной воде и уменьшению отношения критической концентрации общего фосфора к его среднему содержанию, как это показано на рис. 2.3.12. Ожидаемое оживление в развитии промышленности, сельского хозяйства, транспорта требует постоянного внимания к состоянию Ладожского озера и условиям на его водосборе.

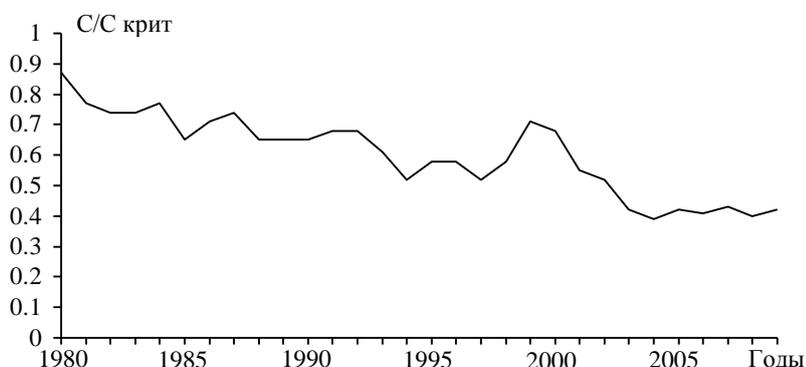


Рис. 2.3.12. Динамика отношения концентрации общего фосфора C к его критическому содержанию $C_{\text{крит}} = 31 \text{ мкг л}^{-1}$ в Ладожском озере.

Таблица 2.3.3.

Зависимость предельных нагрузок общим азотом ($\text{г м}^{-2}\text{год}^{-1}$) от средней глубины водоема (Шилькрот, 1975)

Средняя глубина водоема, м	5	10	50	100	150	200
Нагрузки, не угрожающие эвтрофированием	1,0	1,5	4,0	6,0	7,5	9,0
Нагрузки, угрожающие эвтрофированием	2,0	3,0	8,0	12,0	15,0	18,0

В работе Шилькрот (1975) предложен метод оценки предельной нагрузки на водоем общим азотом в зависимости от средней глубины (табл. 2.3.3). В соответствии с указанным методом для Ладожского озера значение азотной нагрузки, которая может угрожать эвтрофированием, составляет $8 \text{ г м}^{-2} \text{ год}^{-1}$. Фактическая азотная нагрузка на Ладожское озеро, рассчитанная по результатам натуральных наблюдений, не превышает $5 \text{ г м}^{-2} \text{ год}^{-1}$. При этом, как отмечалось ранее, в течение всего периода регулярных наблюдений какого-либо отчетливого тренда в изменении азотной нагрузки не прослеживается (Антропогенное эвтрофирование..., 1982; Ладожское озеро..., 2002).

2.4. Климат водосбора Ладожского озера

Изучение климата и его изменений на территории водосбора Ладожского озера и его акватории начало интенсивно продвигаться в России после 40-х гг. прошлого века, когда накопилась достаточная эмпирическая информация, собранная в ряде наблюдений на метеорологических станциях северо-запада России. Тем не менее, до настоящего времени остается не до конца освещенным вопрос об использовании накопленной фактической исторической информации об изменениях климатического режима ладожского водосбора. Анализ такой информации позволяет лучше понять климат Ладоги и уточнить картину климатических изменений в столь важном для России и Европы регионе.

2.4.1. Климатический режим водосбора по данным реанализа

Для количественной характеристики климатического режима водосборного бассейна Ладоги весьма полезной является информация о климатических характеристиках, осредненных по всему водосбору озера. Для получения подобных оценок привлекаемые к анализу данные усредняются по всему бассейну с весами,

пропорциональными косинусу широты, климатические же характеристики, изначально представленные в виде изолиний на картах, интерполируются в узлы регулярных сеток (Голицын и др., 2000). В проделанных расчетах использованы данные наземных и спутниковых наблюдений, а также данные реанализов, выполненных в Национальном Метеорологическом Центре США (US NMC) и в Европейском Центре Среднесрочного Прогноза Погоды (ECMWF). К расчетам также привлекались также данные, полученные отдельными исследователями, и материалы международных программ.

На рис. 2.4.1 (графики верхние слева) представлена информация о годовом ходе облачности (баллы) на ладожском водосборе. Видно, что балл общей облачности на данной территории достаточно высок во все месяцы года. Этот балл рассчитывался при интерполяции в узлы регулярной сетки два на два градуса данных, полученных за 30 лет наземных наблюдений (Берлянд, Строкина, 1989), а также с использованием результатов спутниковых измерений, проведенных в рамках международной программы ISCCP (International Satellite..., 1992). Как видно из рисунка, общий балл облачности на водосборе Ладоги по эмпирическим данным колеблется в пределах 6-8 баллов и 3,5-6 баллов – по данным ISCCP. Об относительной близости

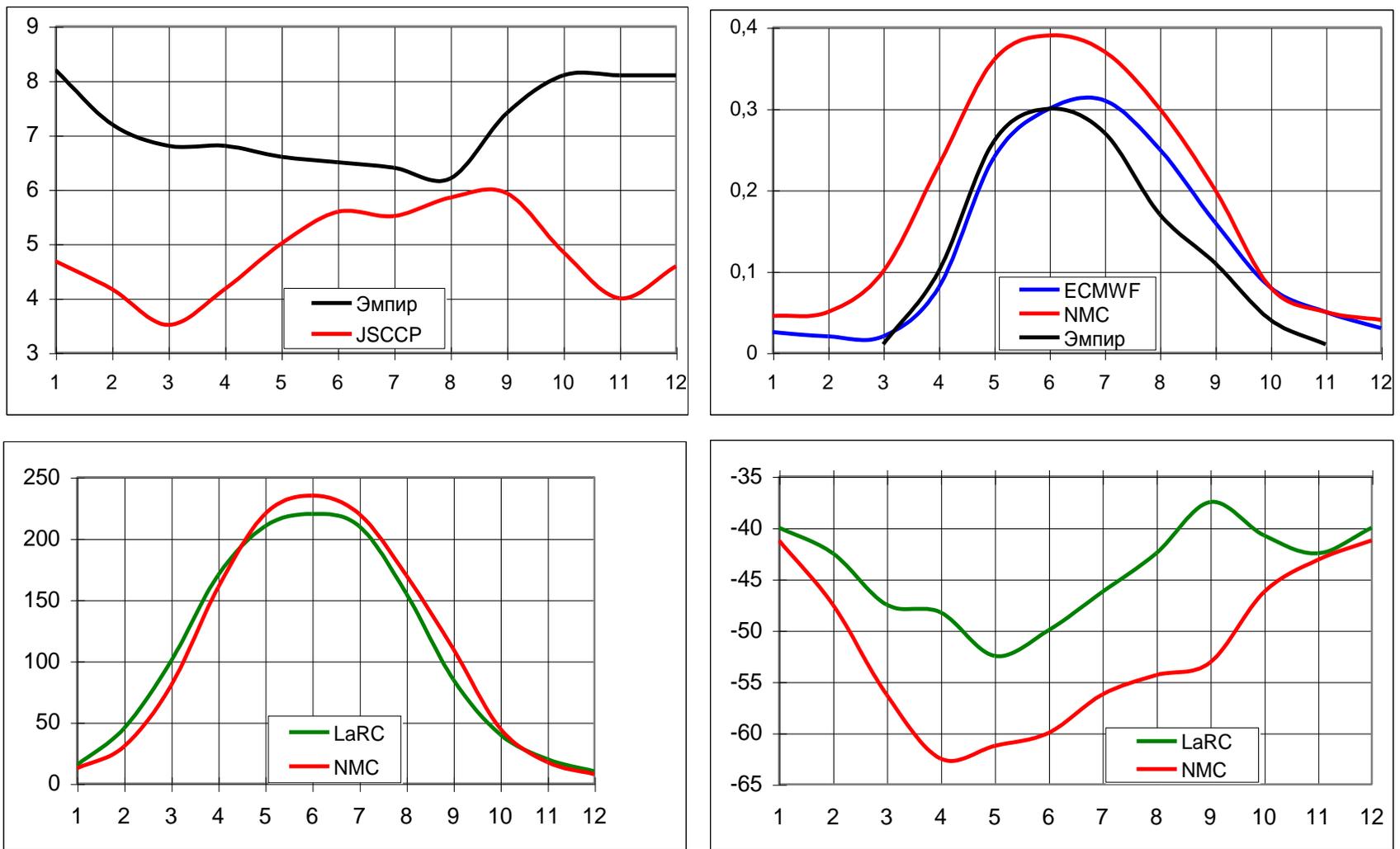


Рис. 2.4.1. Годовая динамика климатических параметров в целом по водосбору Ладожского озера (пояснения в тексте).

наземных и спутниковых данных можно сказать лишь в отношении летних месяцев, тогда как в целом систематические расхождения между ними весьма высоки. Что в особенности неприемлемо — это фактическая противофазность двух приведенных на данном рисунке графиков.

Одной из основных характеристик водного баланса является испарение. Построенные с использованием данных, полученных при реанализе и почерпнутых из архивов эмпирических данных, графики годового хода испарения (см. сутки^{-1}) на ладожском водосборе показаны на верхних правых графиках рис. 2.4.1. Несмотря на то, что кривые его динамики, рассчитанной по эмпирическим данным и данным реанализов (ECMWF..., 1997; Kalnay et al., 1996), на первый взгляд близки, различия между двумя последними, в особенности в весенние месяцы, весьма значительны, что делает затруднительным получение с их помощью достоверных оценок испарения даже в целом по водосбору.

Другой важной климатической характеристикой территорий является баланс коротковолновой солнечной и длинноволновой инфракрасной радиации на их подстилающей поверхности. На нижних части рис. 2.4.1. приведен годовой ход этих радиационных характеристик согласно данным реанализов, выполненных американскими исследователями из Центра им. Ланглей (LaRC) и Национального Метеорологического Центра (NMC) (The Langley..., 1983-1991; Kalnay et al. 1996). Сравнивая приведенные на данных рисунках графики, можно сказать, что о их близости друг к другу можно говорить лишь применительно к годовой динамике такой достаточно просто восстанавливаемой радиационной характеристики, как поглощенная коротковолновая радиация (левые нижние графики рис. 2.4.1), относительно же графиков годового хода длинноволновой радиации (правые нижние графики рис. 2.4.1) такого сказать нельзя, так как большую часть года результаты этих двух реанализов различаются на двадцать и более процентов.

Систематические значительные расхождения между данными, полученными при реанализе облачности, испарения и длинноволнового радиационного баланса существенно затрудняют получение достоверных оценок показателей энергетического и водного режима как водосбора Ладожского озера, так и его акватории. Здесь следует заметить, что именно по этой причине большое значение для получения правильных выводов на этот счет имеют более точные данные натурных измерений гидрометеорологического режима как на ладожском водосборе, так и, в принципе, на любой другой территории. Результаты анализа данных таких измерений на станциях водосборного бассейна Ладожского озера приведены ниже.

2.4.2. Изменения климатического режима и его современное состояние

В последние десятилетия в северо-западном регионе России и смежных с ним областях (как и в большинстве регионов Земного шара) происходят весьма заметные изменения климатических условий, определяемые важнейшим из современных глобальных феноменов — антропогенным потеплением. Обнаруженные в 1970-е гг. изменения тенденции динамики осредненной по всему Земному шару температуры приземного воздуха, как уже выявлено, по-разному проявляются в изменениях термического режима в разных географических регионах. Характерно, что общий вывод о том, что такие тенденции наиболее ярко выражены в высоких широтах в холодный период года (что, помимо прочего, подтверждает парниковый характер глобального потепления), не является единственной отличительной чертой современных изменений климата. В последнем четвертом отчете Межправительственной Комиссии по Изменениям климата (IPCC, 2007) приведена построенная с использованием новейших данных карта-схема, иллюстрирующая текущие тенденции изменений температуры приземного воздуха на разных континентах. Из этой карты-схемы следует, что в целом Европейский континент характеризуется одним из наиболее круто возрастающих трендов этого самого показательного климатического параметра.

В данном разделе монографии будет приведен материал, касающийся современного состояния и изменений климатических условий на территории водосбора Ладожского озера за последние сто лет, причем основное внимание будет уделено именно периоду после 1970 г. Материал, использованный в работе, основан на конкретных данных метеорологических наблюдений, проведенных на станциях водосбора Ладоги (и ряда других непосредственно примыкающих к нему районов) и получен из четырех источников: (1) Национальный Центр климатической информации США, Мировой Центр Данных «А», (NCDC, Asheville USA), (2) Всесоюзный Институт гидрометеорологической информации, Мировой Центр Данных «В» (Обнинск, Россия), (3) архив наблюдений на трех метеорологических станциях Финляндии (персональный контакт авторов) и (4) архив Северо-Западного управления Росгидромета (персональный контакт авторов). Данная эмпирическая информация относилась в основном к среднемесячным значениям температуры приземного воздуха, среднемесячным величинам его максимальной и минимальной температуры, абсолютной влажности, месячным суммам атмосферных осадков, а также продолжительности солнечного сияния.

Прежде чем переходить к анализу результатов, полученных с использованием упомянутой эмпирической информации, заметим, что качество данных наблюдений на привлекаемых к анализу метеорологических станциях существенно отличается от одной станции к другой. Это касается в первую очередь продолжительности рядов наблюдений и

наличию в них пробелов за отдельные месяцы, годы, и временные промежутки. Так, например, из 34 станций, по которым были получены ряды измерений осадков, только для 15 имелась информация за последние 7 лет. Дополнительно к этому можно отметить, что только для 14 (из 34) станций имелась возможность оперировать рядами атмосферных осадков продолжительностью с 1900 г. (и ранее). Такие недостатки рядов метеорологических наблюдений по осадкам и средней, минимальной и максимальной температуре приземного воздуха приводили к необходимости в ряде случаев прибегать к принятым приемам заполнения пропусков. Однако авторы подчеркивают, что подобные приемы применялись в исключительных случаях, а потому не могли существенно повлиять на достоверность полученных оценок изменений параметров климатического режима водосбора Ладожского озера, в особенности применительно к показателям их долговременных трендов и длиннопериодных вариаций. Что же касается изменений абсолютной влажности воздуха и продолжительности солнечного сияния, то в силу ограниченной продолжительности рядов этих метеозаписей в данном исследовании выводы об их трендах и временных вариациях делались в основном применительно к последним 50 годам.

Термический режим приземного воздуха. Изменения показателей термического режима приземного воздуха на четырех метеорологических станциях, характеризующих северную (станция Паданы), восточную (станция Вытегра), западную (станция Выборг) и южную (станция Великие Луки) части территории водосбора Ладожского озера представлены на рис. 2.4.2–2.4.5. Графики на этих рисунках однотипны и демонстрируют:

- 1) вековой ход средней годовой температуры приземного воздуха (верхние графики рис. 2.4.2–2.4.5);
- 2) ее динамику в центральные месяцы четырех сезонов (средние графики рис. 2.3.2–2.3.5);
- 3) характерный сезонный ход температуры при осреднении за весь промежуток измерений (первые диаграммы третьего ряда рис. 2.4.2–2.4.5);
- 4) среднеквадратичные изменения температуры в различные временные интервалы исследуемого промежутка измерений (вторые графики третьего ряда рис. 2.4.2–2.4.5);
- 5) среднюю амплитуду суточного хода температуры в четыре временных интервала, а именно в 1931–1960, 1946–1976, 1961–1990 и 1975–2005 гг. соответственно (третьи графики третьего ряда на рис. 2.4.2–2.4.5).

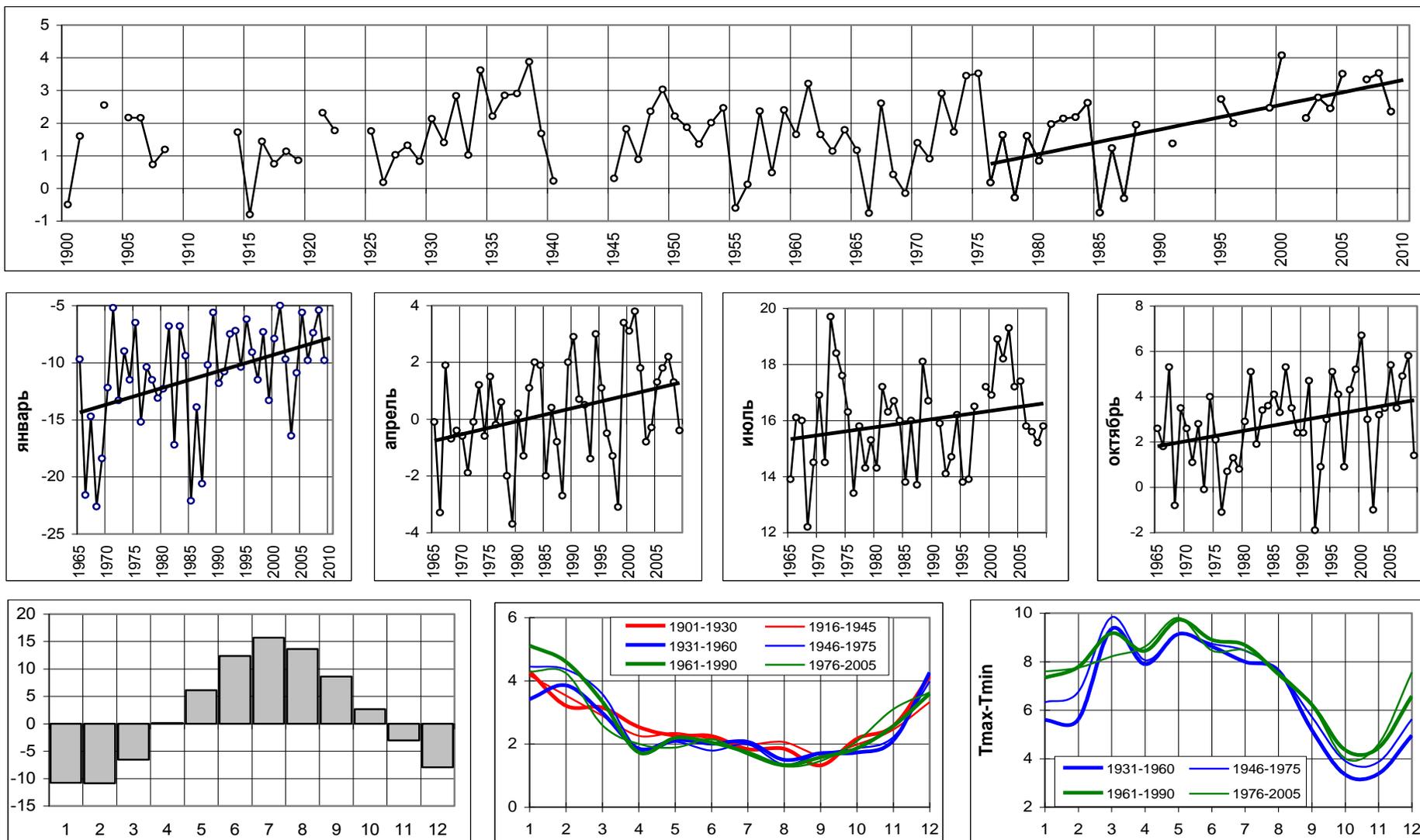


Рис. 2.4.2. Термический режим приземного воздуха на метеостанции Паданы (пояснения в тексте).

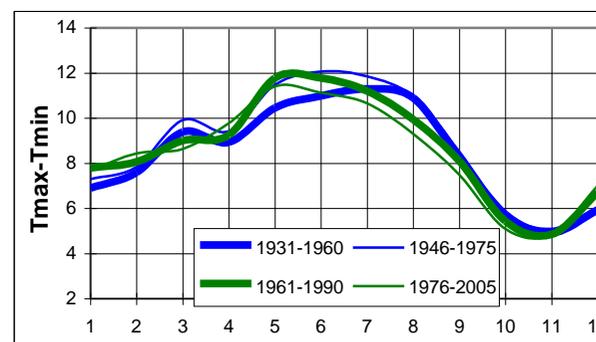
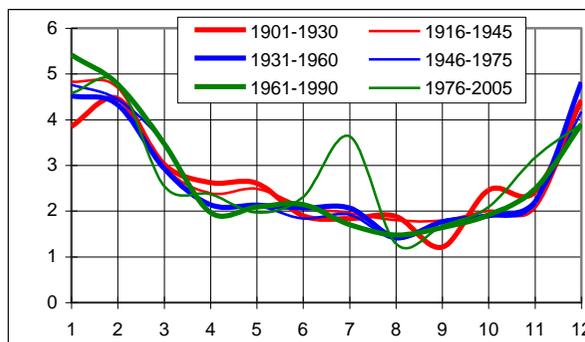
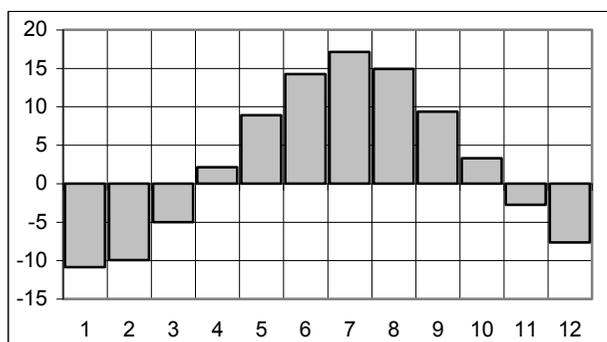
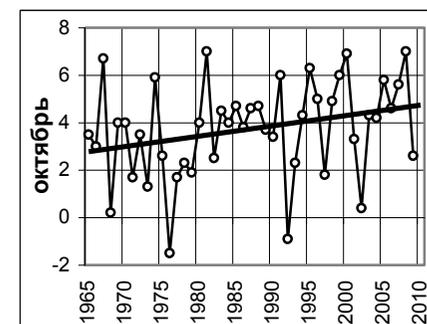
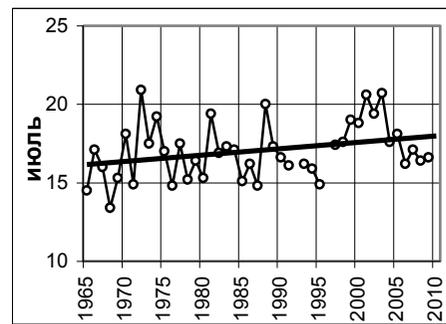
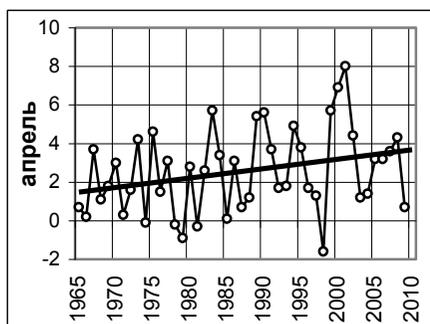
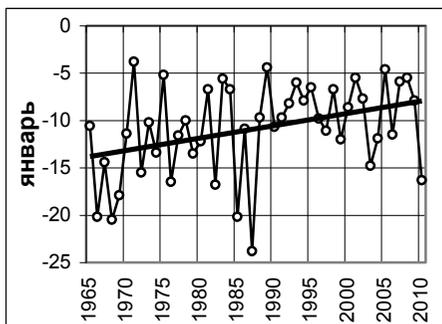
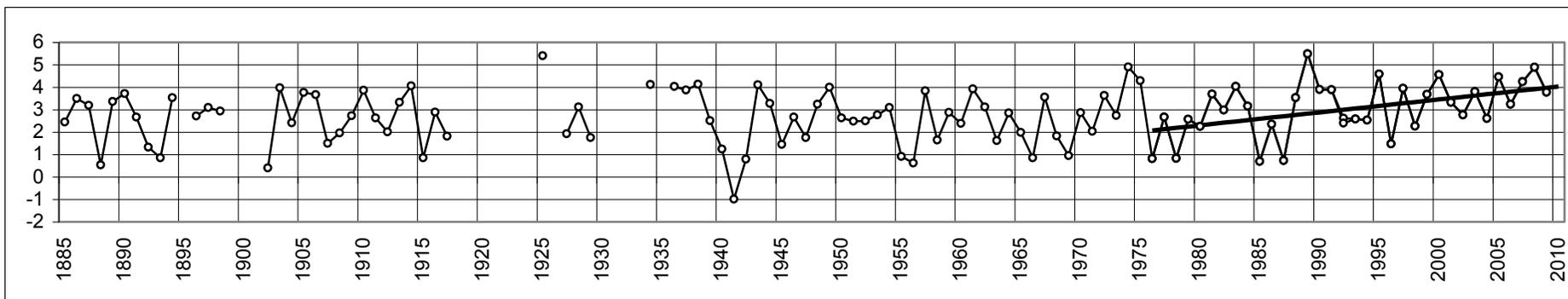


Рис. 2.4.3. Термический режим приземного воздуха на метеостанции Вытегра (пояснения в тексте).

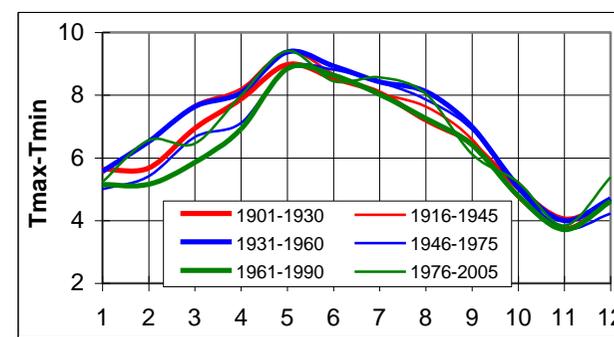
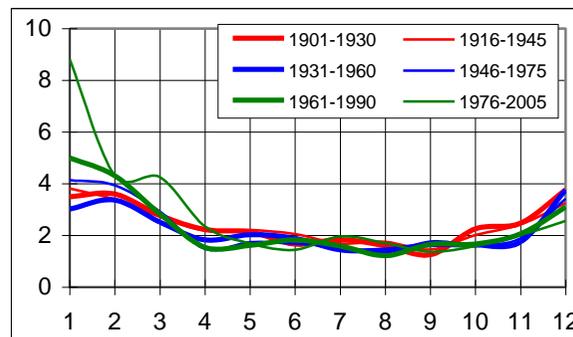
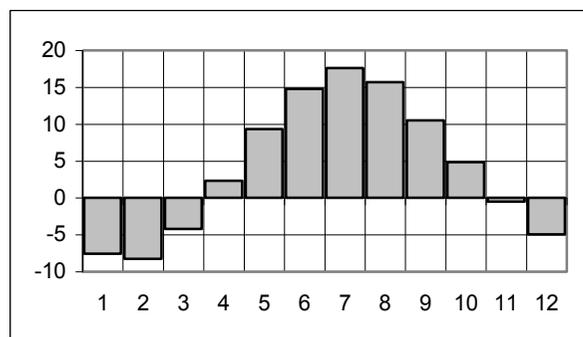
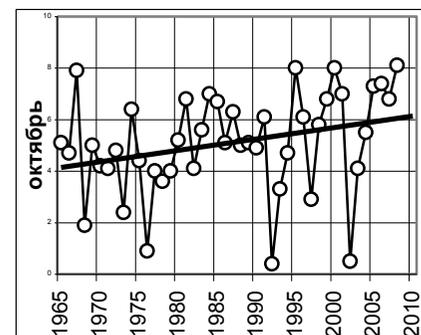
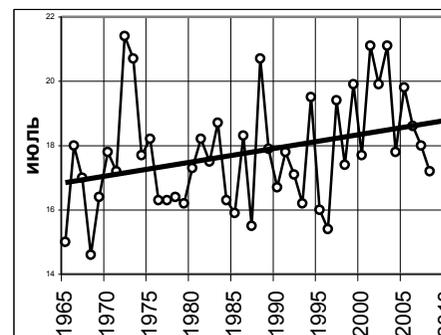
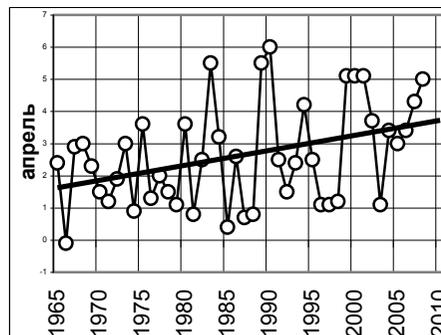
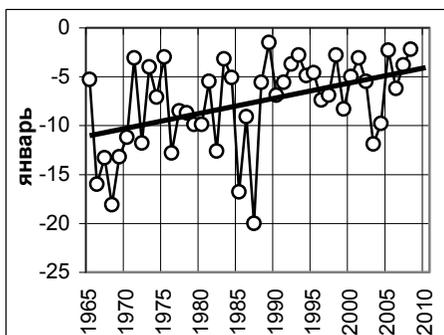
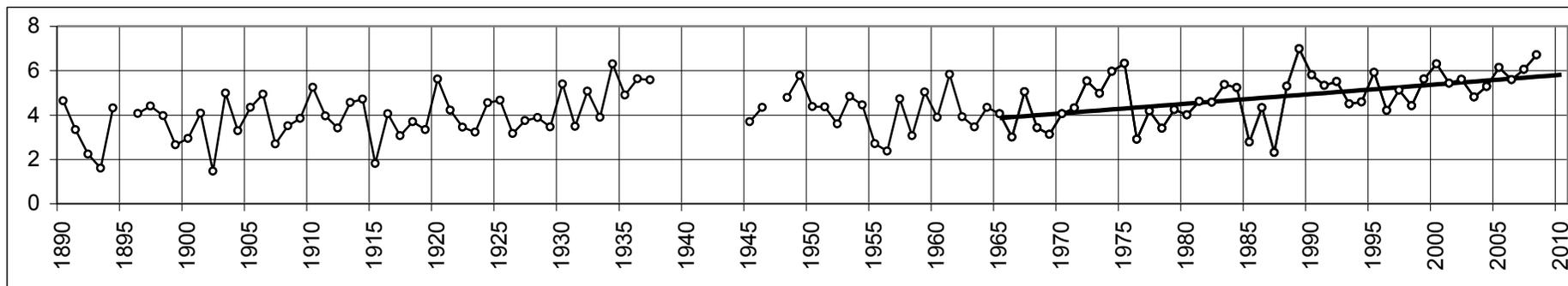


Рис. 2.4.4. Термический режим приземного воздуха на метеостанции Выборг (пояснения в тексте).

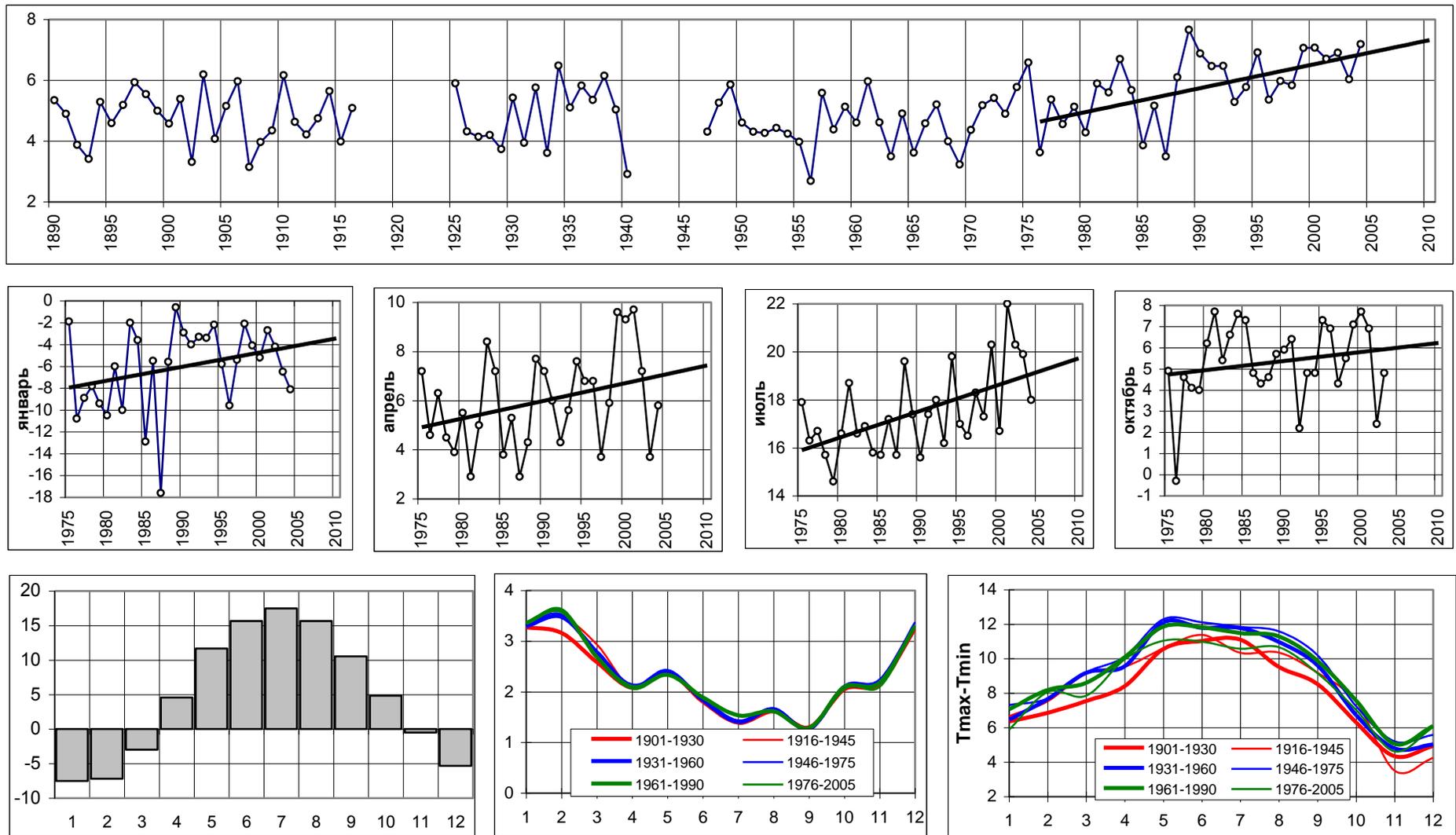


Рис. 2.4.5. Термический режим приземного воздуха на метеостанции Великие Луки (пояснения в тексте).

Первое, что обращает на себя особое внимание — это очень высокие значения повышения средней годовой температуры приземного воздуха на всех четырех станциях водосбора. Если говорить о значениях углов наклона линейных трендов, для станции Паданы он составляет 3,95 °С за 50 лет, для станции Вытегра 2,85 °С за 50 лет, для станций Выборг и Великие Луки 2,15 °С за 50 лет и 4,11 °С за 50 лет соответственно. Что касается последней из указанных величин, то этот показатель для станции Выборг превышает среднее глобальное значение данного показателя более чем в 10 раз. Особенно впечатляет скорость роста средней температуры в январе на станциях Выборг и Паданы, 7,64 °С и 7,51 °С за 50 лет соответственно. Авторам известно, что такие оценки роста локальной температуры приземного воздуха являются одними из самых высоких не только для регионов Европы, но и для всего мира.

Представляет интерес также и анализ изменений среднеквадратичных отклонений температуры приземного воздуха от начала XX в. к его концу (вторые графики третьего ряда на рис. 2.4.2–2.4.5). Наиболее характерным здесь является заметное увеличение (до десятков процентов) изменчивости температуры в холодное время года для всех четырех метеостанций, расположенных в различных регионах водосбора Ладожского озера (ср. зеленые кривые с красными и синими на упомянутых рисунках). Наименьшее значение изменчивости средней месячной температуры приземного воздуха на станциях водосбора Ладоги при происходящих в последние десятилетия изменениях климата продолжает приходиться на начало осеннего сезона. В то же время обращает на себя внимание появление необычного локального максимума на сезонной кривой ее изменчивости на востоке водосборного бассейна Ладоги (Вытегра) (тонкая зеленая линия) в июле в последний временной промежуток 1976–2005 гг. Возможно, этому феномену следует уделить дополнительное внимание, так как он проявился в последние 30 лет, когда климатические изменения громче всего заявили о себе.

Нельзя не обратить внимание и на изменения сезонной динамики амплитуды суточных колебаний температуры приземного воздуха на упомянутых четырех станциях водосборного бассейна Ладоги. Вычисление этой амплитуды производилось с привлечением информации об аномальных значениях температуры, полученных по показаниям минимального и максимального термометров. Наиболее характерной особенностью кривых сезонного хода суточной амплитуды температуры является неизменное положение минимума разности максимальной и минимальной температуры в октябре – ноябре, сохраняющееся и при современной перестройке термического режима, хотя величины самой амплитуды в этот сезон года могут заметно изменяться (случаи станций Паданы и Великие Луки). Ранее этот эффект был обнаружен для европейских станций, расположенных от Скандинавии до Средиземного моря между 10° и 35° в. д. (Менжулин, 2001).

Режим атмосферных осадков. Очевидный интерес для понимания закономерностей формирования водного режима как самого Ладожского озера, так и водоемов и водотоков, составляющих его сборный бассейн, имеет информация о происходивших в последние десятилетия изменениях режима осадков в данном регионе. Несомненно, положительно следует оценить то, что эмпирическая информация о временной динамике осадков на метеорологических станциях северо-запада России и прилегающей к нему территории Финляндии представлена наиболее широко в архивах метеорологических данных, хотя, как это уже отмечалось, ее качество несомненно оставляет желать лучшего. На рис. 2.4.6–2.4.9 настоящего раздела монографии приведен материал анализа режима атмосферных осадков на водосборе Ладоги, построенного по такому же, как и для температуры, принципу: для четырех станций (Кайаани, Вытегра, Вышний Волочок и Лаппеенранта), расположенных в северной, восточной, южной и западной частях водосбора.

При анализе изменений режима осадков на станции Вытегра в первую очередь обращает на себя внимание существенный рост их месячных сумм в зимний период (см. левые графики среднего ряда на рис. 2.4.6). Прирост осадков на этой станции в феврале по линейному тренду за период с 1895 по 2005 гг. составил 20,61 мм, то есть 57,3%. Увеличение количества месячных осадков по трендам в декабре и январе здесь было меньшим, но все-таки значительным – около 25 и 14% соответственно. Весной и летом (см. правые графики среднего ряда и левые графики нижнего ряда на рис. 2.3.6) тренды изменений осадков менее выражены. Для этих сезонов (как, впрочем, и для зимних месяцев) сильно выражены изменения осадков от одного временного периода XX в. к другому. Применительно к станции Вытегра также можно сказать об их существенной межгодовой амплитуде, которая для нормированных годовых и месячных сумм часто превышает 30%.

Устойчивые тренды вековых изменений осадков в восточной части водосбора Ладожского озера существенно проявляются также и в осенние месяцы. При этом в сентябре (в противоположность октябрю и ноябрю) изменение суммы осадков по линейному тренду за 1895–2005 гг. отрицательно и составляет около 6%, тогда как в октябре и ноябре изменения положительны и равны 30 и 22% соответственно. В целом за последнее столетие годовая сумма осадков на станции Вытегра по линейному тренду возросла на 15%.

В отличие от станции Вытегра, расположенной в восточной части ладожского водосбора, годовые суммы осадков в северном, западном и южном регионах ее водосборного бассейна в последнее столетие изменялись по-другому. На рис. 2.3.7–2.3.9 приведена вековая динамика изменений годовой суммы осадков на станциях Кайаани, Лаппеенранта и Вышний Волочок. Видно, что на этих станциях вековой тренд осадков практически не выявляется, хотя изменения сумм осадков от периода к периоду значительны. Так, на станции Кайаани (верхние

графики на рис. 2.3.7) можно отметить два соседствующих временных периода: 1910–1935 гг. и 1936–1961 гг., – когда годовая сумма осадков согласно одиннадцатилетней скользящей кривой была высокой (в максимуме – до 1400 мм) и низкой (в минимуме до 750 мм). Такое же свойство динамики осадков выявляется и по наблюдениям на станции Лаппеенранта (средние графики на рис. 2.3.7), где в период 1920–1935 гг. годовая сумма осадков в максимуме достигала 970 мм, а в 1936–1956 гг. опускалась в минимуме до 530 мм. На станции Вышний Волочок (нижние графики на рис. 2.4.7) межгодовая амплитуда колебаний годовой суммы осадков меньше, чем на упомянутых двух станциях Финляндии, но, также как и на них, в ее вековом ходе не обнаруживается устойчивой тенденции увеличения или уменьшения.

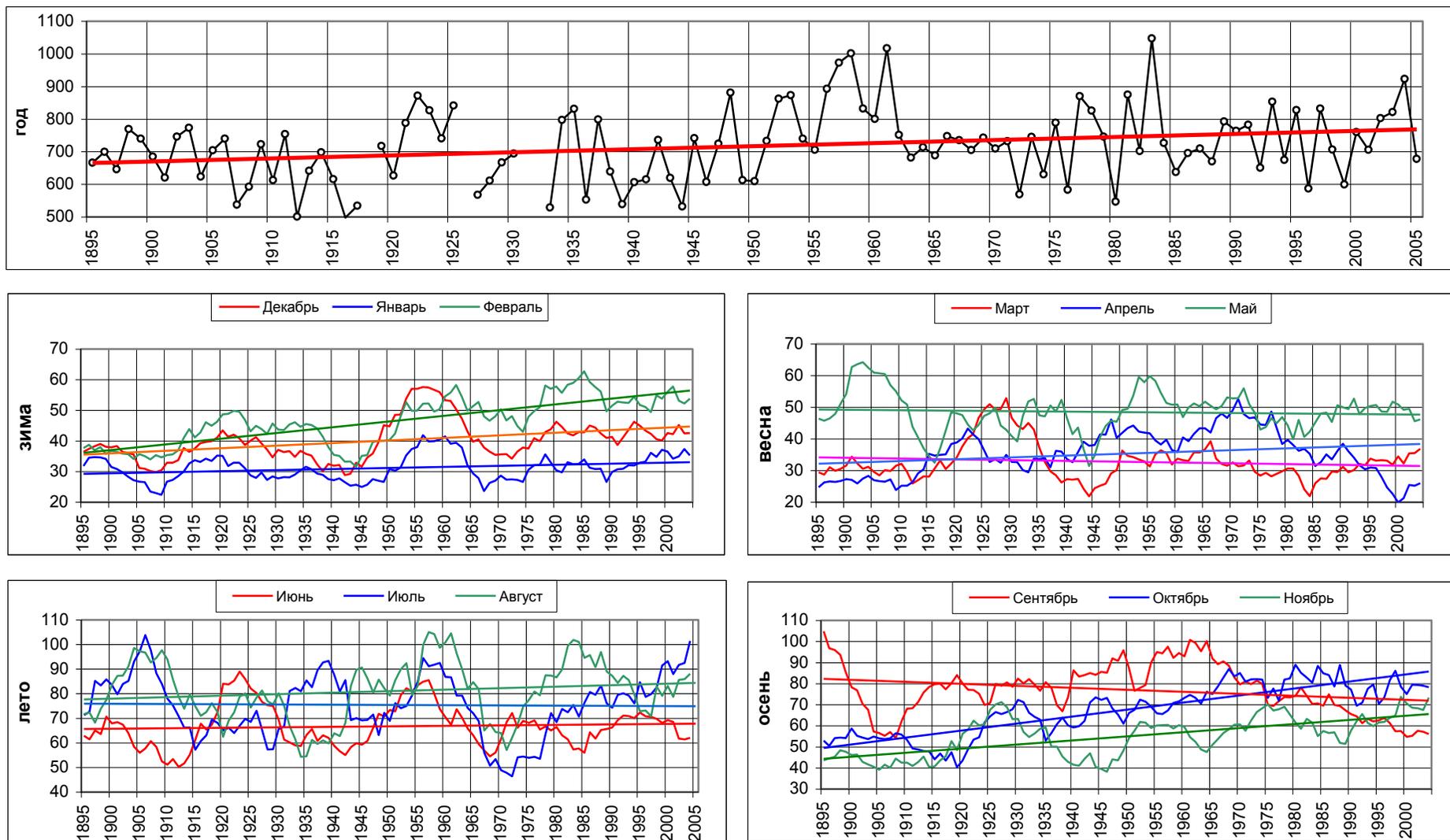


Рис. 2.4.6. Вековой ход годовой и месячных сумм атмосферных осадков (мм) и их одиннадцатилетних сглаженных значений на станции Вытегра.

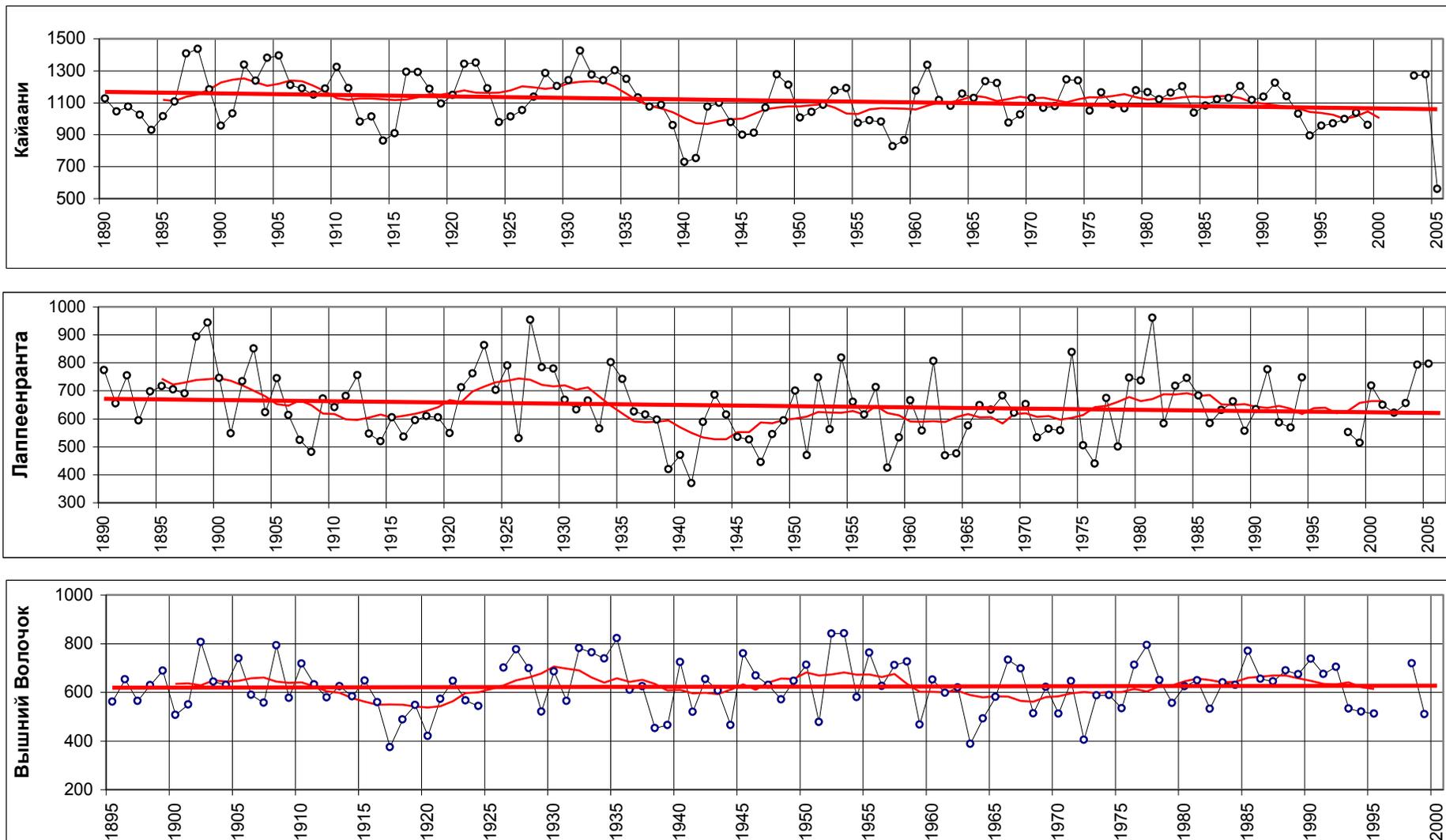


Рис. 2.4.7. Вековой ход годовых сумм атмосферных осадков (мм) и их одиннадцатилетних сглаженных значений на станциях Кайаани, Лаппеенранта и Вышний Волочок.

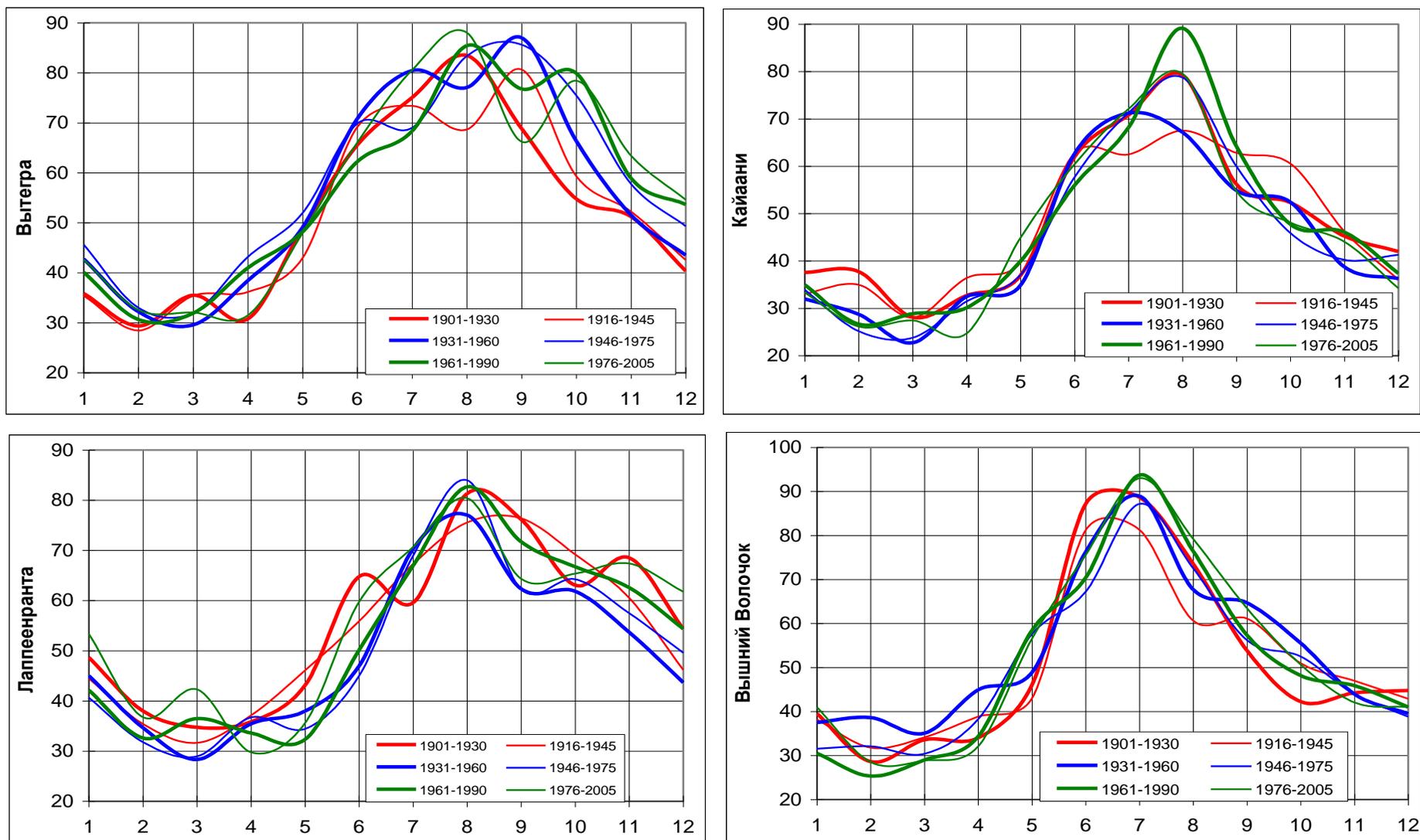


Рис. 2.4.8. Годовой ход осредненных по шести тридцатилетним периодам XX в. месячных сумм осадков (мм) на четырех станциях водосбора Ладожского озера.

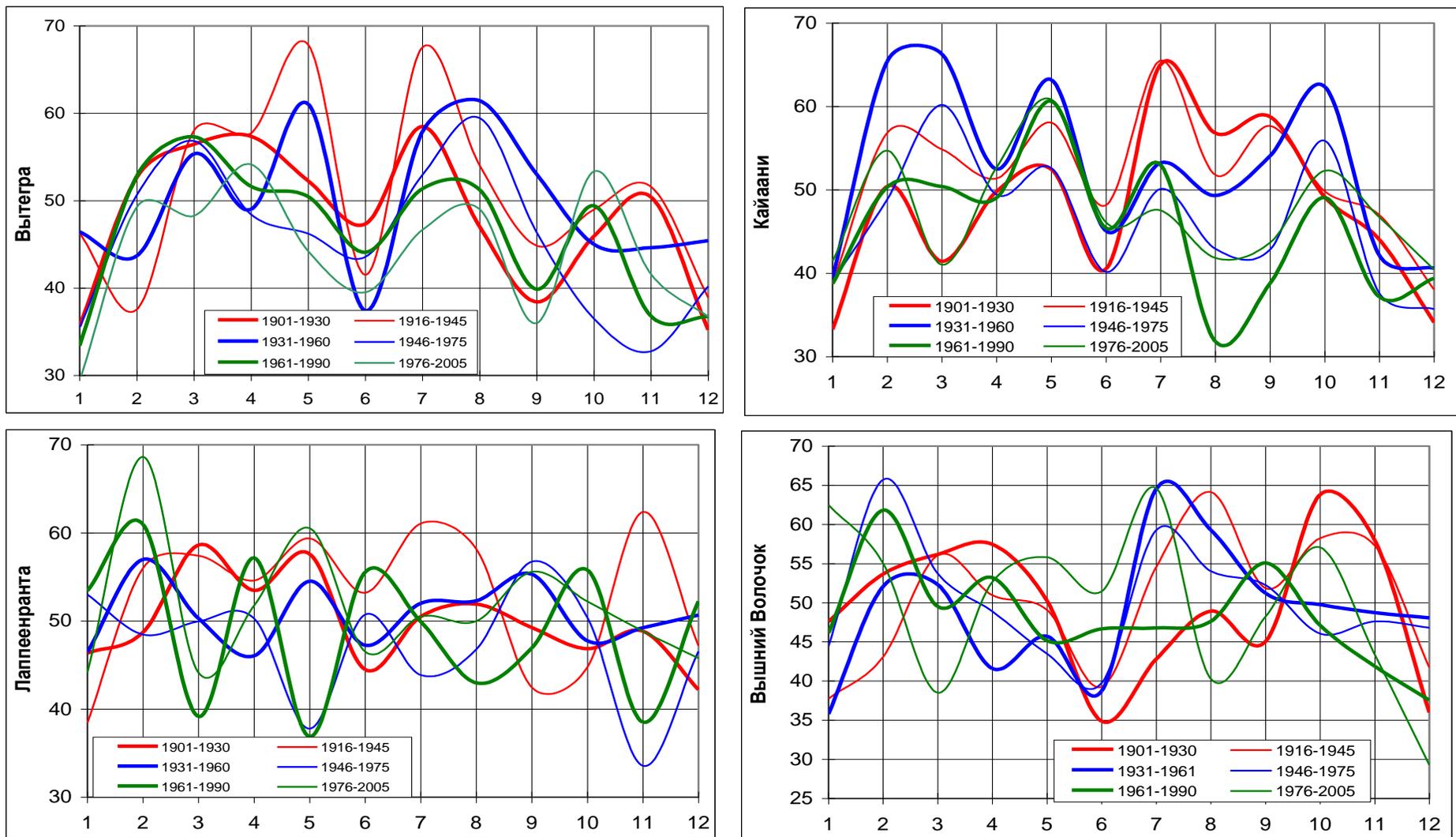


Рис. 2.4.9. Годовой ход коэффициента вариации месячных сумм осадков (%) по шести тридцатилетним периодам на четырех станциях водосбора Ладожского озера.

Проанализировано изменение годового хода осадков на четырех упомянутых станциях Ладожского водосборного бассейна от периода к периоду XX в. Комментируя графики на рис. 2.4.8, представляющие эти изменения в целом, следует отметить существенные изменения деталей годового хода атмосферных осадков. Так, на станции Вытегра (левые верхние графики рис. 2.4.8) февральский минимум на графике годового хода в последние тридцатилетия имеет тенденцию сдвигаться на начало весны (ср. красные и зеленые кривые). В то же время на станции Кайаани (правые верхние графики рис. 2.4.8) эта тенденция не отмечается. Перестройка динамики годового хода осадков на станции Лаппеенранта привела к появлению двух (в феврале и апреле) минимумов в начальные месяцы года (левые нижние графики рис. 2.4.8). Комментируя изменения зимнего минимума осадков на станции Вышний Волочок, можно отметить его заметное углубление (правые нижние графики рис. 2.4.8).

Анализируя изменения в положении максимумов на графиках годового хода атмосферных осадков на упомянутых выше станциях водосбора Ладоги, можно обратить внимание на то, что кривая динамики, имевшая в тридцатилетие 1901–1930 гг. только один максимум, приходившийся на август, в период 1931–1960 гг. трансформировалась в график с двумя максимумами (июль и сентябрь). В последние тридцатилетия эти максимумы сдвинулись на август и октябрь. На северной станции Кайаани в тридцатилетие 1961–1990 гг. максимум осадков стал более высоким и приходился на август. Для станции Лаппеенранта график годового хода в 1901–1930 гг. характеризовался тремя максимумами (июль, август и ноябрь). К периоду 1961–1990 гг. он трансформировался в кривую с одним максимумом, приходящимся на август. И, наконец, комментируя изменения соответствующих графиков годового хода осадков в Вышнем Волочке от 1901–1930 гг. к 1961–1990 гг., можно сказать, для этого региона характерен сдвиг летнего максимума с середины июня на июль.

Расчеты показали, что в прошедшем столетии наиболее существенные изменения происходили в динамике сезонного хода коэффициента вариации осадков $C_{v,p}$ в различных частях ладожского водосбора (графики на рис. 2.4.9). Так, применительно к этому показателю на станции Вытегра (левые верхние графики на рис. 2.4.9) можно видеть, что во временной промежуток 1901–1930 гг. на кривой годового хода $C_{v,p}$ обнаруживалось три минимума (в июле, сентябре и январе) и четыре максимума (в апреле, июле и ноябре). В отличие от этого в период 1931–1960 гг. минимумы на этой кривой приходились на февраль, апрель, июнь и сентябрь; максимумы – на январь, март, май, июль и ноябрь. Наконец, к периоду 1976–2005 гг. график трансформировался в кривую с минимумами в январе, марте, июне, сентябре и с максимумами в феврале, апреле, августе и октябре. Диапазон изменений параметра $C_{v,p}$ в его годовом ходе в последнее тридцатилетие на станции Вытегра составил 20% (от 30 до 50%).

Для годовой динамики коэффициента вариации осадков на северной части водосбора Ладоги (станция Кайаани) при переходе от одного временного тридцатилетия к другому характерно сохранение максимумов на его графике (мае, июль, октябрь). Что касается минимумов, то здесь картина более сложная: если августовский минимум оказался довольно устойчивым, то мартовский повторился на кривой динамики $C_{v,p}$ в последний промежуток, претерпев трансформацию в промежуточных тридцатилетиях. Августовский минимум $C_{v,p}$ в промежуток 1901–1930 гг. располагавшийся на уровне 57%, опустился до уровня 32%.

На станциях Лаппеенранта и Вышний Волочок вид кривых динамики $C_{v,p}$ в течение прошедшего столетия изменялся наиболее кардинально. Например, для станции Лаппеенранта мартовский максимум (60%) на кривой для 1901–1930 гг. превратился в минимум в 1976–2005 гг. (47%), майский максимум в 1901–1930 гг. (60%) трансформировался в глубокий минимум на графиках для 1961–1990 гг. и 1976–2005 гг. (37%). Самый высокий максимум (63%) на кривой $C_{v,p}$ для 1916–1945 гг. превратился в глубокий (меньше 40%) минимум в 1961–1990 гг. Для изменений динамики годового хода коэффициента вариации осадков на станции Вышний Волочок от периода к периоду показательно, что в период 1901–1930 гг. весенний максимум приходился на апрель, в 1976–2005 гг. на его месте (в марте) расположился глубокий минимум. В 1901–1930 гг. очень глубокий (35%) июньский минимум в 1976–2005 гг. стал только локальным (55%).

В целом для изменений режима атмосферных осадков на отдельных частях ладожского водосбора характерна, главным образом, перестройка их годовой динамики и, в особенности, их коэффициента вариации. Однако это не означает, что на некоторых станциях, в первую очередь расположенных в восточной части водосбора, также являются существенными и изменения в вековом ходе годовых и месячных сумм осадков (см. сказанное выше для станции Вытегра).

Продолжительность солнечного сияния. При анализе климатического режима водных объектов и территорий указанная характеристика применяется довольно редко, часто его заменяют другие характеристики, или определяющие этот параметр (например, облачность) или непосредственно с ним связанные (приход солнечной радиации). По мнению авторов, это является упущением, поскольку продолжительность солнечного сияния измеряется довольно надежными инструментами, и такие данные имеет большую достоверность, чем, например, балл облачности. Что же касается потока суммарной коротковолновой солнечной радиации, измерения продолжительности солнечного сияния представлены на гораздо более разветвленной сети метеорологических станций, чем существующая актинометрическая сеть. Авторы для целей более полного понимания климатических изменений на водосборе

Ладожского озера в последние десятилетия решили обратиться и к информации о продолжительности солнечного сияния.

Информация, накопленная в архивах Всероссийского института гидрометеорологической информации, Мировом Центре Данных, отражает изменения продолжительности солнечного сияния на станциях северо-запада России за последние шесть десятилетий. Однако единственной из них, для которой имеются данные после 1900 г., является станция Санкт-Петербург. Авторы понимали, что данная станция расположена в пределах крупного мегаполиса, поэтому данные наблюдений на ней могут быть «закамуфлированы» локальными эффектами антропогенного характера (повышенный фон тропосферного аэрозоля, увеличенная облачность и т. д.). Заметим, что известный эффект острова тепла, который исследовался авторами в применении к климату Санкт-Петербурга и который может приводить к увеличению среднемесячной температуры приземного воздуха в зимний сезон до 3 °С, в данном случае не существенен (Менжулин, Тетеревков, 2009, 2010). С целью получения достоверных выводов об изменениях продолжительности солнечного сияния к анализу привлекались и более короткие ее ряды для станций, расположенных как на водосборе, так и в районах непосредственно нему примыкающих. На рис. 2.4.10 приведены данные анализа изменений продолжительности солнечного сияния (часы в год) на семи станциях: Санкт-Петербург, Белогорка, Тихвин, Сортавала, Реболы, Великие Луки и Каргополь.

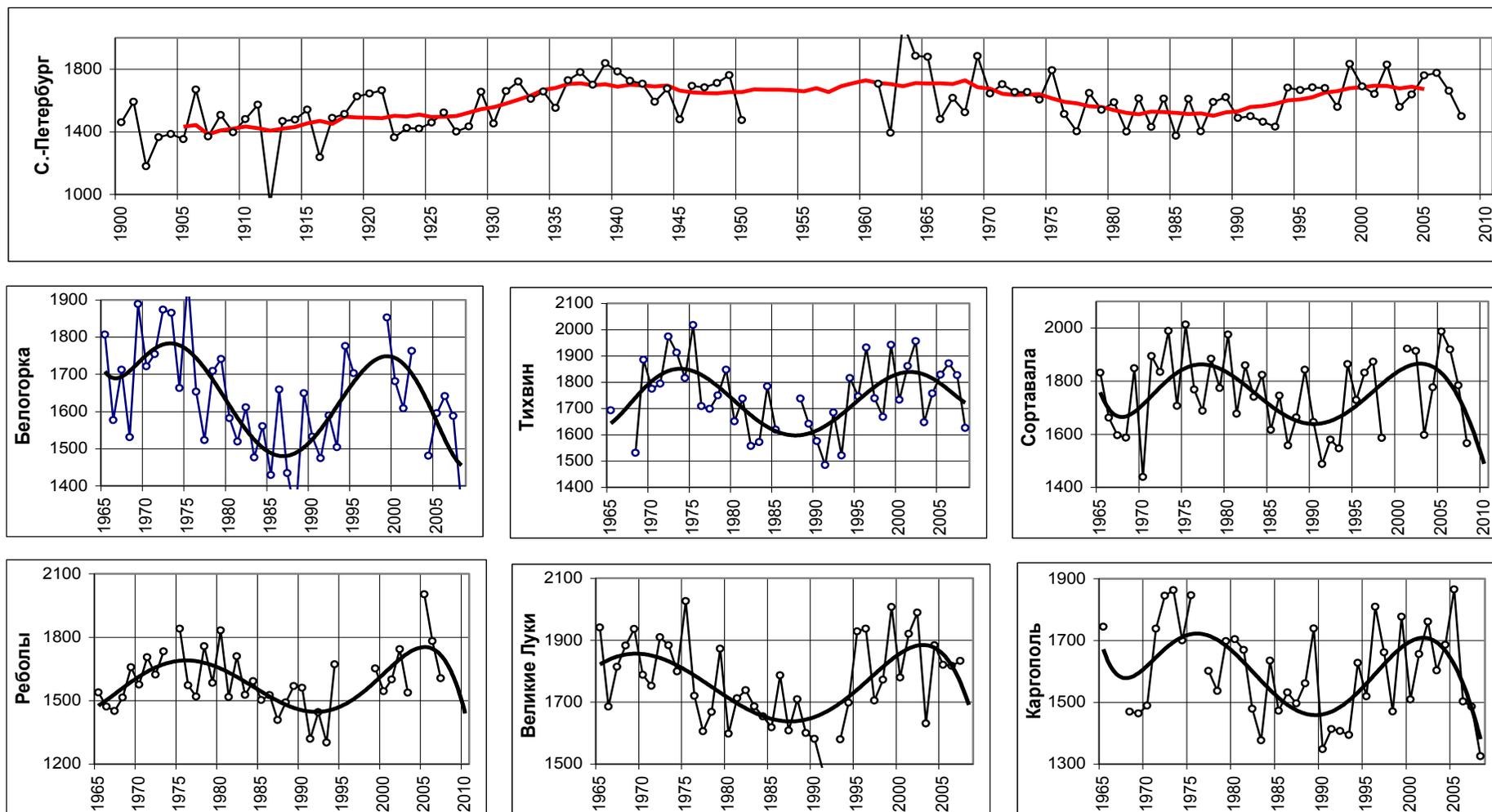


Рис. 2.4.10. Динамика продолжительности солнечного сияния (часы в год) на станции Санкт-Петербург и шести других метеостанциях, характеризующих различные регионы водосбора Ладожского озера.

Комментируя результаты измерений данного климатического параметра в Санкт-Петербурге, следует заметить, что с начала XX в. по настоящее время продолжительность солнечного сияния на этой станции заметно менялась. Период уменьшенной продолжительности (1900–1925 гг.) сменился фазой ее увеличенных значений (1930–1950 гг.), которая, несмотря на отсутствие систематических данных в 1950-е гг., можно сказать, продолжалась до конца 1970-х гг. Минимум продолжительности солнечного сияния в последнее тридцатилетие приходился на конец 1980-х – начало 1990-х гг., после чего она вновь стала возрастать. В самые последние годы этот климатический показатель приобрел тенденцию к уменьшению. Доказательством отсутствия существенного влияния на вековую динамику продолжительности солнечного сияния на территории водосбора Ладожского озера локальных антропогенных факторов мегаполиса служит практически идентичный характер изменений этой характеристики в последние 45 лет на шести других метеостанциях, данные по которым приведены на рис. 2.4.10. Сжатая шкала лет на данных графиках иллюстрирует эту динамику более отчетливо. Следует полагать, что причиной локального сокращения продолжительности солнечного сияния, имевшего место в период 1975–2000 гг., было частичное увеличение облачности, отразившееся в росте осадков.

Если говорить о вековом линейном тренде продолжительности солнечного сияния, то, согласно данным измерений на станции Санкт-Петербург (которые, как показано, являются достоверным индикатором изменений этого климатического параметра на водосборе Ладоги в целом), статистически значимый положительный наклон этого тренда составляет 12% на 100 лет. Другими словами, за прошедшие 110 лет годовая сумма продолжительности солнечного сияния на ладожском водосборе возросла на 180 часов.

Влажность приземного воздуха. Так же как и продолжительность солнечного сияния, влажность приземного воздуха относительно редко привлекается для характеристики происходящих изменений климатического режима территорий. Однако, как это будет показано ниже, привлечение информации об изменениях показателей влажности приземного воздуха при таком анализе дает возможность существенно дополнить общую картину современных изменений локального климата территорий. В применении к водосборным бассейнам крупных водоемов, каким является Ладожское озеро, подобный анализ представляет особый интерес.

На рис. 2.4.11 приведены графики, иллюстрирующие динамику упругости водяного пара воздуха приземного слоя (гектопаскали) в центральные месяцы четырех сезонов года на четырех станциях, расположенных в (или непосредственно примыкающих к) северной

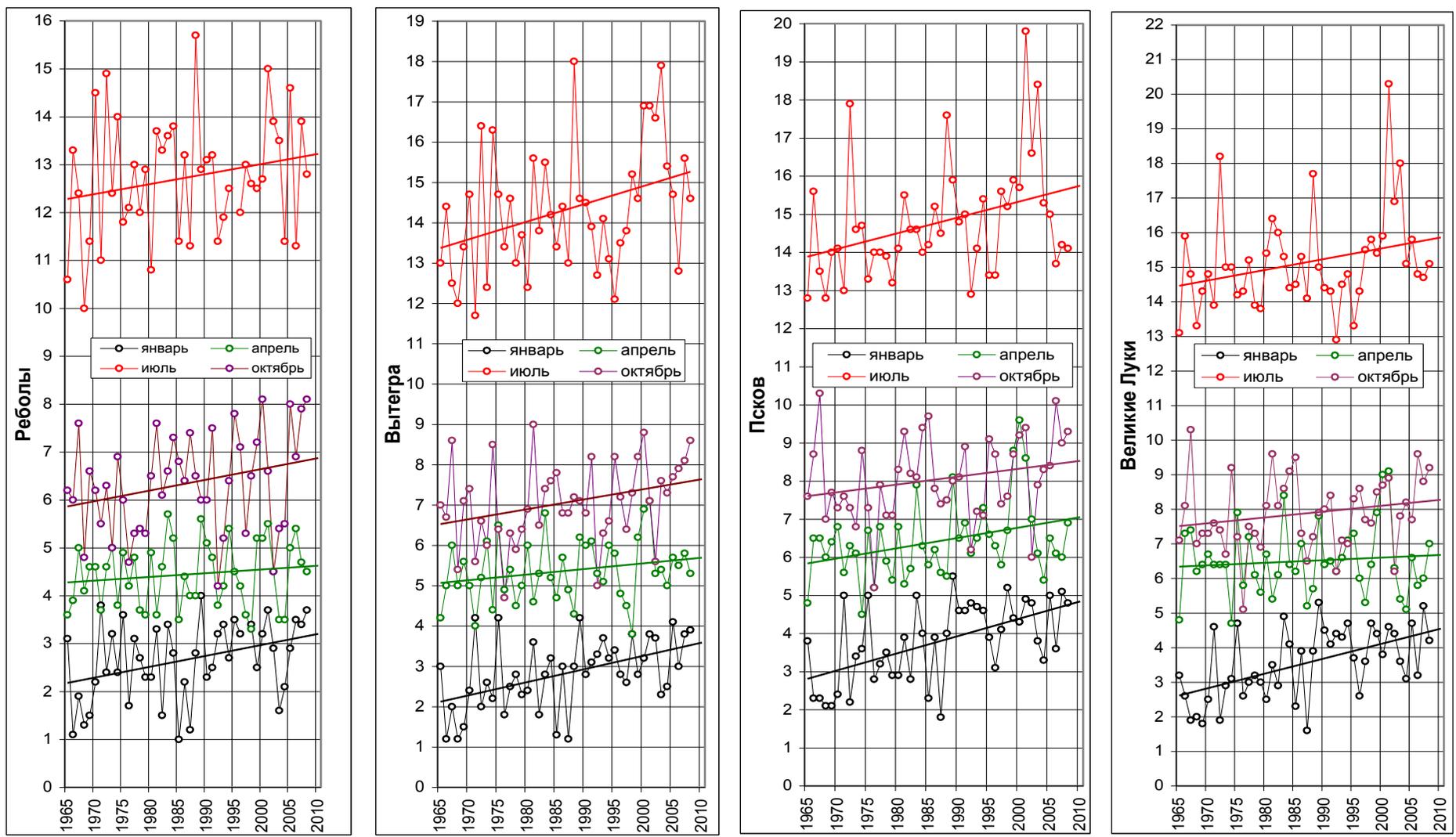


Рис. 2.4.11. Динамика упругости водяного пара в воздухе приземного слоя (гПа) в период 1965-2010 гг. по измерениям на четырех метеостанциях водосбора Ладожского озера.

(Реболы), восточной (Вытегра) и южной (Псков, Великие Луки) частям водосбора Ладожского озера.

Даже общий взгляд на эти графики, позволяет сделать вывод о том, что происходящие изменения климата кардинальным образом влияют на влажность приземного слоя воздуха. Все графики сорокапятилетней временной динамики упругости водяного пара имеют явно выраженные растущие тренды (в большинстве своем статистически высоко значимые). Если говорить о таких изменениях применительно к каждой из метеостанций, можно привести следующие цифры. На станции Реболы по линейному временному тренду январские значения упругости водяного пара с 1965 по 2010 г. увеличились на 50% (с 2,2 до 3,2 гектопаскалей), на станции Вытегра – на 76% (с 1,6 до 2,1 гектопаскалей), на станции Псков – на 81%, на станции – Великие Луки – на 70%. Меньшими, но достаточно значительными величинами, характеризуется рост упругости водяного пара летом: Реболы – на 8% , Вытегра – на 15%, Псков – на 11%, Великие Луки – на 10%. Такие кардинальные изменения режима влажности воздуха связаны в первую очередь с существенным ростом испарения во все сезоны года, который в относительных величинах сильно увеличивается зимой, когда температура приземного воздуха растет наиболее заметно (см., например, графики изменений температуры на станции Вытегра).

Таким образом, основные результаты многолетних исследований, проводившихся на водосборе Ладожского озера и изложенные в настоящей главе, сводятся к следующему.

Северная часть водосбора расположена в пределах Балтийского кристаллического щита, южная – на Русской платформе. Граница между двумя этими частями проходит приблизительно по линии г. Выборг – г. Приозерск – устье реки Видлицы – исток реки Свири. Водосбор расположен в зоне тайги и зоне смешанных лесов. Для территории наиболее типичны еловые леса, характер которых существенно меняется с севера на юг – от среднетаежных черничных зеленомошников к южнотаежным с дубравными элементами в травяном покрове и к сложным ельникам с широколиственным подлеском в зоне смешанных лесов. Доминирующим типом почвообразования в бассейне Ладожского озера является подзолистый. Его крайнее проявление наблюдается на северо-востоке бассейна, в области распространения северной тайги. По мере перехода к средней и южной тайге в почвах наряду с процессом подзолообразования протекает процесс накопления гумуса.

Территория бассейна покрыта густой сетью водотоков, многочисленными озерами и обширными болотами. Густота речной сети составляет в среднем $0,45 \text{ км/км}^2$. Наиболее значительными водотоками являются реки: Волхов, Свирь, Вуокса, Сясь, Оять, Паша и Мста. В основном водотоки имеют небольшие уклоны и спокойное течение. Лишь при пересечении кристаллических пород, моренных возвышенностей и гряд на перекатах и порогах скорость

течения может резко возрастать. Реки бассейна Ладожского озера, как правило, имеют смешанное питание с преобладанием снегового (от 40 до 50% годового стока) с высоким половодьем, низкой летней и зимней меженью и подъемами уровня воды осенью под влиянием обложных дождей. Основными озерами водосбора Ладожского озера являются Онега, Ильмень и Сайма. Режим уровней озер характеризуется максимальным подъемом в период весеннего снеготаяния и относительно устойчивой летней и зимней меженью.

По результатам мониторинга проведены расчеты и выполнена регионализация природного (фоновое) выноса органического углерода, общего азота и общего фосфора с речных водосборов бассейна Ладожского в области Балтийского кристаллического щита и Русской равнины. Показано, что модули выноса $P_{\text{общ}}$ на территории бассейна озера изменяются в пределах 0,6–14,5 кг км⁻² год⁻¹.

По результатам моделирования проведена оценка вклада различных источников в формирование фосфорной нагрузки на Ладожское озеро. Показано, что в настоящее время точечные источники загрязнения формируют 12% нагрузки $P_{\text{общ}}$, рассредоточенные антропогенные источники – 11%, вынос из донных отложений – 37%. Природная (фоновая) фосфорная нагрузка на озеро оценивается в 50% от значения суммарной нагрузки на озеро.

Произошедшие и происходящие в XX и в начале XXI в. кардинальные изменения большинства параметров климатического режима водосбора являются региональными проявлениями глобального антропогенного потепления. Согласно результатам оценок исторических изменений фактических данных, привлеченных к анализу, климат водосбора Ладожского озера по сравнению с другими регионами Европы крайне отзывчив на происходящие изменения глобального климата. Только тот выявленный факт, что в северной части водосбора этого озера тренд повышения температуры приземного воздуха существенно выше его среднего глобального значения, свидетельствует о такой исключительной чувствительности.

Глава 3. Физико-географическая характеристика озера

3.1. Глубины и подводный рельеф

Геологическое строение бассейна Ладоги оказывает значительно большее влияние на особенности надводного рельефа водосбора и подводного рельефа чаши озера, чем в других озерах мира (Молчанов, 1945). Котловина озера представляет собой крупную депрессию, вытянутую в северо-западном направлении, навигационный уровень воды в которой располагается на высоте 5,1 м БС. Отношение максимальной длины озера к максимальной ширине составляет 1,75, отношение площади зеркала озера к площади водосбора (показатель площади) – 0,06, а отношение максимальной глубины к диаметру озера (относительная глубина) — 0,0015.

Дно Ладожского озера относится к одному из наиболее типичных образцов внутриконтинентального гляциального шельфа. В пределах современного дна озера проходит важная в геолого-структурном отношении шовная зона сочленения Балтийского щита и Русской плиты, предопределяющая сложное взаимоотношение разнопорядковых комплексов, включающих древнейшие образования кристаллического цоколя архея. В четвертичное время в этой зоне происходили уникальные процессы развития материкового оледенения. На завершающих этапах оледенения материковый лед взаимодействовал с пресноводными (приледниковыми) бассейнами, что привело к перестройке рельефа и осадочного покрова, включая появление новых формирований специфического состава и строения (История, 1990). В результате рельеф дна Ладожского озера обладает характерными особенностями, свойственными областям, испытывающим воздействие покровного оледенения. К этим особенностям можно отнести широкое развитие интенсивно, но неглубоко расчлененных поверхностей на мелководных участках, наличие аккумулятивных поверхностей в крупных понижениях рельефа дна, малый размах относительных превышений и пологие углы склонов, интенсивное развитие процессов абразионно-аккумулятивного выравнивания. Несмотря на относительно небольшие максимальные глубины Ладоги (до 230 м), морфология дна довольно разнообразна. Здесь можно выделить несколько районов, различающихся по морфологическим характеристикам.

Термический и динамический режимы озера наряду с климатическими особенностями северо-запада России в значительной степени определяется морфометрическими характеристиками его котловины. Действительно, характерные горизонтальные и вертикальные масштабы чаши озера определяют воздействие ветра на водную толщу (разгон и параметры волнения, степень перемешивания, горизонтальные и вертикальные скорости течения), площадь определяет интенсивность обмена массой и энергией с атмосферой, средняя глубина и объем – степень инерционности проникновения тепла вглубь и теплонакопления водной массой. Особую

важность приобретает знание точных значений морфометрических характеристик для составления водного, теплового и химического баланса Ладожского озера. От формы и размеров озерной впадины зависят сроки начала ледостава и льдоразрушения. При выявлении возможных климатических изменений в термическом режиме озер необходимо учитывать, что в озерах одного и того же района, но с разными морфометрическими характеристиками или для крупного озера с различными глубинами гидрологические сезоны будут наступать в разное время и иметь отличающиеся друг от друга показатели.

Современные методы изучения озер базируются на создании их батиметрических моделей. В настоящее время построены батиметрические модели Великих Американских озер, озера Байкал и др. Цифровые модели рельефа водосбора Ладожского озера и подводного рельефа Ладожского и Онежского озер (рис. 3.1.1) созданы в ИНОЗ РАН несколько лет назад (Науменко, 1995, 2000, 2002, 2003, 2005).

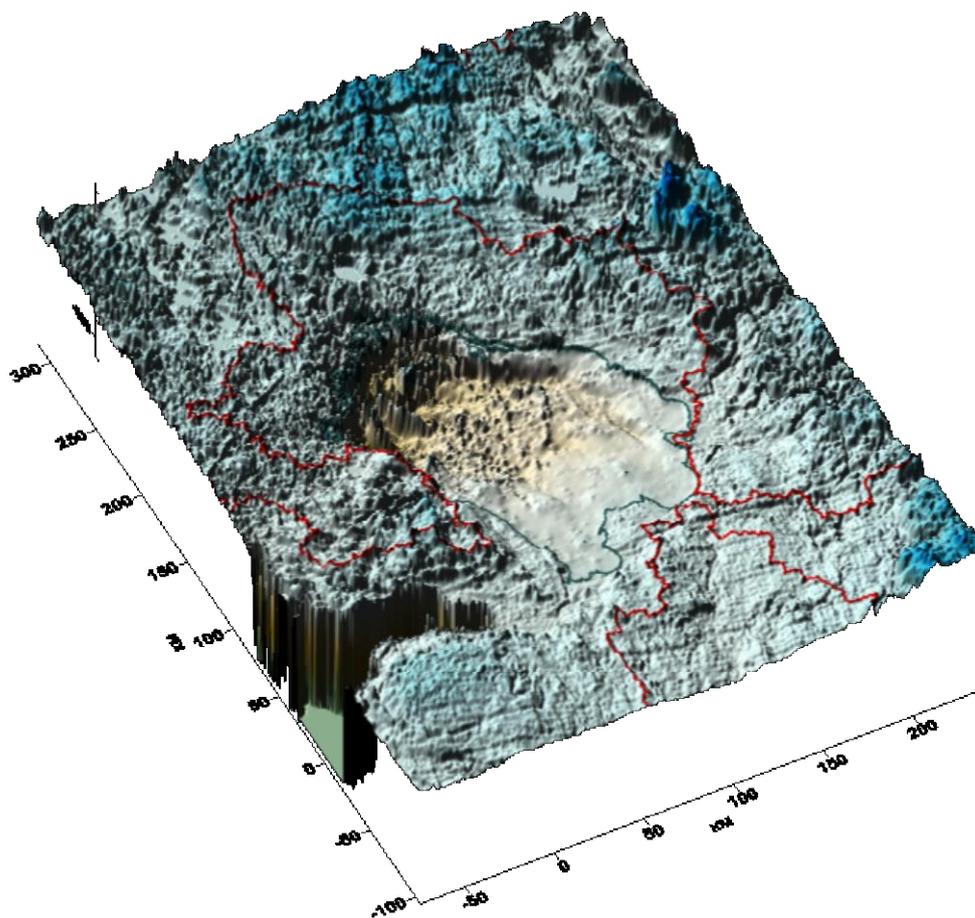


Рис. 3.1.1. Распределение глубин чаши озера и высот водосбора Ладоги.

В перечисленных публикациях описаны методические приемы создания батиметрических моделей, которые позволили определить разнообразные объемные и площадные характеристики как всей котловины Ладожского озера, так и его лимнических районов (Атлас, 2002). Общее количество точек эквидистантной сетки (шаг 0,5 x 0,5 км), используемых для вычисления морфометрических характеристик, составило 70190. На рис. 3.1.2. приведены батиметрическая и объемная кривые Ладожского озера. Объем озера, рассчитанный по современным данным, равен $847,8 \text{ км}^3 \pm 0,28 \%$. Морфометрические характеристики криптодепрессии котловины озера ниже уровня моря – площадь 16,08 тыс. км^2 , объем $761,8 \text{ км}^3$

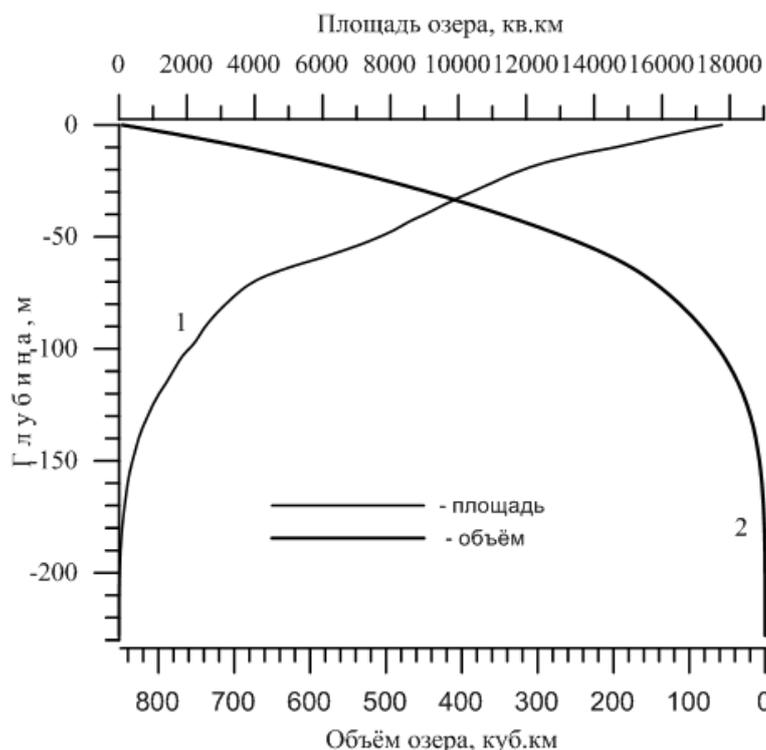


Рис 3.1.2. Батиметрическая (1) и объемная (2) кривые Ладожского озера.

Цифровая модель позволила получить различные статистические характеристики глубин озера, которые принципиально невозможно получить картографическими методами. Гистограмма глубин дна Ладожского озера имеет две моды, что свидетельствует о преобладании двух характерных диапазонов глубин. Это 0–18 м – мелководная зона и 50–70 м – зона озерного уступа (рис. 3.1.3). Гистограммы уклонов как поверхности водосбора, так и подводного рельефа озер мономодальны и асимметричны со значительным смещением максимума в область малых величин.

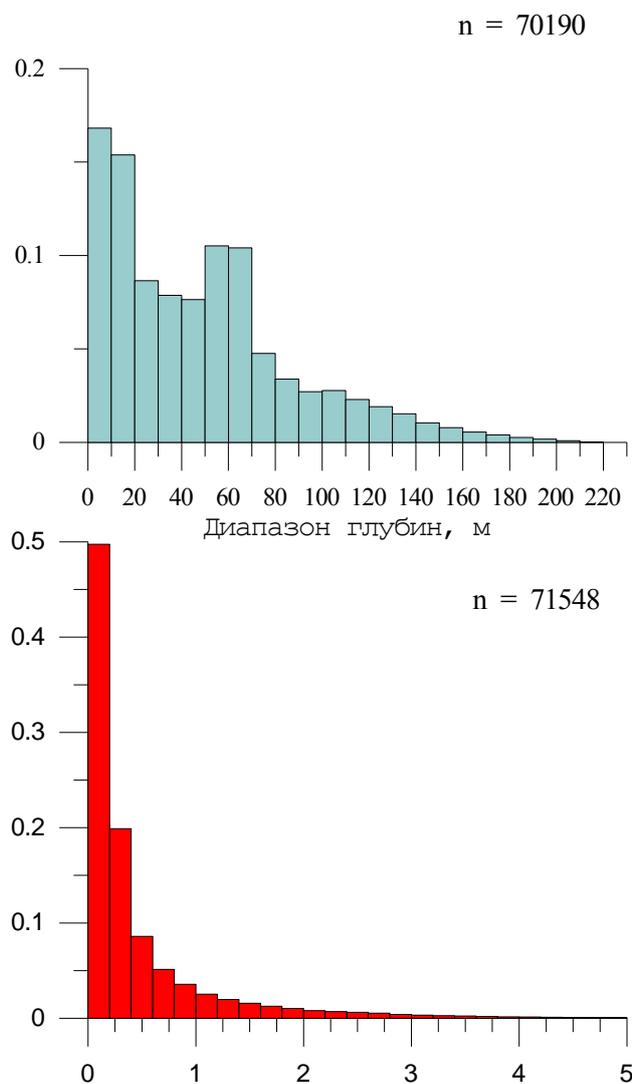


Рис. 3.1.3. Гистограммы распределения глубин (вверху) и уклонов дна (внизу) Ладожского озера.

Для крупных озер в силу больших размеров и разнообразия глубин обычно проводится районирование акватории. Принято выделять естественные районы, называемые зонами, ландшафтами и т. п., где лимнические процессы имеют одинаковую направленность. Одной из важных причин разного уровня биологической продуктивности крупных озер является различие глубин — фактор, который в значительной степени определяет термические условия, интенсивность вертикального перемешивания вод и скорости мобилизации биогенов из придонного слоя воды в зону фотосинтеза (Николаев, 1976). Соотношение продукционных и деструкционных процессов в разных районах озера определяются в основном морфометрией озерной котловины. Преобладание низких температур воды в глубоководных районах снижает интенсивность биохимического разложения в отличие от мелководных (Антропогенное..., 1982).

Районирование Ладожского озера предпринималось в 1968 г. (Тепловой ..., 1968), а затем в 1992 г. Гусаковым и Тержевиком (Ладожское..., 1992). Первое из упомянутых было достаточно

формальным и не имело целью интерпретировать районы как лимнические. Районирование Гусакова и Тержевика, приведенное на рис. 3.1.4, до сих пор успешно используется исследователями Ладожского озера.

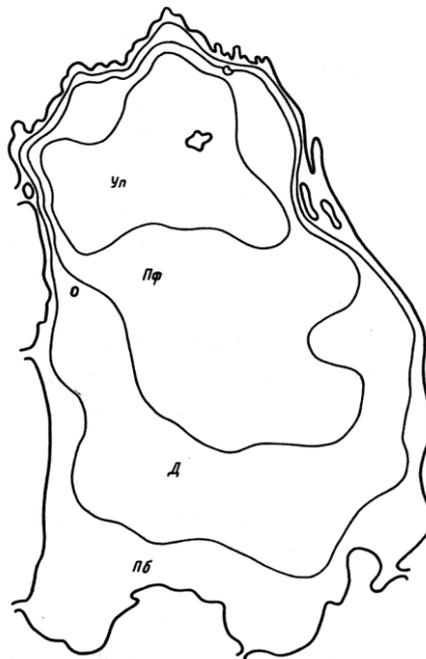


Рис. 3.1.4. Районирование Ладожского озера по Гусакову и Тержевику (Ладожское..., 1992), районы: прибрежный (пб), деклинальный (д), профундальный (пф) и ультрапрофундальный (ул).

По мере накопления информации о морфометрии озера и расширения решаемых задач на основе цифровой батиметрической модели Ладожского озера в ИНОЗ РАН проведено лимническое районирование глубин озера, необходимое для изучения эволюции физико-химических и биологических процессов в сезонном и годовом цикле. При этом использовались новые гипсометрическая кривая и гистограмма озера. Ладожское озеро было разбито на шесть районов: 1 – мелководный, 2 – переходный, 3 – район озёрного уступа, 4 – склоновый, 5 – глубоководный, 6 – впадины. На рис. 3.1.5 приводится распределение глубин Ладожского озера с границами лимнических районов, полученное на основе современной батиметрической модели. Каждый из шести выделенных лимнических районов обладает специфическими особенностями (Ладожское..., 2002). При районировании были приняты во внимание обособленность или сочлененность районов между северной и южной частями озера. Это способствовало выделению районов озера, где темпы протекания лимнических процессов в значительной мере определяются характерным распределением глубин, специфическими условиями теплонакопления и теплоотдачи в годовом термическом цикле (Науменко, 1995, Ладожское..., 2002). Важно отметить, что среди более глубоких зон могут находиться подводные возвышенности, банки, вершины которых входят в состав более мелководных зон. Они имеют своеобразный температурный режим,

свойственный мелководным зонам, что может определять повышенную продуктивность планктонных сообществ. Эти поднятия могут иметь и отличающиеся от соседних зон скорости осадконакопления. Поэтому внутри глубоководных зон могут существовать мелководные фрагменты, на что указывалось при районировании дна озера Байкал (Подводные... , 1990).

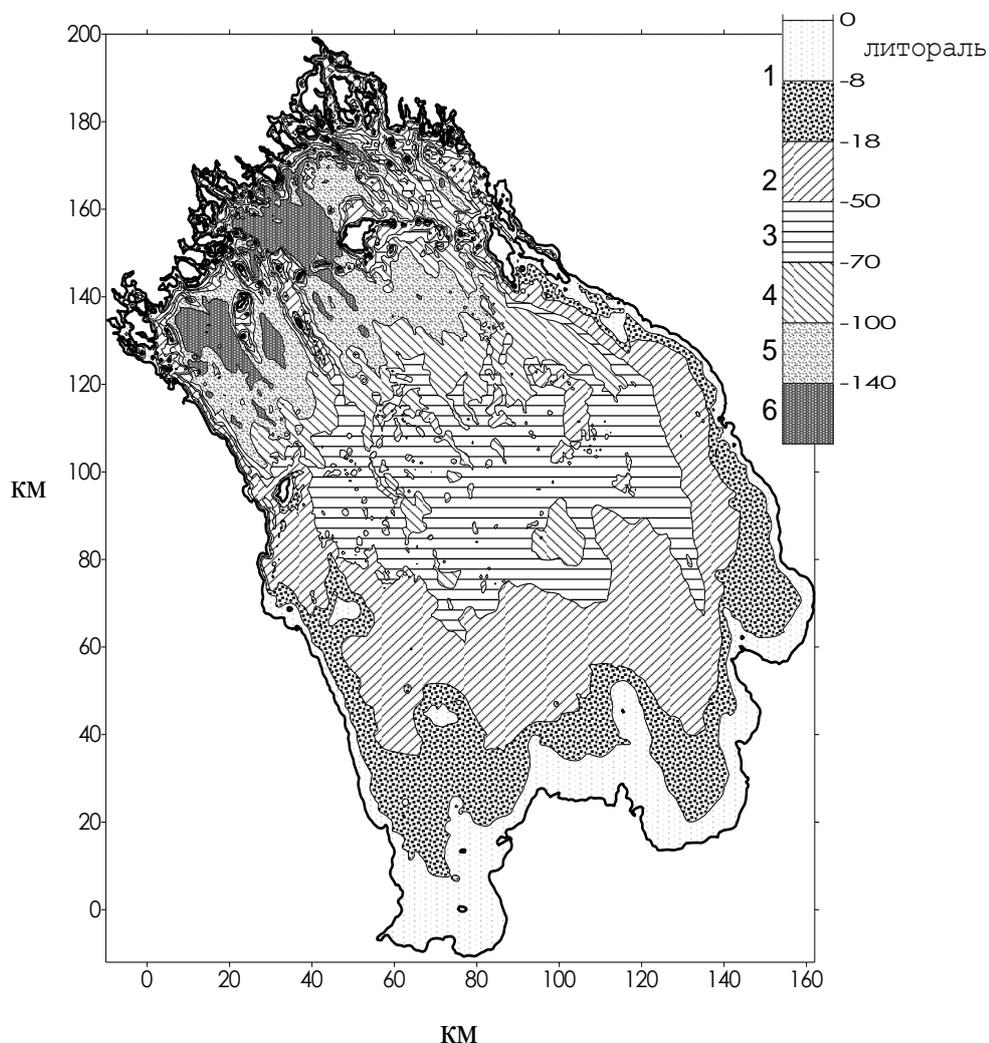


Рис. 3.1.5. Лимнические районы Ладожского озера (Ладожское... , 2002).

Статистические характеристики глубин H и уклонов γ лимнических районов Ладожского озера приводятся в табл. 3.1.1. В состав 1-го мелководного района входит литоральная зона (зона произрастания высшей водной растительности до глубины 8 м), которая занимает площадь $2543,0 \text{ км}^2$, ее объем составляет $V_{\text{лит.}} = 9,67 \text{ км}^3$ (Науменко, 2013).

Таблица 3.1.1

Морфометрические характеристики лимнических районов Ладожского озера

Район	Площадь, км ²	Объём, км ³	Характеристики	Среднее	Медиана	Диапазон Н(м) и γ (град)	Ср.квд. откл.
1	5465,0	46,7	Н, м	8,8	8,9	0,0–18	5,06
			γ , град	0,22	0,09	0,0–6,8	0,40
2	4631,3	153,6	Н, м	33,2	32,7	18–50	9,46
			γ , град	0,44	0,17	0,0–11,0	0,73
3	3693,4	221,1	Н, м	59,9	60,0	50–70	5,40
			γ , град	0,44	0,24	0,0–8,5	0,66
4	1910,0	158,4	Н, м	82,9	81,7	70–100	8,84
			γ , град	0,81	0,42	0,0–11,1	1,01
5	1487,9	174,7	Н, м	117,3	116,6	100–140	11,41
			γ , град	0,99	0,65	0,0–10,2	1,02
6	577,8	93,3	Н, м	161,9	157,2	140–230	17,11
			γ , град	1,16	0,88	0,0–11,8	1,01
все озеро	17765,4	847,8	Н, м	48,3	41,6	0,0–230	39,9
			γ , град	0,49	0,20	0,0–11,8	0,76

Здесь глубина озера вычислена как средняя из всех значений глубин менее 0 м для эквидистантной сетки 425 x 345 узлов. Традиционная средняя глубина озера, т. е. отношение объема озера к его площади, составляет 47,7 м. Рассчитаны также значения наибольшей крутизны склонов γ в каждом узле цифровой модели Ладожского озера и его водосбора. Средний уклон дна Ладожского озера ($0,48^\circ$ при ср. кв. откл. $0,76^\circ$) сравним со средним уклоном водосбора самого озера. Для водосбора Ладожского озера осредненный наибольший наклон земной поверхности составил $0,45^\circ$ при максимальном значении $3,9^\circ$. Безусловно, значения крутизны склонов водосбора несколько занижены из-за базового шага сетки 1 км по сравнению с 0,5 км для рельефа дна.

Наиболее выровненной является южная часть дна озера. Для нее характерно развитие слаборасчлененных поверхностей с незначительными относительными превышениями (1–3 м) и очень пологими уклонами (менее $0,2^\circ$). В этой части озера, начинающейся от уреза воды до глубины 18–20 м, мощность четвертичных отложений, по геофизическим данным, составляет 10–15 м (Субетто, 2009). Общая выравненность рельефа, развитого на осадочных породах, обусловлена длительным воздействием процессов площадной денудации на квазигоризонтально залегающие, относительно малоустойчивые (по сравнению с кристаллическими породами) к размыву осадочные породы.

Полого-волнистая аккумулятивная поверхность (переходный район) расположена на глубинах 20–50 м. В этом районе увеличиваются значения дисперсии как глубин, так и уклонов. В восточной части района уклоны дна, как правило, больше, чем в западной. Характерной особенностью восточной части озера является наличие довольно крупной ложбины, которая хорошо очерчивается шестидесятиметровой изобатой с перепадом глубин от 40 до 92 м. Длина ложбины около 100 км, она простирается вдоль восточного берега на расстоянии около 20 км от него. На глубинах 65–80 м она имеет симметричное строение, выше на север восточная часть озера имеет меньшие отметки дна, чем западная. Уклоны дна на всем протяжении ложбины составляют около $0,25^\circ$. Склоны не террасированы, что свидетельствует об их непохожести на речные долины. Возможно, эта ложбина является долиной стока талых ледниковых вод, на что указывает Амантов (1993).

Срединная часть Ладожского озера, где расположен геометрический центр озера, представляет собой достаточно плоскую равнину, которая по статистическим характеристикам похожа на прибрежный район. Однако относительные превышения глубин возрастают. Район характеризуется холмисто-грядовыми поверхностями экзарационно-аккумулятивного рельефа. На большой площади дна располагаются плащи ледниковых отложений, перекрытых поздне-последледниковыми отложениями общей мощностью 20–30 м (Амантов, 1993). В этом районе появляются гряды и ложбины с протяженностью 5–15 км при высоте от поверхности дна до 30 м. Уклоны этих образований достигают 1° , появляется несколько холмов с уклонами 2° на семидесятиметровой изобате. Однако уклоны в 2° существуют и в западной прибрежной части озера в районе Суханевской банки и Коневецкого пролива.

При продвижении на север расчлененность подводного рельефа Ладожского озера заметно увеличивается, относительные превышения крупных форм достигают 60–80 м. Такой морфологический облик рельефа обусловлен, по всей видимости, избирательной денудацией устойчивых к размыву кристаллических пород. Ряд крупных вытянутых возвышенностей, простирающихся с северо-северо-запада на юго-юго-восток, начинает появляться в склоновом и в следующем глубоководном районах. Вершины возвышенностей в этих районах могут являться островами, в частности Западного архипелага.

Резко расчлененный, контрастный рельеф северной части Ладожского озера отличен от менее холмистой поверхности дна центральной и южной частей озера. Четко выявляются различия в строении котловины южной и северной частей озера, граница между которыми условно проводится по линии Приозерск (западный берег) – Ууксу (северо-восточная часть озера). Севернее этой линии сказывается влияние Балтийского кристаллического щита. В районе острова Валаам и севернее его, в ладожских шхерах, особенно на северо-западе озера, уклоны склонов могут превышать 5° . Для подводного рельефа указанные значения характеризуют довольно

крутые склоны, которые встречаются редко. Их наличие является свидетельством того, что рельеф сложен породами (или выработан в породах), плохо поддающимися размыву. Выше описанный рельеф сформировался в результате длительного воздействия процессов комплексной денудации на поверхность кристаллических пород. Значительную роль в создании современного облика этих поверхностей сыграли покровные ледники. Их экзарационная деятельность привела к существенному увеличению расчлененности рельефа.

Северная часть озера, расположенная в области распространения кристаллических пород, имеет неровное дно с многочисленными глубокими впадинами, сильно изрезанными берегами и многочисленными островами. В Ладожском озере существует 16 обособленных впадин с глубинами более 140 м, которые в большинстве случаев совпадают с установленными или предполагаемыми разломами рифейского возраста. Уклоны во впадинах – максимальные для лимнических районов. Дно впадин заполнено четвертичными отложениями, мощность которых достигает до 60–70 м (Субетто, 2009), однако на склонах их может не быть совсем, что определяется крайне неровной кровлей коренного субстрата.

Одним из важных выводов, получаемых из анализа батиметрической модели, может служить вывод об обособленности северной части озера от южной. Расчеты свидетельствуют о том, что основной водообмен между указанными частями идет через проливы западнее острова Валаам. Западные проливы глубже восточных примерно на 50 м., при этом поперечное сечение западных проливов превышает поперечное сечению восточных проливов на 76%.

Характер расчлененности территории является информативным признаком рельефа. Вертикальная расчлененность подводного рельефа Ладожского озера больше, чем аналогичный показатель его частного водосбора (Науменко, Каретников, 2005). Сложность рельефа может быть определена амплитудой глубин различных районов. Чем севернее находится геометрический центр района, тем больше расчлененность и амплитуда подводного рельефа Ладожского озера.

Изложенные морфометрические особенности Ладоги и разработанные районирования акватории послужили основой для анализа происходящих в водной массе озера гидрохимических и гидробиологических процессов, результаты которого представлены в последующих разделах.

3.2. Донные отложения Ладожского озера

Распределение обстановок осадконакопления на дне Ладожского озера имеет четко проявленный асимметричный характер. В северной части озера отмечается преобладание зон аккумуляции, а в южной господствуют условия подводного размыва или «нулевой седиментации»,

что связано с особенностями геологического строения и рельефом дна, а также с палеогеографическими этапами развития Ладоги в позднем плейстоцене-голоцене.

Резко расчлененный рельеф дна на архей-протерозойском кристаллическом субстрате привел к формированию на севере Ладожского озера нескольких глубоководных седиментационных бассейнов, имеющих непосредственную связь с узкими, глубоко врезыми в сушу заливами шхерного побережья. Каждый из таких бассейнов представляет собой котловину с мощным покровом ледниково-озерных и озерных осадков (до 10 м и более), отделяющуюся от других котловин грядообразными поднятиями. Подводные гряды препятствуют обмену осадочным материалом между отдельными котловинами, которые представляют собой своеобразные конечные водоемы стока – аккумуляторы для локальных источников загрязнения – промышленных объектов Приозерска, Лахденпохьи, Питкяранты и т. д. Скорость осадконакопления в этих бассейнах, исходя из мощности накопившихся голоценовых осадков – более 10 м, составляет в настоящее время не менее 1 мм/год. Зона интенсивного накопления голоценовых осадков была также установлена у восточного берега Ладоги на глубинах 40–50 м, где происходит аккумуляция тонкого взвешенного материала, поступающего с водами рек Волхов, Сясь и Свирь. Характерна приуроченность этой зоны к глубокой погребенной долине, являющейся подводным продолжением реки Сясь, выраженной в современном рельефе дна.

Современные седиментационные бассейны обрамляются зонами неустойчивой седиментации, в которых мощность голоценовых осадков составляет 0–3 м, а разрезы неоднородны с частым чередованием песчанистых и глинистых прослоев и тонким песчаным прослоем в основании голоценовых осадков. В западной части озера обширные площади занимают зоны неустойчивой голоценовой аккумуляции (рис. 3.2.1).

Большие пространства дна Ладожского озера, особенно в его южной половине, лишены покрова современных осадков. Зоны размыва или нулевой седиментации занимают большую часть дна в губах Петрокрепость, Волховской и Свирской, а также на склонах и поверхности гряд, разделяющих седиментационные бассейны в северной части озера.

Поверхностные отложения Ладожского озера представлены всеми основными гранулометрическими типами от валунов до глин, распределение которых определяется особенностями рельефа Ладожской котловины и характером гидродинамических процессов. Гравийно-галечные отложения с валунами распространены на участках дна озера с повышенной гидродинамической активностью, преимущественно в местах размыва ледниковых отложений. Главным образом это относится к приурезовой зоне всех побережий, кроме северного, а также к склонам и поверхностям отмелей. Зона распространения этих осадков ограничена изобатами 8–10 м. В петрографическом составе валунно-галечного материала преобладают граниты-рапакиви

(40–80%), песчаники (20–50%), слюдистые и глинистые сланцы (5–15%), кварц и эффузивные породы.

Песчаные отложения (гравийно-песчаные, пески различной степени крупности и сортировки, алевритовые пески) распространены преимущественно в южной мелководной части Ладожского озера до глубин 25–30 м. Минеральный состав этого типа осадков — полевошпатово-кварцевый. Содержание кварца составляет 70–90%, полевого шпата (10–30%). Выход тяжелой фракции (0,05–0,1 мм) колеблется от 0,5 до 5%. В составе тяжелых минералов преобладают роговая обманка (до 60%), минералы группы эпидота (до 24%), рудные минералы (до 8%) и гранаты (до 5%). Алевритовые, глинисто-алевритовые, алеврито-глинистые и глинистые отложения (илы) распространены преимущественно в центральной и северной глубоководных частях озера на глубинах от 30 м до 230 м. Мощность этих осадков сильно варьирует. В северной глубоководной зоне озера (глубины свыше 100 м) во впадинах аккумулируются преимущественно алеврито-глинистые и глинистые отложения, мощность которых, по данным геоакустического зондирования, местами превышает 10 м. В центральном районе озера (глубины 50–100 м) накапливаются преимущественно глинисто-алевритовые осадки, мощность их не превышает 1–3 м. Южнее, в более мелководной зоне (30–50 м) отложения представлены преимущественно алевритами мощностью не более 1 м. Окраска илов характеризуется зеленовато-серыми, серыми, зеленовато-бурыми и бурными тонами. Их особенностью является диагенетическая полосчатость, обусловленная тонкими прослоями (1–2 мм) черного цвета, сложенными органикой и колломорфным гидротроилитом ($\text{FeS} \cdot n\text{H}_2\text{O}$). Илы сильно обводнены, содержание воды в поверхностном слое осадков достигает 80–90%. По содержанию органического вещества илы относятся к классу минеральных (потери при прокаливании составляют 2,2–12,0%). Основными компонентами илов являются углерод органический — 0,8–4,5%, валовый азот — 0,10–0,42%, P_2O_5 — 0,16–0,94%, аутигенный кремнезем — 3,5–17,1%. Минеральный состав илов представлен гидрослюдой с примесью каолинита и хлорита. Из обломочных минералов постоянно присутствуют кварц, полевой шпат и слюда. Аутигенные минералы представлены в основном гидротроилитом и вивианитом ($\text{Fe}_3(\text{PO}_4)_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$), образующимися в восстановительных условиях. На поверхности осадка на контакте вода-дно в окислительных условиях образуются железомарганцевые корки, стяжения и конкреции, в которых преобладают окислы и гидроокислы марганца (вад, псилломелан) и железа (лимонит, гидрогетит). Мощность окисленной зоны может достигать 5–10 см, а рудных корок — до 1,5–2,0 см. Илы являются хорошим сорбентом, с ними могут быть связаны зоны техногенного загрязнения.

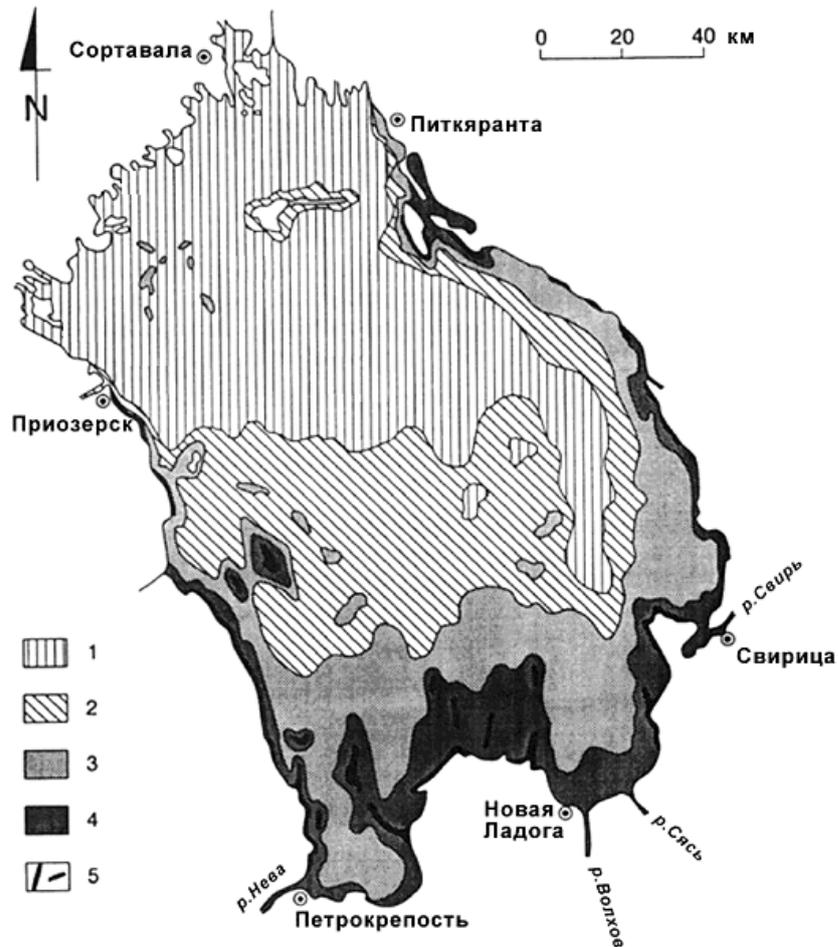


Рис. 3.2.1. Литологическая карта поверхностных донных отложений Ладожского озера (Субетто и др., 2002). 1 – алевритово-глинистые илы, 2 – алевриты, 3 – пески мелко- и среднезернистые, 4 – пески крупно- и грубозернистые, 5 – гравийно-галечные и валунные отложения.

В южной части Ладожского озера осадочный чехол сформировался в результате ладожской трансгрессии, затопившей обширные пространства Приневской и Волховской низин. Рельеф дна в этом районе озера выровнен, глубины в среднем составляют 10–20 м, достигая местами 40 м. Береговая линия изрезана и характеризуется наличием крупных бухт (бухта Петрокрепость и Волховская губа), глубоко вдающихся в сушу.

Бухта Петрокрепость имеет глубины до 20 м, дно в центральной части покрыто песками различной крупности, подстилающимися ледниково-озерными ленточными глинами. Вдоль западного и восточного берегов развиты валунные отложения (валунная отмостка), сформировавшиеся при размыве морены. Грубообломочные осадки слагают Каредежскую косу, протягивающуюся от восточного берега в меридиональном направлении. Они же покрывают поверхность отмелей, вытянутых в широтном направлении и отделяющих губу от открытого озера. Грубообломочные отложения развиты до глубин 5–6 м. Поля сомкнутых валунников или

валунно-галечных отложений сменяются разнозернистыми песками с галькой и гравием, мощность которых может достигать первых метров. В южной части бухты в береговой зоне на глубинах 0–2 м происходит заиление осадков, представленных в основном глинистыми песками или песчаными алевритами. Наиболее активные гидродинамические и литодинамические процессы наблюдаются в западной части бухты, у истока реки Невы, где скорости течения достигают 0,25–0,30 м/с. Рельеф дна и характер распределения донных отложений на этом участке существенно нарушены в результате дноуглубительных работ.

Волховская губа, как и бухта Петрокрепость, имеет в основном песчаный состав донных осадков. Валунно-галечные и гравийно-галечные образования развиты преимущественно в западной части губы и прослеживаются вплоть до 5-ти метровой изобаты. Пески покрывают более 80% дна губы, их распределение отличается своеобразной асимметрией по отношению к берегам, что отражает особенности седиментационных процессов и гидродинамического режима. Так, грубо-крупнозернистые и средне-крупнозернистые пески залегают в центральной части губы на отметках глубже 10 м. Крупное поле этих песков вытянуто также вдоль десятиметровой изобаты, где оно непосредственно граничит с грубообломочными отложениями. Небольшие по размеру поля грубо-крупнозернистых песков со значительной примесью гравия и гальки (до 10–15%) располагаются внутри зон развития грубообломочных отложений. Средне- и мелкозернистые пески образуют небольшие поля как в центре Волховской губы, так и в ее южной части между изобатами 5 и 10 м. Пески обычно хорошо сортированы, процент примеси грубообломочных и алевропелитовых частиц крайне мал. Мощность их обычно составляет 0,03–0,05 м. Мелко- и тонкозернистые пески развиты на разных глубинах и образуют обширные поля в восточной, центральной и северо-западных частях губы, а также встречаются внутри валунно-галечных образований. В приурезовой полосе на юге Волховской губы мелкозернистые песчаные отложения хорошо сортированы, характеризуются повышенным содержанием тяжелых минералов (до 3% от общего веса). Генезис этих отложений – волновой, а мощность составляет более 1 метра. Аналогичные по гранулометрическому составу, но существенно отличающиеся по внешнему облику песчаные отложения, образуют широкую полосу, отделяющую грубообломочные поля на западе губы от береговой линии. Осадки заилены, в них нередко отмечаются включения валунов. Тонкозернистые пески наиболее широко развиты на востоке и юге Волховской губы. В восточной части губы они слагают поверхность дна между изобатами 5 и 10 м, а на юге их распространение контролируется пятиметровой изобатой. В описываемых песках грубообломочный материал практически отсутствует, а алевропелитовые частицы содержатся в количестве от 6 до 28%. Наиболее тонкозернистыми донными отложениями в Волховской губе являются алевритовые и глинистые пески, образующие локальные поля напротив устьев рек Волхова и Сяси на глубинах 5–7 м, где содержание алевритовых и пелитовых частиц может достигать 40%. Описываемые осадки часто обогащены органическим детритом и с резким несогласием перекрывают подстилающие пески. Приуроченность к устьям рек и характер залегания свидетельствуют о связи алевритово-глинистых песков с твердым стоком рек Волхов и Сясь.

Дно Ладожского озера почти полностью покрыто чехлом четвертичных отложений преимущественно последнего ледниково-межледникового периода, представленных следующими основными генетическими типами – (1) ледниковыми (валунный суглинок – морена), (2) ледниково-озерными (ленточные глины), (3) переходными от ледниково-озерных к озерным (гомогенные глины) и (4) озерными (илы). Мощность четвертичных отложений больше в северной глубоководной зоне и достигает 60–70 м и меньше в южном мелководье — 10–15 м, что связано с неровной кровлей коренного субстрата. Валунные суглинки выходят на поверхность дна или перекрыты маломощным слоем ледниково-озерных и озерных отложений в южном мелководном районе озера, в литоральной зоне западного и восточного берегов, а также на склонах подводных возвышенностей и островов. Ленточные глины представлены преимущественно серыми, алеврит-пелитовыми, гидрослюдистыми осадками с низким содержанием органического вещества и мощностью от 10 до 40 м. Ленточные глины характеризуются ярко выраженной градационной слоистостью, обусловленной сезонными колебаниями поступления кластогенного материала с водосбора. Озерные илы распространены преимущественно в центральной и северной глубоководной части озера на глубинах от 30 до 230 м и занимают около 70% площади дна. Мощность илов варьирует от 10 м в северном районе озера до 1–3 м в центральном. Гранулометрический состав илов варьирует от пелитового до алевритового. Минеральный состав илов – хлорит-гидрослюдистый. Содержание органического вещества достигает 10–12 %.

Как показали исследования последних лет, для оценки процессов переноса и накопления загрязнений в донных отложениях важно иметь информацию о гранулометрическом составе мельчайших фракций донных отложений размером менее 0,001 мм (Румянцев и др., 2011; Поздняков, 2012). Это обстоятельство связано с тем, что чем меньше крупность наносов, тем большее воздействие они могут оказывать на процессы загрязнения водоемов. При уменьшении среднего диаметра частиц при переходе от одного диапазона частиц наносов к другому площадь удельной поверхности в единице объема изменяется практически на порядок. Таким образом, мельчайшие частицы взвешенных наносов способны переносить существенно больше сорбированных на их поверхности веществ. Частицы наносов размерами от 1 мкм до 1 нм относятся к так называемым высокодисперсным или коллоидным системам. Вещества же в коллоидном состоянии приобретают своеобразные свойства. Связано это с тем, что в таком состоянии значительная доля от всех молекул или атомов, составляющих вещество, находится на поверхности раздела фаз (твердой и жидкой). Молекулы приобретают особые свойства не только по своему положению в несимметричном силовом поле, но и по своему энергетическому состоянию. Как отмечается в ряде исследований, поведение всех структур диаметром менее 50 нм обусловлено, скорее, законами квантовой, нежели классической физики. Например, у таких частиц металлической природы заметно выше твердость и электропроводность, а температура плавления на несколько сотен градусов ниже, чем у традиционных порошковых металлов. Натурные исследования показали, что частицы наносов размером менее 0,002 мм достаточно широко представлены в центральной и северной частях Ладожского озера, причем на

некоторых станциях их количество превышает 30–40 % от общего состава наносов (Поздняков, 2012). При исследовании образцов донных отложений под микроскопом основной фон составляли тонкие глинистые частицы, частицы кварца и органического детрита, обломочная слюда и др.

По результатам выполненных измерений построены графики дифференциального и интегрального распределения частиц донных отложений в мельчайшем диапазоне. На рис. 3.2.2–3.2.3 приведены результаты обобщенного анализа гранулометрического состава донных отложений фракции менее 1 мм для станций, расположенных в восточной (ст. 72) и северной (ст. 204) частях озера (Поздняков, 2012).

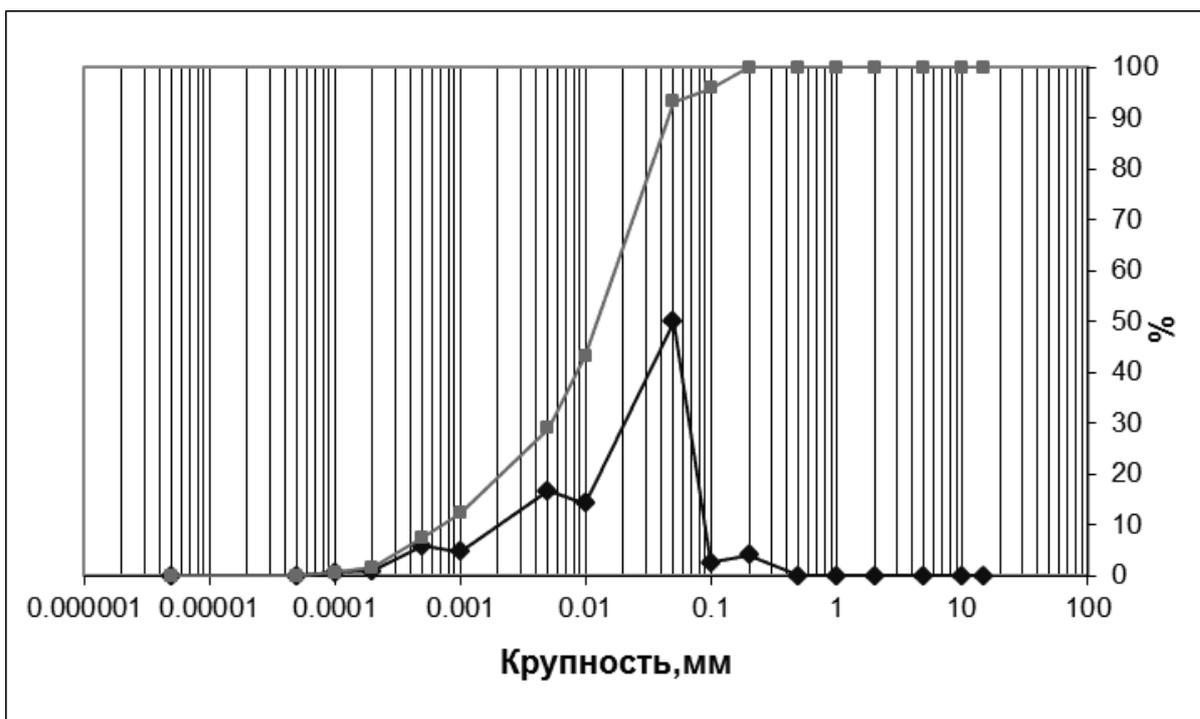


Рис. 3.2.2. Графики дифференциального и интегрального распределения частиц донных отложений по крупности в восточной части озера.

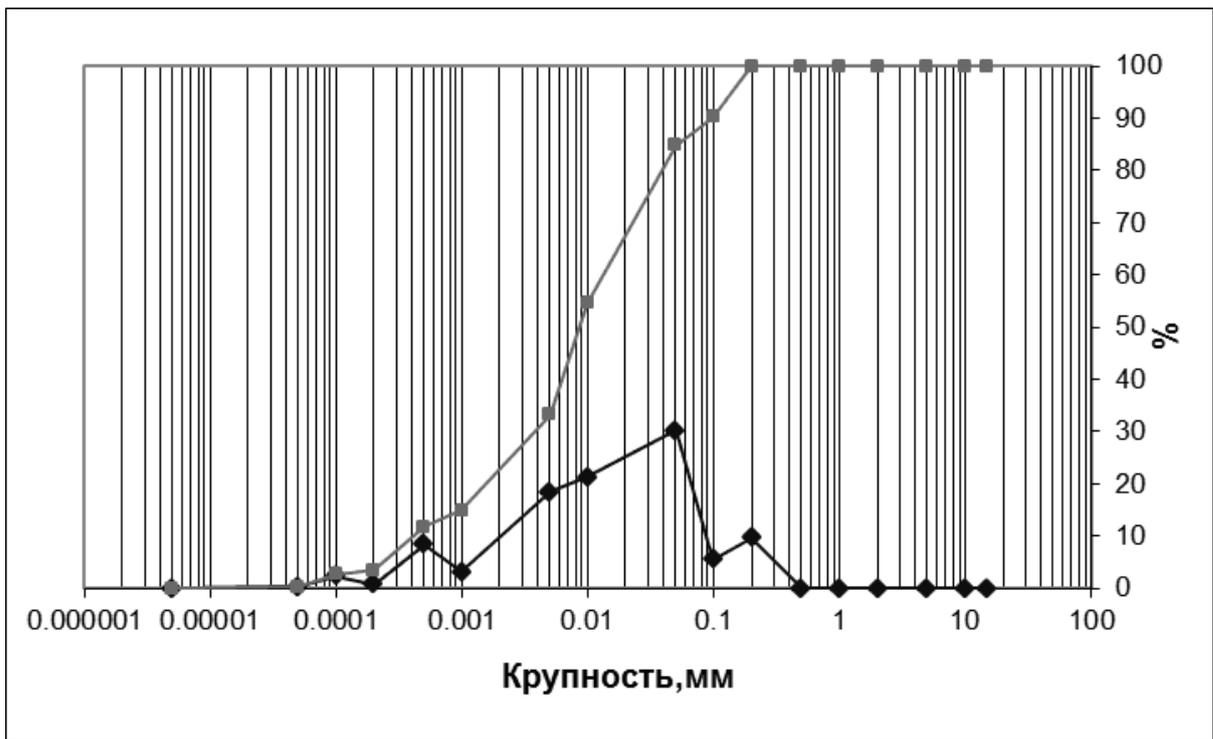


Рис. 3.2.3. Графики дифференциального и интегрального распределения частиц донных отложений по крупности в северной части озера.

Полученные данные позволили выполнить построение схем пространственного распределения процентного содержания частиц донных отложений крупностью менее 1 мм, 0.1 мм, 0.5 мм, 0.01 мм, 0.05 мм, 0.005 мм, 1000 нм, 500 нм, 200 нм и 100 нм, а также средневзвешенной крупности донных отложений и их сортированности (отношения размера частиц 5% обеспеченности к размеру частиц 95% обеспеченности). В качестве примера на рис. 3.2.4 и 3.2.5 представлены примеры таких схем.

Содержание частиц мельче 1000 нм в зонах аккумуляции мельчайших донных отложений может достигать до 30% от общего состава. В переходной и глубоководной зоне озера повсеместно присутствуют частицы размером менее 200 нм. При этом доля таких частиц увеличивается от 1% до 9% в центральной части озера. Наиболее мелкие донные отложения сосредоточены в зонах повышенных глубин к западу и к востоку от центральной части озера, при этом доля мельчайших частиц размером менее 100 нм достигает до 4–5% от общего состава наносов. Минимальные значения крупности донных отложений Ладожского озера достигают до размеров менее 50 нм, при этом доля этих частиц может составлять до 10% от состава частиц фракции менее 1 мкм и почти 1% общего состава донных отложений на конкретных станциях в зоне распространения таких наносов. Средневзвешенная крупность донных отложений лежит в диапазоне от 2 до 0.001 мм, т. е. при анализе крупности в существовавшем ранее стандартном диапазоне размеров в отдельных

районах Ладожского озера дифференцированными измерениями охватывалась практически лишь половина общего состава наносов. Сортированность донных отложений Ладожского озера возрастает в направлении юго-восточной части. Наиболее однородными частицы являются в зоне распространения крупных наносов.

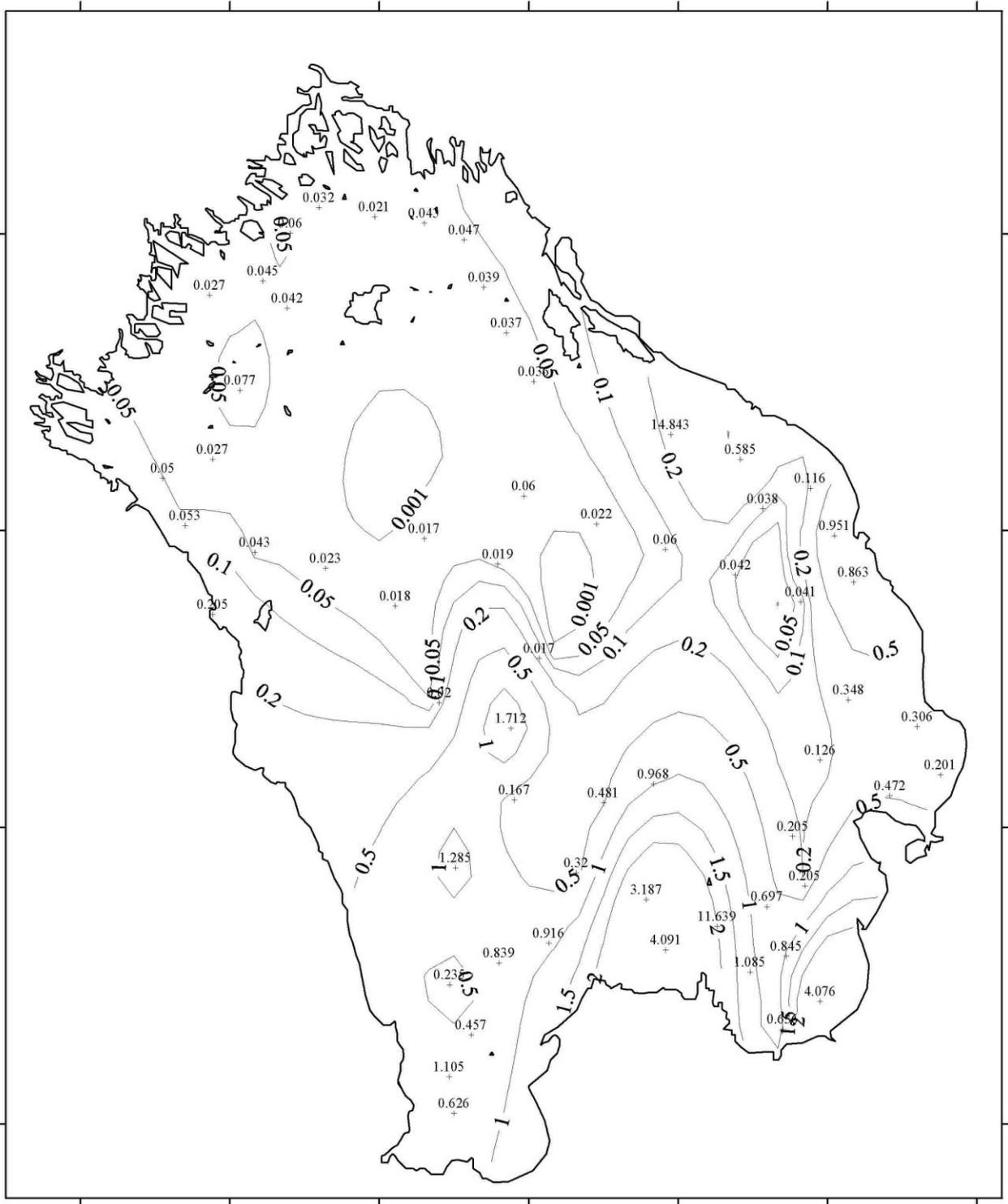


Рис. 3.2.4. Распределение средневзвешенной крупности частиц донных отложений Ладожского озера (мм).

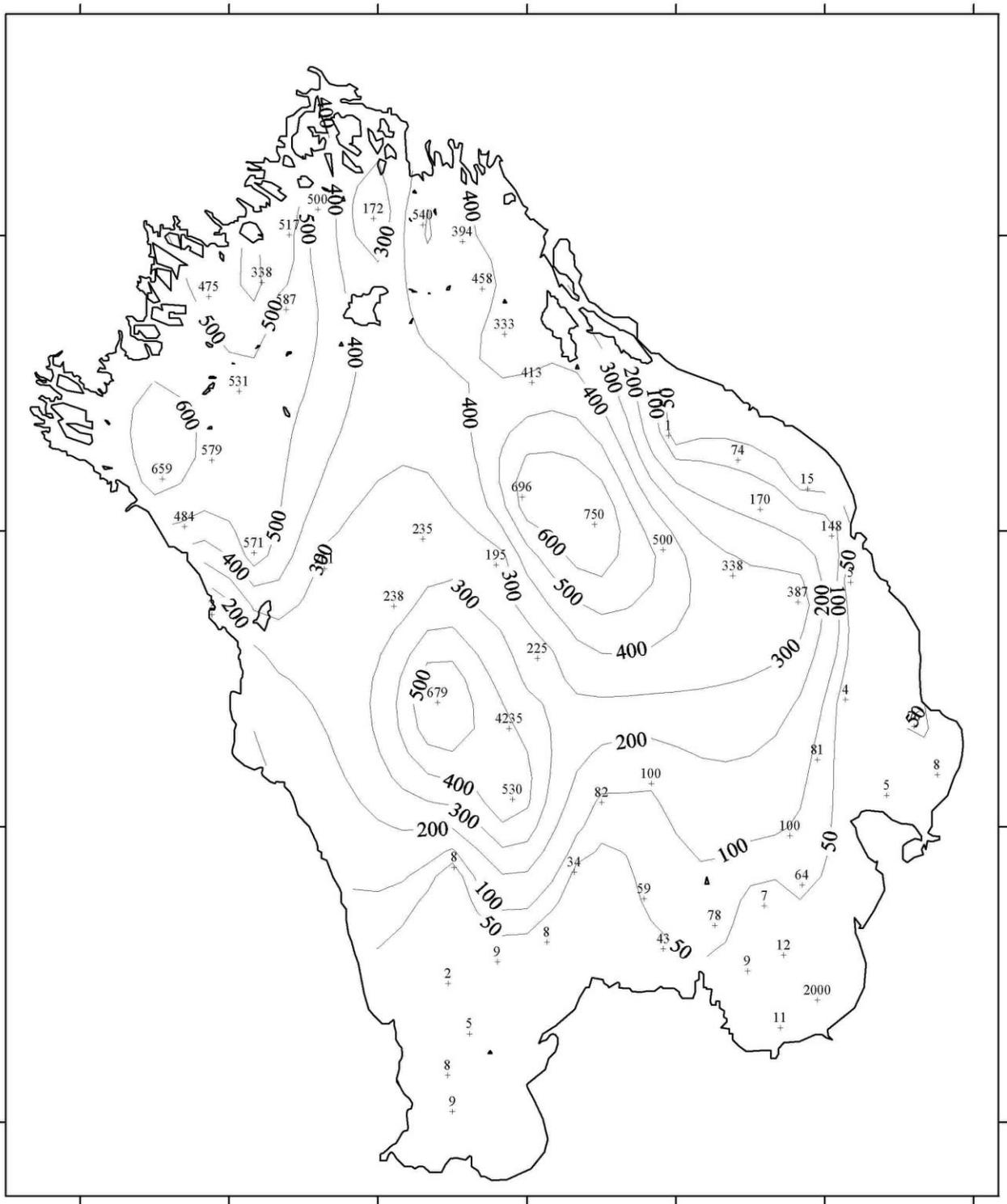


Рис. 3.2.5. Распределение сортированности частиц донных отложений Ладожского озера.

Анализ результатов исследования мелкофракционных донных отложений Ладожского озера позволяет представить общие закономерности и особенности их распределения следующим образом. Характер распределения крупности частиц при последовательном переходе от фракции к фракции качественно сохраняется практически во всем диапазоне размеров вплоть до фракции коллоидов – имеет место уменьшение размеров частиц при движении с юга на север. Крупность донных отложений уменьшается по мере продвижения к центру водоема. Зоны аккумуляции донных отложений со значительным содержанием частиц в диапазоне фракции менее 1 мкм сосредоточены преимущественно в центральном районе с некоторым смещением к северо-западу, северной части, примыкающей к Западному архипелагу и к району акватории севернее острова Валаам.

Исследованиями поверхностных проб донных отложений Ладожского озера установлено, что содержание большинства химических компонентов, за исключением валового кремнезема, находится в обратном соотношении со степенью дисперсности осадка (Субетто и др., 2002). Концентрация химических компонентов возрастает по мере уменьшения размера частиц осадков от песков к алевритам и глинам. Содержания в донных отложениях Ладожского озера большинства микроэлементов, в том числе и тяжелых металлов, низки и не отличаются от фоновых значений. Исключение составляют локальные зоны, находящиеся под прямым воздействием промышленных стоков. В этих зонах обычно отмечается повышенное содержание нефтепродуктов и других техногенных компонентов. Общее представление о пространственном распределении в открытой части озера основных, наиболее транспортабельных, тонкодисперсных компонентов вещественного состава поверхностного слоя осадков (Σ глинистой фракции и органического вещества) и содержания микроэлементов (Fe, Mn, Cu, Pb) в различной степени связанных с ними показаны на рис. 3.2.6.

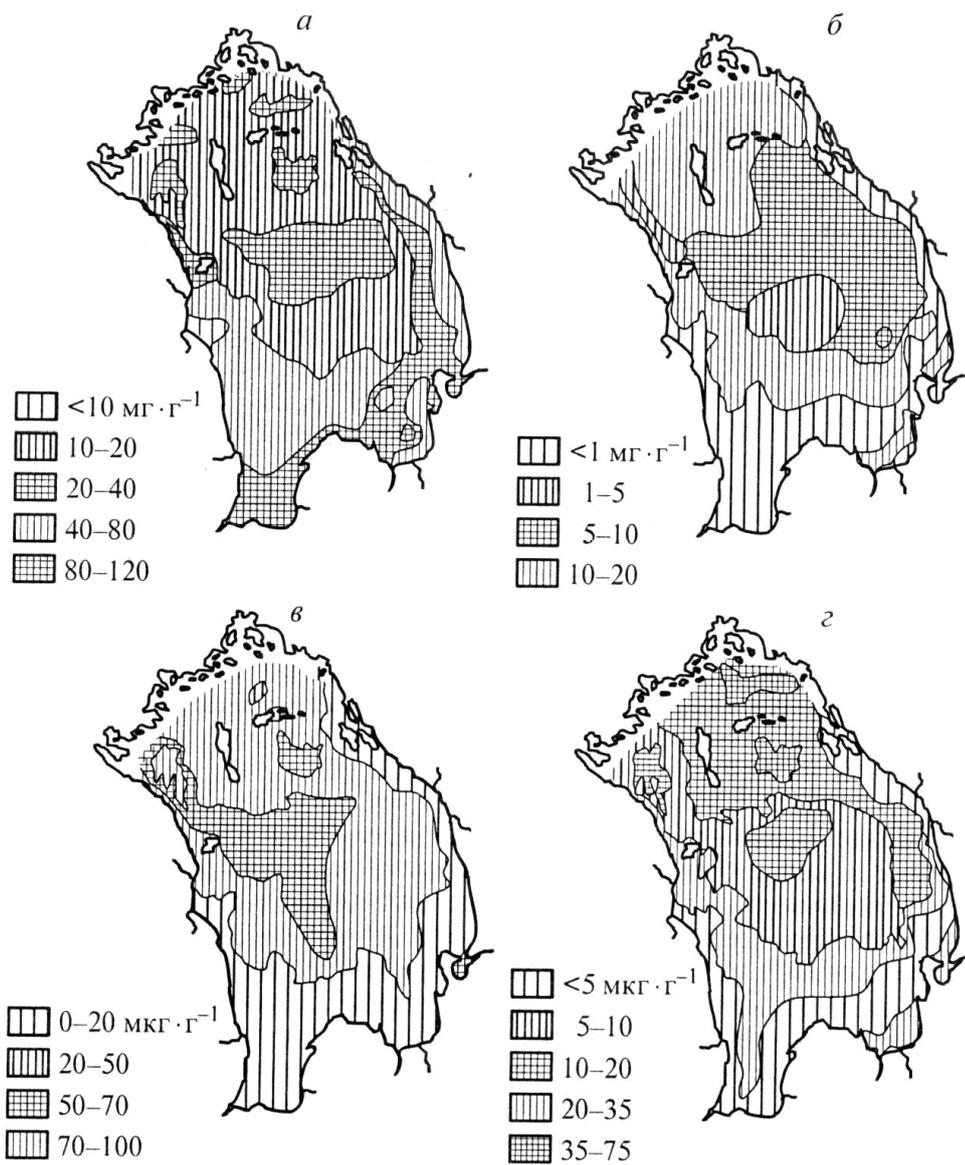


Рис. 3.2.6. Схемы распределения концентраций железа (а), марганца (б), свинца (в) и меди (г) в поверхностном слое донных отложений Ладожского озера (Субетто и др., 2002).

Из анализа этих схем следует, что пространственное распределение микроэлементов (за исключением концентраций свинца) связано с морфометрией озерной котловины и гранулометрическим составом донных отложений. Своеобразное распределение свинца (рис. 3.2.6) в виде «языка», протягивающегося от северо-западного побережья и устьев рек Вуоксы и Бурной в юго-восточном направлении, очевидно связано в большей мере с терригенной взвесью, отражающей металлогеническую специализацию пород в области выноса.

Геохимические характеристики поверхностных осадков в целом, в том числе различных гранулометрических типов в открытой части озера, в меньшей степени подверженной влиянию источников загрязнения, условно приняты в качестве показателей местного геохимического фона.

Значение коэффициента концентрации элемента (K_k), представляющего собой отношение содержания элемента в донных осадках озера к величине $K_{оп}$ (Виноградов, 1962) соответствующего элемента, показывает, что местный геохимический фон осадков характеризуется явно избыточными концентрациями железа, марганца, свинца. Коэффициент концентрации этих элементов превышает $K_{оп}$ соответственно в 1,6, 5,8 и 1,9 раз. Относительно невелики K_k циркония и кобальта (соответственно 1,2 и 1,1). К рассеянным элементам можно отнести титан, никель, ванадий, хром, медь, галлий, стронций ($K_k = 0,3-0,7$). Глинистые илы открытой части озера характеризуются наиболее высокими значениями K_k для свинца, железа (2,7), марганца (9,8). Величины K_k для титана и хрома в этих осадках (1,0) находятся на уровне величин $K_{оп}$. K_k остальных элементов в глинистых илах изменяются в пределах 0,4–0,9.

Следует отметить, что повышенное содержание железа и, особенно, марганца в осадках озера отражает особенность «железо-марганцевой провинции на Карельском перешейке» (Семенович, 1966). Аномально высокие содержания в осадках марганца и железа связаны с аутигенным минералообразованием. Повышенные по сравнению с $K_{оп}$ содержания этих элементов, а также кобальта и свинца отмечены в донных отложениях малых озер, расположенных в северной части Карельского перешейка (Тарновский, 1968; 1981). Это позволяет считать повышенные концентрации железа, марганца, свинца и кобальта специфической особенностью местной геохимической провинции.

Отмеченные выше особенности химического и гранулометрического состава осадков открытой части озера учитывались при изучении локальных особенностей распределения концентраций микроэлементов в осадках районов техногенного загрязнения на побережьях озера, которое проводилось с учетом местного геохимического фона.

Наименее загрязненными, по сравнению с осадками открытой части озера, являются донные отложения крупных заливов на южном побережье — Волховская и Свирская губы. Несмотря на то, что это — районы устойчивого и значительного техногенного прессинга, активный гидродинамический режим и интенсивные стоковые течения обеспечивают направленный вынос тонкого минерального и органического материала на север, в открытую часть озера.

Сформировавшиеся здесь в основном, песчаные и крупноалевритовые осадки характеризуются низким содержанием органического вещества (не более 2% п.п.п.) и почти всех изученных элементов. Исключение составляют более высокие концентрации железа и ванадия, что обусловлено, по-видимому, как процессами аутигенного минералообразования, так и прямыми поступлениями металлов с промышленными стоками.

В заливах, бухтах и шхерах северной, северо-западной и северо-восточной частей озера все донные отложения алеврито-пелитового и пелитового состава отличаются повышенными

концентрациями железа, меди, ванадия, хрома, никеля, титана и свинца, что связано с тонким гранулометрическим составом осадков и с металлогенической специализацией коренных пород в этой области водосбора.

На этом фоне выделяются зоны распространения загрязненных органических осадков на участках бухт и заливов, прилегающих к местам выпусков промышленных стоков (Питкярантские и Сортавальские шхеры). Донные отложения залива Питкяранта в северо-восточной части Ладожского озера характеризуются высоким содержанием органического вещества. Потери при прокаливании здесь достигают 17% при средних их значениях для осадков Ладоги 7–9%. Это приводит к сорбции различных элементов и их накоплению в донных осадках. Здесь расположена аномальная зона Cu-Sn-Zn специализации (Cu–180 мг/кг, Sn–1,8 г/кг, Zn–150 мг/кг), где наблюдается аномально высокое содержание нефтепродуктов (до 1,9 г/кг). Залив характеризуется замедленным водообменом и подвержен сильной техногенной нагрузке от расположенных рядом целлюлозно-бумажного комбината и открытого карьера, где ведется разработка и отгрузка на суда щепня. В прошлом веке в районе г. Питкяранта велась добыча меди шахтовым способом. Возможно, что аномально высокая концентрация меди в донных отложениях связана с ее высоким геохимическим фоном для этого района (Субетто и др., 2002).

Загрязнение донных осадков в Сортавальских шхерах (вблизи г. Сортавалы и пос. Ляскеля) связано с интенсивным накоплением органического материала техногенного происхождения (деревообрабатывающая промышленность). Здесь преобладают глинистые илы, характеризующиеся высоким фоновым содержанием органического вещества (14% п.п.п.) и повышенными концентрациями меди, свинца, никеля и стронция. В заливе пос. Ляскеля около выпуска отходов местного лесоперерабатывающего комбината накапливаются осадки, представленные органическим детритом с максимальными для озера величинами содержания органического вещества (30–45% п.п.п.) и аномально высоким накоплением халькофильной ассоциации элементов: меди — 120–180 мкг/г, свинца — до 75 мкг/г и стронция — до 400 мкг/г.

К востоку от г. Приозерска на западном берегу озера обнаружена значительная по размерам комплексная аномалия с повышенным содержанием Zn, Pb, Ni, Co, Mn, Fe, что связано со сбросами промышленных стоков бывшего Приозерского ЦБК. Рельеф дна озера в этом районе благоприятствует распространению придонных потоков растворенных и взвешенных веществ на большие расстояния в глубину. Однако высокие концентрации Ni здесь, скорее всего, связаны с упомянутой выше металлогенической специализацией коренных пород, поскольку промышленные стоки от ЦБК не содержат высоких концентраций этого металла.

Титан, галлий и ванадий не образуют заметных аномалий, пространственная изменчивость их концентраций связана с литологией донных осадков, что обусловило отсутствие значительных локальных источников загрязнения этими элементами.

Донные отложения открытой части озера, представленные исключительно терригенными разностями различного гранулометрического состава, в настоящее время слабо подвержены антропогенному влиянию, что отражается и в количественных показателях содержания микроэлементов, и в структуре их геохимических связей. Для выявления динамики некоторых показателей во времени (содержание пелитовой фракции, органическое вещество, концентрация меди) результаты изучения донных отложений сопоставлены с данными Семеновича (1966). При общем сходстве пространственного распределения этих показателей отмечено произошедшее увеличение средних и экстремальных их значений и расширение зон сравнительно высоких концентраций. Абсолютная величина содержания органического вещества и меди в осадках открытого озера выросли в среднем в 2 раза, а максимальные значения в шхерных районах – более чем в 6 раз (Давыдова и др., 1997; Субетто и др., 2002).

Тонкое послойное исследование коротких колонок донных отложений, отобранных в центральной части озера, с целью выявления временной изменчивости концентраций микроэлементов показало незначительное увеличение содержания свинца, цинка и меди в верхних 10–20 см осадка (Давыдова и др., 1997). Эта тенденция роста концентраций указанных элементов свидетельствует об увеличении антропогенных нагрузок, в том числе атмосферной составляющей, в накоплении тяжелых металлов в открытой части озера за последние десятилетия.

Выполнен анализ донных отложений на нефтепродукты и 3,4-бензпирен (3,4-БП), последний является одним из наиболее опасных канцерогенов класса полициклических ароматических углеводородов (ПАУ). Установлено, что наиболее загрязненными являются осадки шхерного района в северной части озера (Субетто и др., 2002). Это обусловлено главным образом деятельностью целлюлозно-бумажных и деревоперерабатывающих предприятий. В зоне выпуска сточных вод целлюлозного завода г. Питкяранта, где поверхностный слой осадка был представлен черным маслянистым наилком с запахом сероводорода, содержание 3,4-БП оказалось равным 100 мкг/кг, у поселка Импилахти – 97,8 мкг/кг. В устье реки Янисйоки, у поселка Ляскеля, где дно залива покрыто толстым слоем древесных остатков – 19 мкг/кг.

У западного побережья Ладожского озера загрязненный участок находится у г. Приозерска. Это Щучий залив, в южную часть которого в течение 20 лет поступали из озера Дроздово сточные воды Приозерского ЦБК. Несмотря на то, что южная часть залива отделена от основной акватории каменной дамбой, через 8 лет после закрытия завода верхний слой отобранных донных отложений представлял собой черную маслянистую массу. Содержание 3,4-БП в этих осадках составило 936 мкг/кг в 1994 г. В заиленном песке центральной части Щучьего залива концентрации 3,4-БП были вдвое меньше, чем за дамбой, а в мелком песке горла залива (у выхода в озеро) – в 16 раз меньше. В северной глубоководной части озера, где преобладают тонкие глинистые осадки, концентрации 3,4-БП не превышали 21 мкг/кг.

В устье реки Волхов, у поселка Новая Ладога, где донные отложения представлены алевритовым и мелкозернистым песком, концентрация 3,4-БП не превышала 13,5 мкг/кг. В крупнозернистом песке Волховской губы концентрации 3,4-БП была менее 1 мкг/кг. Однако в период активного судоходства максимальный уровень содержания 3,4-БП в донных отложениях Волховской губы и в прибрежном районе г. Приозерска по данным Ленкомэкологии составлял, соответственно, 126 мкг/кг (1997 г.) и 123, 42,6 мкг/кг (1996 г., 1997 г.). Это связано с тем, что водный транспорт и даже маломерные суда с маломощными подвесными моторами значительно загрязняют водоемы нефтяными углеводородами и ПАУ (Экологическая..., 1998; Ильницкий и др., 1993). Концентрации 3,4-БП в донных отложениях остальных станций варьировали в пределах 0–2,2 мкг/кг (в устьях рек Сясь и Свирь). Наименьшее содержание этого канцерогенного углеводорода отмечалось в южной части озера, где в донных отложениях преобладал песок. В глубоководной впадине в северо-западной части Ладожского озера на глубине 117 м в сероватобуром пелитовом иле контрольной станции 105 этот канцероген не был обнаружен. На глубоководной станции 82 глинистый ил содержал 13,8 мкг/кг 3,4-БП, а в песке на мелководье около этой станции — только 0,12 мкг/кг. В центральной части озера (ст. 55) в пелитовом иле содержание 3,4-БП составило 5,8 мкг/кг. Таким образом, аномалии нефтепродуктов приурочены к тонкодисперсным осадкам, накапливающимся вблизи локальных источников загрязнения. Высокие концентрации углеводородов (300–500 мкг/кг) характерны для глинистых осадков в центральной части озера (Иванов, Гуревич, 1995). Основными источниками нефтяных углеводородов являются воды рек Вуоксы, Волхова и Свири. Низкие концентрации нефтепродуктов и 3,4-БП или даже их полное отсутствие в осадках южной зоны Ладоги связано с малой сорбционной способностью песков, слагающих южное мелководье.

Таким образом, можно утверждать, что донные отложения на значительной площади дна Ладожского озера остаются чистыми и слабо подверженными техногенному загрязнению, за исключением локальных аномальных зон, приуроченных к точечным источникам загрязнения.

3.3. Береговая зона Ладожского озера

Трехмерное геолого-геоморфологическое пространство, охватывающее площади, примыкающие к береговой линии Ладожского озера на береговой суше и на прибрежном озерном дне, объединяются понятием «озерная береговая зона». Расчет площади береговой зоны Ладожского озера представляет собой достаточно сложную задачу, так как границы этой зоны от места к месту сильно меняются. Если на севере береговая зона часто укладывается в несколько метров, то на юге она может достигать нескольких километров. Высота волн при экстремальном

шторме в озере достигает 6 м, а их длина — 23–25 м, что обуславливает их воздействие на поверхность озерного дна до глубин более 20 м. В то же время следы влияния озерной морфо-, лито- и гидродинамики, а также эоловых процессов проявляются в пределах суши на значительном расстоянии от берега. Именно эти параметры определяют границы современной береговой зоны Ладожского озера.

Весь ход развития береговой зоны Ладожского озера связан с историей геологического развития региона и прежде всего со сменой тектонических режимов на юго-восточном склоне Балтийского кристаллического щита, сопряженной с постоянно возрастающими по мощности толщами осадочных пород Русской (Восточно-Европейской) плиты, а также с гляциальным и последующими циклами осадко- и рельефообразования. Сложная блоковая структура с чередованием поднятий и опусканий, а также пенипленизированных поверхностей (ступеней), рассеченных системами разрывных нарушений (разломов) древнейшего и древнего заложения, начиная с возраста в миллиарды лет до неоплейстоцена, т. е. до времени чуть менее 800 тыс. лет назад, подвергалась неоднократным воздействиям денудации, эрозии, оледенения и морских трансгрессий.

Площадь озерной котловины особенно активно изменялась на рубеже осташковского оледенения (IV ступень верхнего звена неоплейстоцена) и нижнего–среднего голоцена, т. е. в интервале около 11–10 тыс. лет назад. По существующим представлениям история самой береговой зоны Ладожского озера в современном понимании начинается около 10–9,7 тыс. лет назад, что связано с началом так называемой Ладожской трансгрессии, когда Ладога уже существовала в виде оконтуренного пресноводного озерного бассейна.

3.3.1. Формирование береговой зоны Ладожского озера

Начавшаяся примерно 10,3 тыс. лет назад самостоятельная история берегов Ладожского озера (Кошечкин, Субетто, 2002) привела к естественному вычленению перехода от береговой суши к прибрежному озерному дну со всем разнообразием и особенностями статических и динамических геологических, геоморфологических, ландшафтных и других характеристик. С этого времени все процессы формирования береговой зоны и ее преобразования были обусловлены современными тектоническими движениями, в значительной степени унаследованными по отношению к новейшей тектонике, а также сейсмическими событиями голоцена. Вся совокупность экзогенных геологических процессов, а также процессы морфолитодинамики в береговой зоне развивались в свою очередь под контролем эндогенной геодинамики и гидрометеорологических (климатических) обстановок. Сами площади и

конфигурация береговой зоны претерпевали существенные видоизменения во времени и пространстве под влиянием региональных и локальных изменений уровней вод Ладожского озера.

Для формирования озерной береговой зоны принципиальное значение имело начало изменения уровня Ладожского озера в результате так называемой Ладожской трансгрессии, достигшей максимума около 5 тыс. лет назад. Отметки уровней достигали 21 м на севере и 18 м на юге озерных берегов (Кошечкин, Субетто, 2002), что затем сменилось не менее существенным снижением уровня озерных вод. Причина столь резкого колебания уровня воды и связанных с ним перемещений береговой зоны объясняется изменениями порога стока озерных вод из-за различной скорости послеледникового гляциоизостатического поднятия южного Приладожья и Карельского перешейка (Айлио, 1915). По имеющимся сейчас данным (Шитов, 2007) Ладожское озеро в настоящее время испытывает самую глубокую регрессию за последние 9,5 тыс. лет. Таким образом, имеют место самые молодые формирования подводного берегового склона озера и самое широкое пространство береговой зоны в ее настоящих и предшествующих субаквальных и субаэральных генерациях.

Как известно, площадь Ладожского озера составляет 18,326 тыс. км², при этом протяженность его береговой линии достигает 1,57 тыс. км. Исходя из основных положений современного береговедения, разработанных известными советскими учеными-географами, палеогеографами и геоморфологами в 70–90-х гг. XX века, именно неразрывно связанная переходная площадь от прибрежной акватории к прилегающей полосе суши именуется береговой (прибрежной) зоной. Как уже отмечалось, границы береговой зоны, т. е. взаимосвязанных площадей, располагающихся как выше, так и ниже береговой линии, определяются в каждом конкретном случае по природным и другим в той или иной мере формализованным показателям. Нижняя (подводная) граница береговой зоны устанавливается по глубинам прекращения активного воздействия на дно прибрежных гидродинамических процессов (волнение, прибрежные течения). Верхний (сухопутный) рубеж береговой зоны проходит там, где исчезают формы рельефа, отложения, осадки и ландшафты четко проявленного взаимодействия или взаимосвязи с современным бассейном (акваторией). Следовательно, у береговой зоны существуют вполне определенные геологические, геоморфологические, лито-морфо-гидродинамические и ландшафтные границы наряду с ее юридическими, административными и другими подразделениями.

Для расчета учитывается, что нижняя (подводная) граница озерной береговой зоны может совпадать с изобатой 15 м и более (90–500 м удаления от береговой линии). Верхняя (сухопутная) граница озерной береговой зоны также изменчива и отходит, например, на 10–15 км от береговой линии в районе губы Петрокрепость или приближается к урезу воды до первых метров на обрывистых берегах северной Ладоги. Все это достаточно условно дает возможность определения

средней ширины береговой зоны Ладожского озера в пределах от 1,5 до 2 км, т. е. от изобаты 10–20 м до горизонтали 70–80 м над уровнем воды. (Молчанов, 1945; Кошечкин, Субетто, 2002). Если признать, что более чем 1000 островов Ладожского озера также целиком входят в состав его береговой зоны, то общая ее площадь с наиболее обширными пространствами на востоке и юге может составить более 5 тыс. км² (570 км² – островная часть, 4,5 тыс. км² – материковая часть).

3.3.2. Районирование и классификация береговой зоны Ладожского озера

До настоящего времени береговая зона Ладожского озера так и не стала объектом специального целенаправленного изучения и картирования. Однако озерное побережье в виде так называемого Приладожья, куда целиком входит современная береговая зона, за более чем 120 лет своего разностороннего изучения насытилось обширными данными топографо-геодезического, геоморфологического, геологического, гидрологического и другого содержания, сосредоточенными в работах плеяды известных российских и советских ученых XIX и XX вв. Первым крупным научным обобщением, содержащим сведения, в том числе о характере берегов озера, считается работа А.П. Андреева «Ладожское озеро» (1875).

В свое время стратиграфическая привязка и возрастные определения береговых образований были выполнены при микропалеонтологических исследованиях и физических методах датирования (А.П. Жузе, Е.Н. Черемисинова, и др.). При проведении геологической съемки дна Ладожского озера и составлении Государственной геологической карты масштаба 1:200 000, а также при разработке принципов составления Кадастра берегов соответствующие геолого-геоморфологические данные были получены А.Г. Шурыгиным, М.А. Спиридоновым, Г.М. Ромм, Г.А. Сусловым, А.В. Амантовым, В.В. Григорьевым и др. (1981–1985 гг.). Сведения о геологическом строении и рельефе берегов Ладожского озера собраны, прежде всего, в Институте озероведения РАН, а также в ряде других научных и практических организаций. Наиболее крупными научными обобщениями, в том числе касающимися берегов Ладожского озера, являются монография И.В. Молчанова (1945) и атлас «Ладожское озеро» под редакцией В.А. Румянцева (2002).

, Исходя из общих представлений о рельефе береговой зоны Ладожского озера, ее южная часть по своим геоморфологическим характеристикам достаточно резко отличается от северной. С некоторой долей условности эта геоморфологическая граница раздела проходит по линии от устья реки Вуоксы (61° 03' с. ш. и 30° 11' в. д.) до острова Лункулансаари (61° 20' с. ш., 31° 30' в. д.). К югу от этой границы берега озера равнинные, незначительно расчлененные, часто окаймленные песчаными пляжами и скоплениями валунов в виде площадных развалов и гряд. К северу от указанной границы высота берегов резко возрастает, и они приобретают скалистый облик. Береговая линия имеет глубоко расчлененный (изрезанный) фиардовый характер с многочисленными группами мелких островов (шхер).

Островные берега южной части Ладожского озера, например, такие, как Зеленцы или острова Кареджский и Сухо, в целом в геоморфологическом и геологическом отношении являются аналогами береговой зоны материка. Близкая к этому ситуация сохраняется на таких крупных островах, как Коневец

(западная береговая зона), а также острова Лункулансаари и Мантсинсаари у восточного берега озера. Более сложное строение имеют береговые зоны островов Валаамского и Западного архипелагов в северной части озера.

При исключительных размерах Ладожского озера в формировании его берегов принимают участие различные факторы, что обуславливает большое разнообразие типов берегов и береговых форм рельефа, которые объединяются в районы и участки по типологическому сходству с выделением отдельных типов и форм рельефа. Для классификации озерных берегов на современном уровне их изучения оптимальным является использование соответствующих разработок Института океанологии РАН, Московского Государственного Университета, Института озероведения РАН, ВСЕГЕИ и целого ряда других научных и практических организаций, а также учебных заведений.

Принципиальное значение для районирования и классификации берегов Ладожского озера имеет зональный подход. При таком подходе понятие озерный берег рассматривается как важнейшая составная часть трехмерного (четырёхмерного) природного (природно-техногенного или техногенного) пространства, тем или иным путем организованного «геоблока» в виде береговой зоны. Береговая зона, в свою очередь, определяется как переходная полоса поверхностного и подземного пространства от приозерной суши к прибрежному дну озера с особой статикой и динамикой рельефа, поверхностных геологических образований, верхней части геологического разреза и соответствующих тектонических, инженерно-геологических, геохимических, гидрогеологических и ландшафтных обстановок, где взаимосвязь и взаимовлияние субаквальных и субаэральных режимов развития имеют непосредственные и четкие проявления.

При зональном делении береговая зона Ладожского озера относится к умеренной (умеренно-холодной) климатической зоне гумидного климата с преобладанием процессов физического выветривания. Для этой зоны характерны процессы площадной денудации и линейного эрозионного расчленения. В связи с сезонностью развития снегового и ледового покровов на берегу имеют преимущественное развитие абразионно-аккумулятивные и эрозионные процессы, связанные с волновым воздействием, течениями, водотоками и колебаниями уровня воды и льдом в озере. При всем этом определенная часть берегов Ладожского озера (прежде всего за счет своего геологического строения) не несет на себе следов сильного волнового воздействия. На берегах, окаймленных растительностью, волновое воздействие также снимает активность своего проявления. В то же время за счет колебаний уровня озера в зимний период местами проявляется аккумулятивно-абразионный эффект ледового покрова в полосе его перемещения (торошения).

Исходя из наиболее общих представлений об истории геологического развития береговой зоны (берегов), их геологического строения, тектоники, геоморфологии, морфо-лито-гидродинамики и климатической зональности в Ладожском озере выделяются несколько районов (групп) береговых образований, которые в свою очередь принадлежат трем областям с определенным набором типизирующих признаков. Вполне определенные различия в общем перечне особенностей береговой зоны (берегов) связаны с их геологической структурой и, еще конкретнее, с составом пород, отложений и осадков, слагающих озерные берега. На севере Ладожского озера (в северной области береговой зоны) развиты исключительно устойчивые к разрушению гнейсы, сланцы (метаморфических образований), а также

граниты. В центральной области береговой зоны преобладают рыхлые, подверженные размыву ледниковые, водно-ледниковые и озерные четвертичные отложения. На юге, в южной береговой области озера, берега, как правило, сложены озерными неустойчивыми к переносу и переотложениям осадками.

Вне всякого сомнения, современный облик (геоморфологические и ландшафтные характеристики) береговой зоны Ладожского озера сформировался и продолжает формироваться в том числе под воздействием новейших и современных тектонических движений, что достаточно убедительно демонстрируют нивелировки береговых террас (Кошечкин, 1990). В этом случае установлен наибольший градиент изменения высот береговых линий относительно времени Ладожской трансгрессии (начиная ориентировочно с 5 тыс. лет назад). Неравномерность высот одновозрастных береговых линий, вероятнее всего, связана с дифференцированностью блоковых перемещений отдельных участков береговой зоны озера в пределах Карельского и Онежско-Ладожского перешейков, что в свою очередь происходило на фоне относительно равномерного (гляциоизостатического) поднятия всей Фенноскандии (Суббето, 2009).

Несмотря на приведенное утверждение, вопрос о типе, характере и возрасте тектонических движений, имеющих рельефообразующий эффект, продолжает оставаться предметом дискуссии (Малаховский, Амантов, 1991; Амантов, 1993; Исаченко, 1995, 1998; Экман, Лак, 1975). Таким образом, по принципу широтной зональности в Ладожском озере обособляются северные, центральные и южные области береговой зоны. С определенной долей условности северная область береговой зоны ограничивается пространством от района г. Приозерска (устья протоки Вуоксы) до района Салми (архипелаг островов Мантсинсаари — Лункулансаари). Центральная область береговых зон с подразделением на восточную и западную части ограничивается, соответственно, указанным архипелагом и устьем реки Свирь, а также истоком реки Невы и устьем Вуоксы. Южная область береговой зоны занимает пространство от устья реки Свирь до истока реки Невы. В пределах северной области выделяются фиардовый и шхерный районы. Центральная область подразделяется на восточные и западные районы с чередованием участков абразионных, аккумулятивных и блокированных берегов. В южной области имеют место участки абразионно-аккумулятивных, окаймленных и эстуарных берегов.

В пределах каждого из выделенных районов (участков) с учетом морфолитодинамических и морфогенетических особенностей выделяются соответствующие типы берегов, а именно сформированные:

- 1) субаэральными денудационными и тектоническими процессами;
- 2) преимущественно волновыми процессами;
- 3) суммарным воздействием площадных гидродинамических факторов, устьевых процессов, окаймляющей растительности.

Внутри отдельных типов берегов существует целый ряд разновидностей, индивидуальные черты которых обусловлены особенностями их продольного и поперечного профиля, высотными и глубинными отметками, степенью переработанности, активностью геогидродинамики, деятельностью растительности и техногенным воздействием. Наряду с этим различие берегов связано с изменениями в характере всей береговой зоны в каждом конкретном случае, когда имеют значение геолого-геоморфологические и ландшафтные характеристики в изменчивой по ширине полосе приозерной суши (побережья) и прилежащего (прибрежного) дна озера. В этой связи, например, в северной области береговой зоны

выделяется группа берегов, сформированных субаэральными и тектоническими процессами, мало измененных озером. В состав этой группы входят шхерный и фиардовый типы берегов с возможным подразделением на подтипы (участки) по степени изрезанности береговой линии и наличию скопления мелких островов.

Центральная область береговой зоны, как правило, включает в себя группу берегов, возникших преимущественно под воздействием волновых процессов. Преобладающим типом берегов здесь являются абразионно-аккумулятивные бухтовые образования, находящиеся в стадии выравнивания или уже достигшие состояния выровненных. Южная область береговой зоны преимущественно имеет участки берегов, относящихся к типам выравнивающихся абразионно-аккумулятивных, вторично расчлененных бухтовых, окаймленных и приустьевых (эстуарных) типов. Здесь же широко развиты аккумулятивные песчаные берега, фитогенные берега, а также берега с техногенными нарушениями. Типичную шхерную береговую зону или шхерный район северной береговой области представляют многочисленные острова на крайнем севере Ладожского озера, развитые в виде окаймляющей полосы на участке от мыса Крестовый ($61^{\circ} 32' \text{ с. ш.} - 31^{\circ} 29' \text{ в. д.}$) до мыса Рогатый ($61^{\circ} 05' \text{ с. ш.} - 30^{\circ} 07' \text{ в. д.}$), где острова сложены древнейшими коренными породами Балтийского кристаллического щита с фрагментами рыхлых четвертичных отложений ледникового и водно-ледникового происхождения.

Двигаясь от истока реки Невы к северу вдоль западного берега Ладожского озера, т. е. по западному району центральной области береговой зоны, можно наблюдать последовательный переход от одной разновидности береговой зоны к другой на уровне таких подразделений, как класс, группа и тип в сочетании азональных факторов с сохранением типологической целостности единого «геоблока» или «геокомплекса», как четырехмерной природной модели.

Самый первый или обобщенный уровень районирования и классификации береговой зоны Ладожского озера с выделением областей указывает на ее тесную связь и зависимость от позднеплейстоценовой и голоценовой истории геологического развития, геологического строения, современной тектоники, экзогенных геологических процессов, а также морфо-, лито- и гидродинамики озерного побережья и берегов. В связи с этим за основу подразделения рассматриваемой береговой зоны в качестве одного из оптимальных вариантов принимается структурно-геоморфологическое районирование (Молчанов, 1945; Атлас..., 2002). По такой схеме достаточно ограниченная в площадном отношении, но весьма характерная береговая зона на севере и северо-западе озера (между Приозерском и Питкярантским заливом) относится к так называемой условно северной (Карельской) береговой области (провинции) Ладожского озера (рис. 3.3.1). В этом случае площадь озерной береговой зоны развивалась на субстрате плотных и сверхплотных древних архейских ранне-протерозойских гнейсов, сланцев и гранитов, подвергаясь экзарационно-аккумулятивному воздействию оледенения с его производной в виде гляциоизостатической тектоники и водноледниковой деятельности.

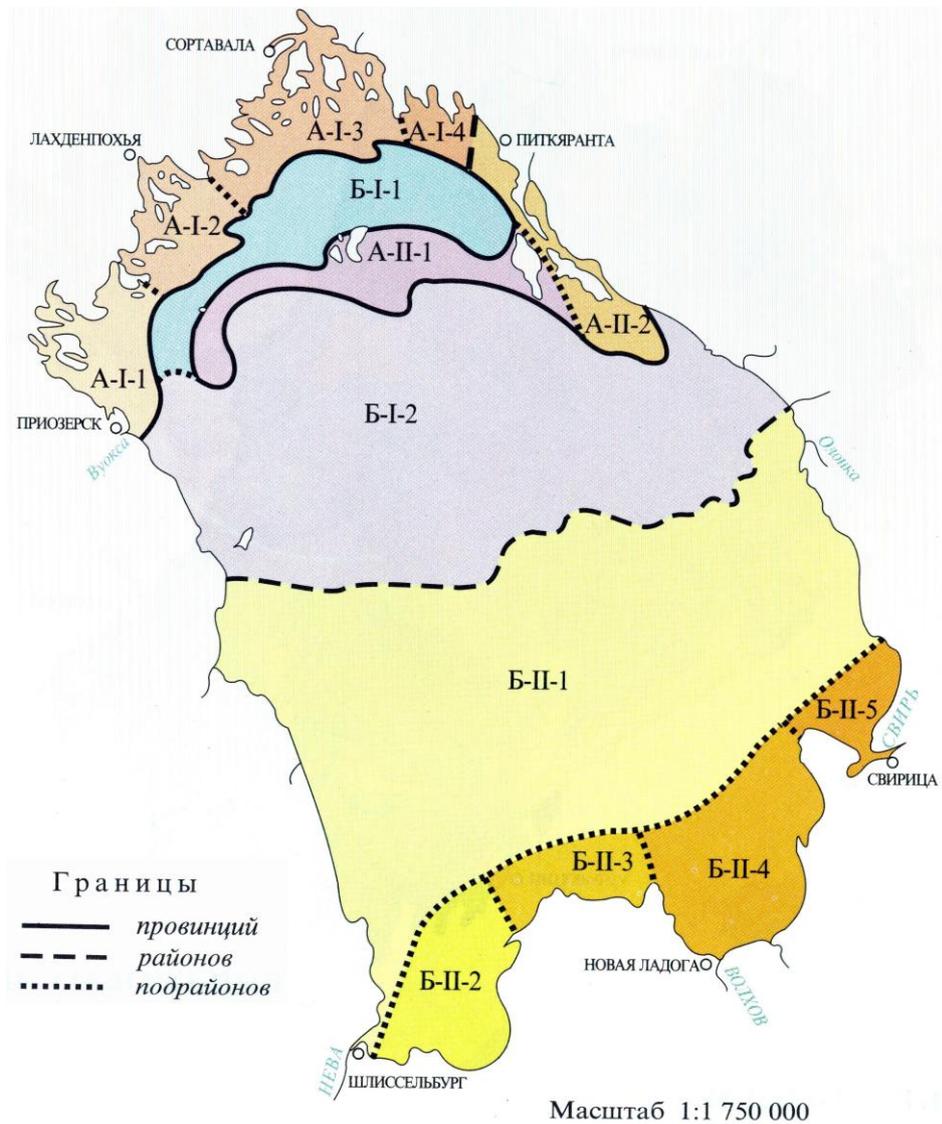


Рис. 3.3.1. Схема структурно-геоморфологического районирования котловины Ладожского озера (Атлас..., 2002). Подрайоны с индивидуальными чертами геологического строения и подтипами рельефа: А-I-1 — Куркийокский; А-I-2 — Ланденпохский; А-I-3 — Сортавальский; А-I-4 — Импилахтинский; А-II-1 — Валаамский; А-II-2 — Питкяранский; Б-I-1 — Северовалаамский; Б-I-2 — Южновалаамский; Б-II-1 — Невско-Свирский; Б-II-2 — Шлиссельбургский; Б-II-3 — Волкосарский; Б-II-4 — Волховский; Б-II-5 — Стороженский.

Вся совокупность эндогенной и экзогенной геодинамики на областном (провинциальном) уровне обусловила образование равнинного денудационно-тектонического линейно-расчлененного рельефа с локальными проявлениями ледниковой и водно-ледниковой аккумуляции в виде моренных накоплений друмлинов, озов и флювиогляциальных дельт и еще более ограниченных по площади следов абразионно-аккумулятивной деятельности послеледниковых (голоценовых) бассейнов. В конечном итоге здесь сформировалась особая северная область береговой зоны Ладожского озера в виде Приозерского, Лахденпохьяского и Сортавальского шхерных и фиардовых районов, которая относится к группе берегов «сформированных субаэральными и тектоническими процессами и мало измененных за счет гидродинамических процессов» (Ионин, Каплин, Медведев, 1961).

В группе «Ладожские шхеры и фиарды» выделяется тип берега (береговой зоны) тектонического расчленения. Наиболее распространенными типами берегового рельефа в этом случае являются многочисленные заливы различных размеров, глубин и очертаний, как, например, заливы Лехмалаhti, Куркийокский, Маркатсимансалми, Хиденселькя или Папинниемеанселькя в сочетании с многочисленными и не менее разнообразными островами от таких крупных, как Кильпола, Кухка, Соролансаари, Путсаари, Риеккалансари и др., до мелких выступов коренного субстрата в виде отдельных скал или островных групп на так называемой «опушке шхер» в виде их внешней границы.

Наряду с типичными шхерами к северной области береговой зоны Ладожского озера относятся весьма специфические образования типа «фиардов». Фиардами или фиардовым районом является подавляющее большинство заливов в северной области береговой зоны Ладоги, существующих в виде затопленных озером узких протяженных долин (ложбин), образовавшихся в результате экзарационной ледниковой обработки (выпахивания) по участкам разрывных тектонических нарушений (разломов). От классических фиордов фиарды отличаются высотными и глубинными соотношениями дна и берегов в горных и равнинных районах.

Таким образом, северная область береговой зоны Ладожского озера по принятой системе районирования распространяется с запада на восток, охватывая северные озерные берега ориентировочно от устья реки Вуокса (район г. Приозерска) до острова Мантинсаари (район г. Салми). В состав северной береговой области входят береговые районы Валаамского и Западного архипелагов. В материковой части северной береговой области естественно обособляются, хотя и тесно соприкасаются между собой, четыре района. Во-первых, своеобразную основу береговой зоны создает в этом случае фиардовый тип берегов. Берега здесь сформированы субаэральными, преимущественно ледниковыми и тектоническими процессами почти без каких-либо изменений за счет озерной гидродинамики. Морфологически

фиардовые берега представлены многочисленными заливами различных размеров и очертаний с общим вытянутым контуром по своей длинной оси на километры и даже десятки километров (рис. 3.3.2, а). Наиболее типичными фиардами являются такие заливы, как Лехмалахти, Куркийокский, Маркатсимансалми, Хиденселькя и Папинниемеенселькя.



а



б

3.3.2. Фиардовый берег внешней части залива Лехмалахти (а) и шхеры (б) в северной береговой области Ладожского озера.

Вторым районом северной береговой области служат не менее типичные образования береговой зоны в виде шхер. Шхеры в виде многочисленных островов различных размеров и очертаний окаймляют фиардовые берега, что еще более усиливает расчлененность северной береговой зоны. Острова в шхерах представляют собой выступы кристаллического фундамента, развитые на участке от мыса Крестовый ($61^{\circ} 32'$ с. ш. – $31^{\circ} 29'$ в. д.) до мыса Рогатый ($61^{\circ} 05'$ с. ш. – $30^{\circ} 07'$ в. д.) (рис. 3.3.2, б). В шхеры включаются такие крупные острова, как Кильпола, Кухка, Соролансаари, Путсаари, Риеккалансаари, а также мелкие образования коренного субстрата в виде отдельных скал и скальных скоплений («бараньих лбов», «курчавых скал», «друмлинов»). Шхерные берега и вся береговая зона носят уступовый характер, где крутизна склонов превышает десятки градусов и очень часто доходит до почти отвесных стенок. Контрастность берегового рельефа подчеркивается большими колебаниями относительных превышений. На незначительном расстоянии высоты (глубины) изменяются от уреза воды до 60–80 м.

Третий район северной береговой области Ладожского озера охватывает многочисленную группу островов архипелагов в северной части озера, крупнейшими из

которых являются остров Валаам (42 км²) (Валаамский архипелаг) и остров Хейнясенмаа (Западный архипелаг). Островные берега в этом случае по своему типу мало отличаются от береговой зоны шхер, т. е. практически не изменены под воздействием озера, за исключением локальных аккумулятивных и абразионных образований на мелкобухтовых берегах, открытых по отношению к фронту преобладающих озерных волнений. Мелкие формы берегового рельефа в большинстве случаев имеют экзарационно-тектоническое происхождение с расчленением по системам трещиноватости частично переработанных за счет морозного выветривания и ледового воздействия с гравитационным перемещением блоков пород в береговой зоне.

С геологической точки зрения вся северная область береговой зоны Ладожского озера представляет собой древнюю пенепленизированную поверхность южного склона Балтийского кристаллического щита. На фиардовых и шхерных берегах здесь развиты исключительно плотные (коренные) породы габбро-граносиенит-субщелочно-лейкогранитовой серии верхнего рифея (гранито-диабазы). В этом случае скальных субстрат береговой зоны практически не подвержен внешнему воздействию волнения, течений и ледовости, береговые уступы реагируют только на процессы выветривания в зоне заплеска, что усиливается за счет исходной трещиноватости пород.

Почти повсеместно в рельефе береговой зоны проявляются следы ледникового воздействия в виде экзарационного выпаживания препарированных поверхностей, штриховок и скоплений глыбового (валунного) материала. Только в отдельных местах, на берегах и при крайней площадной ограниченности, существуют скопления гравийно-галечного (реже грубопесчаного) и даже более тонкого материала в виде причлененных форм береговой аккумуляции. Подобная ситуация возникает при мелкобухтовом расчленении и в кутовых частях фиардов.

В северо-восточной части северной береговой зоны Ладожского озера по наличию целого ряда геологических и геоморфологических особенностей выделяется береговой район, где тектоническая предопределенность и геологическая устойчивость по отношению к волновому воздействию переходит в разряд фоновых характеристик береговой типизации. В этом случае ориентировочно от района г. Питкяранта до г. Лахти, т. е. от шхер Питкярантского залива до специфических береговых образований сходных с фиардами заливов Уксунлахти и Лункуланлахти с Мантсинсаарским проливом и с прилежащими островами и полуостровами имеет место сложное чередование берегов, находящихся в ненарушенном состоянии, с участками абразионно-аккумулятивного берегового рельефа.

На участке от г. Питкяранта до г. Салми береговая зона в основной своей материковой части представляет собой пологоволнистую равнинную поверхность, отвечающую залеганию моноклинали осадочных пород протерозоя (Можаев, 1973). По своим особенностям эта часть

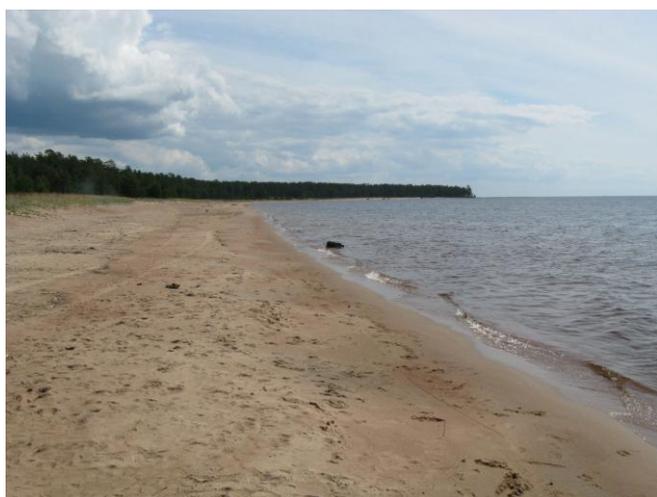
северной береговой зоны Ладожского озера выделяется в виде отдельного (переходного) района. К югу от г. Питкяранта развит мелкобухтовый, преимущественно абразионный уступовый берег, сложенный ледниковыми (моренными) отложениями. Абразия (размыв) морских отложений привела к массовому скоплению валунного материала в зоне заплеска и на подводном береговом склоне, вплоть до образования валунных бенчей. Местами берега заболочены, при этом болота спускаются до уровня воды озера.

С продвижением на юг берег становится все более отмелым. Нижняя граница береговой зоны уходит от берега на расстоянии до 3 км (изобата – 20 м). Ограничение береговой зоны со стороны суши менее четкое и, скорее всего, совпадает с уступом низкой террасы на расстоянии 2-3 км от берега. В 13 км к югу от Питкяранты характер береговой зоны и тип берега резко меняется. В целом по своему строению берег приобретает условное подобие с «риасовым» типом. В то же время основу его типологического облика составляют крупные острова и полуострова, отгораживающие от озера узкие длинные заливы (типа лагун) с системой проливов и протоков. В состав береговой зоны в этом случае входят такие крупные орографические элементы, как полуостров Уксалонпя с заливом Уксунлахти, остров Мантсинсаари с одноименным проливом, а также остров Лункулансаари с заливом Лункуланлахти. По существу этот берег является фиардовым и отвечает структурному плану территории. Этот тип берегов обладает большим разнообразием морфодинамических элементов. Открытые по отношению к Ладожскому озеру берега подвержены абразии. Берега окаймлены валунными и валунно-галечными бенчами, возникшими при размыве ледниковых отложений (Лоция..., 1999). Валунные скопления прослеживаются и на подводном береговом склоне. Нередко такие скопления формируют гряды («гривы»), особенно на подводном продолжении мысов, например, мысов Хойкканиеми и Гиваниеми, где протяженность таких форм достигает более 10 км.

Практически вся подводная площадь береговой зоны на границах двадцатиметровой изобаты несет на себе черты размыва в виде грядового расчленения, а также гравийно-галечно-валунных и грубо песчаных образований поперечной и латеральной изменчивости. Облик внутренней береговой зоны островов и полуостровов, обращенных в сторону материковой суши, отличается от берегов западной экспозиции. Здесь преобладают измененные мелко террасированные поверхности с локальными формами береговой аккумуляции. Нередки случаи зарастания и заболачивания берегов, а также заиления подводного берегового склона (заливы Уксунлахти, Лункулахти, восточный берег острова Мантсинсаари).

Юго-восточнее фиардового района Салми может быть проведена восточная граница между так называемой северной и центральной областями береговой зоны Ладожского озера. От этой границы и далее к югу (в юго-восточном направлении) характер береговой зоны и

берегов принципиально меняется (в первую очередь по очертаниям). По большинству показателей здесь имеет место выровненный отмелый абразионно-аккумулятивный берег с чередованием активных и отмерших абразионных уступов, имеющих относительное превышение не более 10–15 м и уклон от 15 до 20°. К уступам в целом ряде случаев примыкают пляжи полного выпуклого профиля шириною до 100 м (рис. 3.3.3). Ширина пляжей не является постоянной и изменяется в различные годы в связи с частыми колебаниями уровня озера. Протяженность абразионных (размывных) участков редко превышает 1–1,5 км, тогда как аккумулятивные берега распространяются на 5–7 км по протяженности. В продольном профиле берега эта ситуация маркируется чередованием выровненных (вогнутых) участков и мелких выступов берега (мысов). Соответственно происходит смена песчаного полого наклонного подводного берегового склона на каменистые бенчи грядового профиля.



а



б

3.3.3. Песчаный пляж севернее устья реки Видлица (а); валунный бенч (восточный берег) (б).

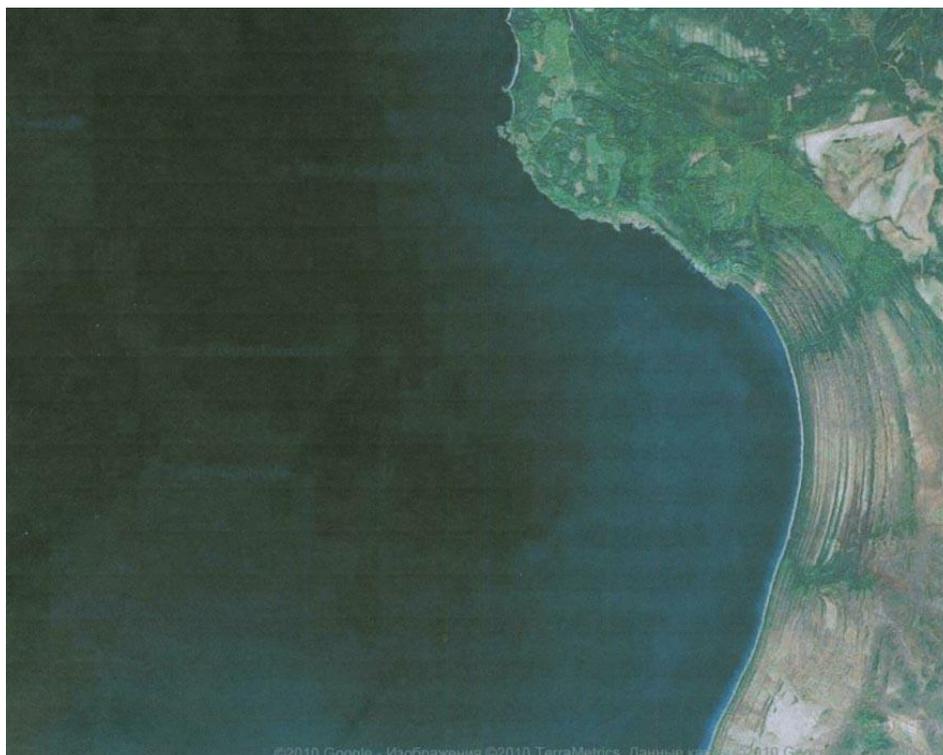
В материковой части береговой зоны прослеживаются 1–2 террасовых уровня с отмершими формами динамической аккумуляции (береговые валы, дюны). Выделенный тип берега (береговой район) сохраняется с незначительными изменениями примерно до устья реки Олонки. Далее к югу, уже в пределах другого берегового района, береговая зона, скорее всего, пересекает приподнятый неотектонический блок, который вывел в полосу более интенсивной абразии (размыва) ледниковые (моренные) отложения. Все это выражено в изменении морфодинамических характеристик береговой зоны.

На общем контуре пологого выступа береговой линии резко увеличивается изрезанность берега с образованием мыса Сало, бухты Андрусовская и целой серии более мелких аналогичных форм берегового рельефа вплоть до мыса Охта. Берег на этом участке имеет преимущественно абразионные (размывные) черты. Наличие встречных вдольбереговых потоков и наносов в районе мыса Охта обусловило формирование аккумулятивного образования типа «томболо», практически причленившего гряды Высечка к коренному берегу озера.

Южнее до устья ручья Обжанка, уже в другом береговом районе, развит пологовыгнутый контур аккумулятивного выровненного берега с серией (более 10–12) четко выраженных береговых валов дугообразной формы с перевеенным гребнем при относительной высоте более 8–10 м. Существенно возрастает ширина пляжей на приустьевых участках Тулокса — Олонка, где она достигает 300–400 м. Вдольбереговая полоса специфических форм динамической аккумуляции очень часто замыкается абразионными (размывными) уступами высотой до 10 м. В подводной части береговой зоны (на подводном береговом склоне) часто присутствует валунный бенч до отметки 2 м, а затем песчаная подводная терраса до глубины 50–80 м.

В свою очередь поверхность береговой террасы за бровкой уступа, как правило, заболочена. Устьевые части различных водотоков, пересекающих береговую зону, имеют форму типа «эстуарий», что, очевидно, связано с периодическими колебаниями уровня Ладожского озера в пределах десятков сантиметров.

Северо-восточная часть побережья Свирской губы (южнее мыса Габанов) представляет собой обширное мелководье с развитыми зарослями прибрежно-водной растительности. Ближе к устью реки Свирь материковая часть береговой зоны расширяется до более чем 10 км в виде низкой рядовой аккумулятивной равнины, образованной несколькими сериями береговых валов (до 20 гряд) высотой до 8–12 м (рис. 3.3.4). Межваловые понижения часто заболочены. Береговые валы развиты и в зоне пляжа, сохраняя свою дугообразную (вложенную) форму. Длина отдельных валов превышает 12–14 км. Судя по всему, валы присутствуют и на подводном береговом склоне, а нижняя (подводная) граница береговой зоны опускается до двадцатиметровой изобаты, о чем можно судить по составу песчаных осадков и формам подводной динамической аккумуляции. Часть береговой зоны вблизи устья реки Свирь сильно заболочена, вплоть до превращения ее в «польдеры», и выделяется в особый береговой район. Пляжи в этом районе имеют достаточно пологий, полого-выгнутый или полого-вогнутый профиль. В подавляющем большинстве случаев с пляжами связаны дюны (вовлеченные в эоловый процесс (перевеянные) береговые валы).



3.3.4. Космический снимок серии «вложенных» береговых валов на восточном участке центральной области береговой зоны Ладожского озера к северу от устья реки Свирь.

Дюны имеют форму ассиметричных валов высотой до 5–7 м и отделены от совмещенного пляжа заболоченным понижением. Под дюнными песками иногда обнажаются моренные отложения (суглинки, пески, валуны, щебень, галька). На так называемом Стороженском берегу к северу от Волчьего мыса отмечаются стабилизированные (древние) дюны. В сторону Ладожского озера дюны имеют более пологий склон, который переходит в полого наклонную поверхность с мелким террасированием и ограничением в зоне заплеска песчаным (намывным, штормовым) валом. У Стороженского мыса, а еще точнее — по его западному берегу, скорее всего, можно проводить границу между южной областью береговой зоны и восточной частью центральной береговой зоны Ладожского озера. В южной береговой области могут быть выделены два района, к которым относятся береговые зоны Волховской губы и губы Петрокрепость с таким геоморфологическим элементом второго порядка, как губа Черная Сатама. На Стороженском мысу развит уступовый абразионный (размывной) берег с очень широким валунным бенчем в надводных и подводных проявлениях шириной более 3 км. В береговой зоне существуют также абразионные (размывные) формы, как, например, Стороженский риф или банка северная Торпакова. Отдельные крупные валуны в этом районе отмечаются в 8 км от берега. Мористая (нижняя) граница береговой зоны предположительно располагается около двадцатиметровой изобаты. Западный берег Стороженского мыса по принятому делению относится уже к южной береговой области Ладожского озера.

Рассматриваемая далее береговая зона обладает вполне определенным геологическим, геоморфологическим, ландшафтным и тектоническим своеобразием. Главной отличительной чертой первого района являются его площадные границы, при которых ширина береговой зоны достигает местами 20 км и более (например, на западе Волховской губы, где внешний край береговой зоны проходит где-то вблизи десятиметровой изобаты, внутренняя граница совмещается с поднятием в районе урочища Коровий хребет). Еще более четко аналогичная ситуация проявляется во втором районе, т. е. в самой губе Петрокрепость, где особой шириной обладает подводная часть береговой зоны, простирающаяся от береговой линии более, чем на 10–15 км (т. е. до изобаты 5 м).

Участок береговой зоны от мыса Стороженский до бухты Шурыгская характеризуется как развитием выровненных абразионно-аккумулятивных типов берега, имеющего местами мелкие абразионные выступы в виде мысов (мысы Волчий Нос, Черный, Вокрушевский), так и наличием протяженных аккумулятивных участков. В ряде мест этот тип берега приобретает мелкоуступовый характер, что в целом не меняет его неизменные очертания. На значительном протяжении внутренняя (материковая) граница береговой зоны здесь условно может определяться таким техногенным рубежом, как Новолодожский (обводной) канал. В верхней части геологического разреза береговой зоны здесь развиты песчано-алевритовые отложения голоценовой Ладожской трансгрессии, которые подстилаются моренными суглинками. Близкое залегание морены маркируется валунами и валунными полями на площадях размыва.

Существенная смена типологии береговой зоны происходит постепенно при движении на юг и юго-запад от устья реки Воронежка (пос. Вороново) до поворота береговой линии в южном направлении, т. е. в кутовой части Волховской губы. В этом направлении постепенно снижается абразионная активность, подчеркнутая наличием широких валунных (каменных) бенчей (шириной до 2 км). Материковая часть береговой зоны в этом случае имеет исключительно выровненный низменный характер с широко развитым заболачиванием. В целом берега здесь носят четко выраженный облик подтопления с частичным зарастанием.

Самая южная часть береговой зоны Волховской губы характеризуется выровненным аккумулятивным типом берегов с исключительно пологим (отмельным) подводным береговым склоном. Общая ширина береговой зоны имеет не менее 10–12 км (без учета техногенной границы зоны по Новолодожскому и Старолодожскому обводным каналам, когда она сужается в береговой части до 1 км или сотен метров; в этом случае существуют искусственные насыпи – отвалы высотой от 2 до 5–6 м, а межваловые понижения обычно заболочены).

Вопрос о внутренней (материковой) границе береговой зоны в значительной мере связан с дискуссией о возрасте террасовых уровней Ладожской трансгрессии (Марков, Кошечкин, Экман, Шитов и др.). В любом случае нижняя береговая терраса сложена озерными песками и

перекрыта торфяниками, которые в свою очередь погребены под мощными сериями береговых валов (до 10–15 и более валов высотой от 1,5 до 4 км), указывающими на тесную генетическую связь с озером в его историко-геологическом понимании и, следовательно, входит в состав его береговой зоны.

Морфологические особенности береговой зоны в южной части Волховской губы очень хорошо видны на космических снимках в виде так называемых окаймляющих берегов. В строении рассматриваемого района южной береговой зоны Ладожского озера четко выделяются устья рек Волхова и Сяси, имеющие облик, позволяющий относить их к типу эстуариев. В данном случае имеют место воронкообразные расширения русел без типичных дельтовых образований, что указывает на их возникновение в результате трансгрессии озерных вод, что поддерживается периодическими существенными сгонно-нагонными колебаниями уровня.

К западу от устья реки Волхов при северо-западной экспозиции береговой линии выделяется другой район береговой зоны с наличием аккумулятивных песчано-илистых фитогенных берегов с исключительно выровненным (предельно отмелым) профилем динамического равновесия и с весьма своеобразным биогенно-эрозионным метлым расчленением. Этот тип берега своим возникновением обязан мощному развитию торфяно-болотного субстрата и не менее мощному распространению прибрежно-водной растительности в приурезовой части озера. Здесь же, на уресе воды, встречается большое количество валунов от 0,5 до 1–2 м в диаметре, которые создают своеобразные «ловушки» для накопления тонкого илистого материала. Растительные сообщества, представленные преимущественно ассоциациями тростника, также способствуют накоплению тонкого материала. При этом ширина полосы тростниковых зарослей может достигать 400–450 м и более (до 1000 м вблизи острова Птинов) (Распопов, 1968).

После очередного изменения экспозиции береговой линии Ладожского озера в его южной части в районе мыса Пайгач тип берега характеризуется как выровненный крупнобухтовый абразионно-аккумулятивный уступовый. Высота береговых уступов обычно не превышает 3–4 м. Специфической чертой рассматриваемого района южной береговой области Ладожского озера является, судя по всему, наличие мощного потока вдольбереговых песчаных наносов, идущего с северо-востока на юго-запад. Этот поток в сочетании с другими факторами активной лито-морфодинамики обусловил частое чередование типов берегов. Спряmlенные участки берега с пляжевыми накоплениями и береговыми уступами сменяются крутыми изгибами береговой линии, такими, например, как восточный берег губы Петрокрепость и губа Черная Сатама. В то же время имеет место формирование таких крупнейших аккумулятивных форм берегового рельефа, как Кареджинская коса и мыс Песоцкий нос, которые сопрягаются с

такими участками размыва, как банка Попова, банка Стрелковая, банки Варецкие Луды или отмели острова Кареджский.

Расположенный на крайнем юге Ладожского озера пологий восточный изгиб берега бухты Петрокрепость (от мыса Заячий до устья реки Кобоны) представляет собой еще один отдельный район и типичный пример низменного аккумулятивного, выровненного окаймляющего берега с предельно отмелым подводным береговым склоном, отмеченного активным зарастанием. Максимум береговой аккумуляции наблюдается на участке к северу от устья реки Назия, где аккумулятивные формы (пляжи) достигают 450–500 м в ширину. На протяжении от мыса Бугры до истока реки Невы при сохранении морфолитодинамического типа береговой зоны несколько возрастает влияние абразионного эффекта за счет северо-восточной (открытой к озеру) экспозиции, что в основном фиксируется валунными бенчами.

На достаточно условной переходной границе от южной береговой области к западной части центральной береговой области Ладожского озера расположен естественный рубеж в виде истока реки Нева. Сам невский исток представляет собой весьма своеобразный район береговой зоны озера, где на небольшом расстоянии друг от друга сменяются участки размыва, аккумуляции и подтопления техногенной переработки берегов. В районе истока реки Нева имеют место так называемые останцовые берега с 2–3 террасовыми уровнями, а также чередованием размывных и аккумулятивных участков. Наиболее типичной береговой формой прорыва является остров Ореховый. Здесь же береговая зона имеет целый ряд элементов техногенного изменения (нарушения) в виде причальных стенок, набережных и других берегозащитных гидротехнических сооружений.

Западная часть центральной области береговой зоны Ладожского озера ограничивается такими естественными рубежами, как исток реки Невы на юге и устье протоковой системы Вуокса (район Приозерска) на севере. При целом ряде объединяющих геоморфологических, геологических и морфолитодинамических характеристик эта береговая зона, как и остальные береговые зоны озера, представляет собой чередование районов с размывными и аккумулятивными типами берегов.

Район от истока реки Нева до мыса Морьин Нос представляет собой выравнивающийся абразионно-аккумулятивный мелкобухтовый берег. Здесь развиты преимущественно низменные берега, сформированные в большинстве случаев под воздействием волновых процессов. Высота береговых уступов там, где они присутствуют, не превышает первых метров (не более 8–9). В береговой зоне на суше часто встречаются мелкие гряды (1–1,5 м) на слабонаклонной поверхности равнины водно-ледникового происхождения, частично видоизмененные за счет процессов морского и озерного рельефообразования. В геологическом разрезе береговой зоны представлены песчаные отложения различного генезиса, которые переслаиваются с глинами

(алевроглинами) и торфяниками. Типичными формами берегового рельефа служат специфические каменные (валунно-галечные) скопления в виде гряд («грив»), как, например, у мысов Маяцкий Носок (Кошкин), Сосновец и Морьин Нос. Здесь же присутствуют широкие валунные (абразионные) бенчи, а также древние и современные береговые валы с локальными пляжевыми образованиями различной ширины (рис. 3.3.5). В береговой зоне этого района местами развиты оползневые процессы. Валунные бенчи в так называемом «свежем» и «отмершем» состоянии встречаются здесь достаточно часто. Обычно валуны имеют от 0,5 до 3,0 м в диаметре. Поверхностные песчаные отложения береговой зоны подстилаются плотными серыми глинами. На большом протяжении южнее мыса Осиновец развиты низкие берега, представляющие собой почти непрерывные валунные мостовые с локальными песчаными накоплениями. По участкам отмечаются также низкие песчаные берега с пляжами в десятки метров шириной. Протяженные абразионные участки берега отчленяются от участков локальной аккумуляции незначительными выступами берега в виде коротких мысов (носов), где абразия (размыв) идет особенно интенсивно. На окончаниях мысов образуются валунные гряды, далеко выходящие за пределы подводного берегового склона.

Южнее мыса Сосновец протягивается песчаная отмель, активно зарастающая прибрежно-водной растительностью, отделяющая губу Глубокую от открытой части Ладожского озера. Здесь создаются условия, благоприятные для накопления илистого материала, развития процессов заболачивания и зарастания (Распопов, 1968). Расположенный севернее мыса Морьин Нос район береговой зоны до мыса Далекый отличается исключительной выравненностью, что, вполне вероятно, может быть предопределено зоной субмеридиональных разрывных нарушений в осадочном чехле вендского и раннепротерозойского возраста. Почти на всем протяжении участки этого района западной береговой зоны принадлежат к абразионному типу берега, испытывающего периодически активную волновую переработку. Вплоть до Тайпаловского залива и далее к северу до Черемухинского залива (залива Сортанлахти) берег озера сформирован в виде наклонных и разновысотных валунных бенчей (скоплений) (рис. 3.3.5, б).



а



б

Рис. 3.3.5, а - Выравнивающийся абразионно-аккумулятивный берег в районе мыса Осиновец; б - абразионный берег севернее мыса Морьин Нос.

В то же время в районе реки Бурной берег повышается местами до 20–30 м с крутым песчаным террасовым уступом. Еще далее к северу выделяется район береговой зоны от Тайпаловского залива (устье реки Бурной) до Владимирского залива. В этом случае в береговой зоне представлен крупнобухтовый выравнивающийся абразионно-аккумулятивный тип берега. Собственно аккумулятивные участки берега с пляжевыми формированиями приурочены к пологовогнутому береговому линиям.

Несколько выделяются по своим морфолитодинамическим характеристикам берега Черемухинской бухты (залива). В кутовой части этого залива расположен песчаный пляж шириной от 15 до 30–40 м и протяженностью в несколько сотен метров. В береговой зоне бухты развиты два террасовых уровня. Первая (нижняя) терраса имеет высоту бровки около 2 м; бровка второй террасы располагается на высоте 4–6 м. Примыкающий здесь к пляжу подводный береговой склон на протяжении 50–100 м от уреза имеет очень пологий профиль с изменениями глубин от 0 до 1–1,5 м. Нижняя граница подводного берегового склона выражена в виде уступа с перепадом глубин до 20–23 м. Это является еще одним фактом, указывающим на связь рельефа береговой зоны с тектоникой.

В целом от залива Владимирский до устья реки (озерной протоки) Вуоксы (район Приозерска), береговая зона может быть условно выделена в виде района выровненного, местами пологовогнутого (мелкорасчлененного) абразионно-аккумулятивного берега. В целом здесь сохраняется уступовый тип берега с чередованием аккумулятивных и абразионных участков. Постепенно при переходе к северу высота первого берегового уступа (первой террасы) возрастает до 15–20 м. Береговые уступы в ряде случаев окаймляются песчаными пляжами, которые в свою очередь имеют мелкоуступовые размывные (абразионные) склоны.

Вдоль большей части береговой зоны сохраняются окаймляющие валунные отмостки (бенчи). Характерной особенностью этого района западной береговой зоны является наличие одного из самых крупных островов на западе Ладожского озера, носящего название Коневец. Судя по всему северный Коневец представляет собой останец моренной равнины в виде выступа ледниковых отложений. Западный и юго-западный берега острова высокие обрывистые (высота обрывов 10–15 м). Восточная береговая зона острова Коневец включает в себя абразионный тип берега с мелкобухтовым расчленением, имеющим локальные проявления аккумуляции. На крайнем юго-западе острова существует крупная форма береговой динамической аккумуляции в виде длинного узкого мыса Стрелка. Южная оконечность острова Коневец представляет собой низкий «скалистый» мыс Каменный, который, возможно, существует в виде коренного ядра друмлина или очень крупного валуна. В данном случае к скалистому берегу причленяется валунная гряда, выходящая в озеро за пределы подводного берегового склона. Наличие в береговой зоне острова Коневец валунов аномального размера, «глыб» (например, известный «Конь-камень»), напрямую связано с происхождением самого острова. В результате самого общего обзора происхождения, строения и состава пород и отложений береговой зоны Ладожского озера можно сделать следующие выводы:

- 1) береговая зона начала формироваться в период так называемой «Ладожской трансгрессии» голоцена, примерно 9 тыс. лет назад;
- 2) в составе береговой зоны достаточно четко обособляются три области, оконтуривающие неравномерно по протяженности север, центр и юг озера;
- 3) при морфогенетической классификации береговой зоны в ней выделяется целый ряд районов с теми или иными типами берегового рельефа;
- 4) наиболее характерными для береговой зоны являются шхерные и фиардовые, выровненные абразионно-аккумулятивные и аккумулятивные окаймленные берега;
- 5) наиболее активным преобразованиям подвержены берега, входящие в состав южной береговой области;
- 6) техногенно преобразованные берега имеют наибольшее распространение в южной области береговой зоны.

Обобщение результатов исследований, изложенных в Главе 3, позволяет сделать следующие основные выводы:

- 1) морфометрические характеристики котловины Ладожского озера наряду с климатическими особенностями в значительной степени определяют термический и динамический режимы озера. На основе цифровой модели откорректированы основные морфометрические характеристики и проведено лимническое районирование озера,

необходимое для изучения эволюции физико-химических и биологических процессов в сезонном и годовом цикле. Ладожское озеро разбито на шесть районов — мелководный, переходный, район озерного уступа, склоновый, глубоководный и район впадин. Темпы протекания лимнических процессов в перечисленных районах в значительной мере определяются характерным распределением глубин, а также специфическими условиями теплонакопления и теплоотдачи;

2) распределение обстановок осадконакопления на дне Ладожского озера имеет четко проявленный асимметричный характер. В северной части озера отмечается преобладание зон аккумуляции, а в южной господствуют условия подводного размыва или «нулевой седиментации», что связано с особенностями геологического строения и рельефом дна. Характер распределения крупности частиц при последовательном переходе от фракции к фракции качественно сохраняется практически во всем диапазоне размеров вплоть до фракции коллоидов. Имеет место уменьшение размеров частиц при движении с юга на север. Зоны аккумуляции донных отложений со значительным содержанием частиц в диапазоне фракции менее 1 мкм сосредоточены преимущественно в центральном районе, примыкающем к Западному архипелагу и к району акватории севернее острова Валаам. Можно утверждать, что донные отложения на значительной площади дна Ладожского озера остаются чистыми и слабо подверженными техногенному загрязнению, за исключением локальных аномальных зон, приуроченных к точечным источникам загрязнения.

Общая площадь береговой зоны с наиболее обширными пространствами на востоке и юге может составить более 5 тыс. км² (570 км² — островная часть, 4,5 тыс. км² — материковая часть). По принципу широтной зональности обособляются три типа областей береговых зон — северные, центральные и южные области береговой зоны. Северная область береговой зоны ограничивается пространством от района г. Приозерска (устья протоки Вуоксы) до района Салми (архипелаг островов Мантсинсаари — Лункулансаари). Центральная область береговых зон с подразделением на восточную и западную части ограничивается, соответственно, указанным архипелагом и устьем реки Свирь, а также истоком реки Нева и устьем Вуоксы. Южная область береговой зоны занимает пространство от устья реки Свирь до истока реки Нева. Внутри отдельных типов берегов существует целый ряд разновидностей, индивидуальные черты которых обусловлены особенностями их продольного и поперечного профиля, высотными и глубинными отметками, степенью переработанности, активностью геогидродинамики, деятельностью растительности и техногенным воздействием.

Глава 4. Гидрология

4.1. Схема мониторинга Ладожского озера

Дистанционные и контактные измерения параметров водной поверхности океанов, морей и крупных озер свидетельствуют о значительной пространственной неоднородности различных масштабов: от сантиметров до десятков и сотен километров. Успех исследований в крупном озере во многом определяется правильно сформулированной и осуществленной методикой наблюдений. Выбор методики наблюдений в первую очередь зависит от масштаба изучаемого термодинамического процесса или явления. Для оптимизации системы наблюдений имеющимися приборами необходимо разработать методы получения информации о состоянии водного объекта с высоким пространственным и временным разрешением и адаптивностью характеристик методов к объектам контроля (Кондратьев, Поздняков, 1985). Появление новых методов изучения лимнических процессов крупных озер, применение малоинерционной аппаратуры и приборов для длительных измерений, а также использование авиационной и космической информации позволили выявить принципиально новые пространственные явления: вихревые, грибовидные и интрузионные образования, фронты, апвеллинги и др., — имеющие различные масштабы в пространстве и времени. Сочетание дистанционных и контактных измерений параметров водной поверхности необходимо на современном этапе исследований.

Наблюдения термогидродинамических процессов являются важными в общем мониторинге экосистем крупных озер. Методы биологического мониторинга в значительной степени отличны от методов гидрологического и гидрохимического мониторинга. Однако только комплексные и синхронные наблюдения позволяют определить направленность и главенствующую роль тех или иных изменений в экосистеме. Система поверхностных течений, возбуждаемых ветром или иными причинами, зоны фронтальных разделов, области вертикальных движений определяют пространственные неоднородности различных полей: температуры, консервативных и неконсервативных субстанций, поля оптических параметров и т. п. Специфика исследований гидрофизических процессов в крупном озере заключается в пространственно-временной разномасштабности изучаемых явлений. В крупном озере формируются термические структуры с характерными масштабами, определяемыми распределением глубин озера (Науменко и др., 2000), что приводит к соответствующему структурированию не только термических, но гидрофизических, гидрохимических и гидробиологических параметров. Это положение крайне важно при планировании системы мониторинга в Ладожском озере.

Традиционные методы измерения температуры и других скалярных и векторных параметров озерных вод, на основе которых к настоящему времени получена основная

информация о крупных озерах мира, базируются на проведении измерений на гидрологических станциях от поверхности до дна. Пока в общей массе исследований как гидрофизических, так и тем более биологических, базовая информация получена по стандартной методике выполнения разрезов и станций. Расположение станций по акватории выбирается в соответствии с особенностями гидрологического режима, рельефа дна, возможно более быстрым выполнением съемки всего озера. На станциях выполняется общепринятый комплекс метеорологических и гидрологических параметров.

Первая схема станций и основных разрезов наблюдений на Ладожском озере была создана в начале XX в. и усовершенствована в 50-е гг. XX в. (Тепловой ..., 1968). Современное расположение станций контактных измерений и отбора проб на акватории Ладожского озера с указанием их номеров в соответствии с системой многолетних наблюдений Института озероведения РАН приведена на рис. 4.1.1.

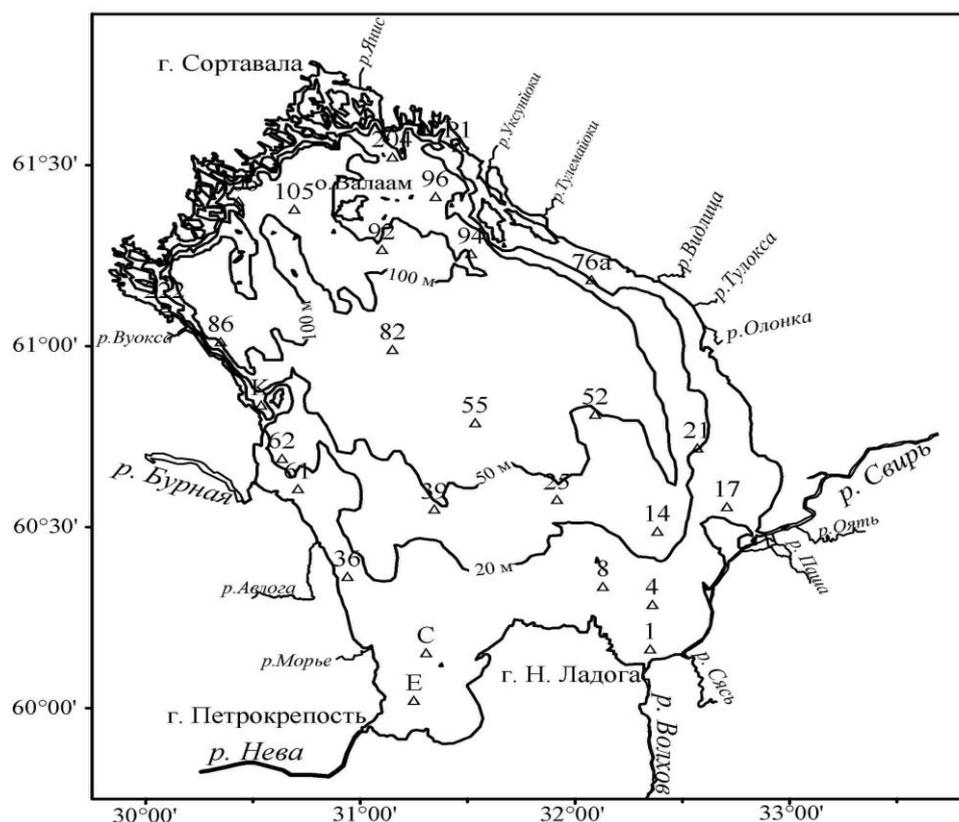


Рис. 4.1.1. Расположение станций регулярных наблюдений, выполняемых Институтом озероведения РАН на акватории Ладожского озера.

4.2. Водный баланс и многолетние колебания уровня Ладожского озера

Основное влияние на формирование колебаний уровня озера (H), составляющих притока-стока оказывает своеобразный режим тепла и влаги территории северо-запада России, во многом находящийся под влиянием воздушных масс, поступающих преимущественно из северной Атлантики. Большие размеры акватории Ладожского озера и его водосбора – Ладожской озерной системы, определяют пространственную неоднородность режима тепла и влаги: этот режим неодинаков в разных ее частях. Уровень Ладожского озера можно рассматривать как интегральный показатель колебаний климата на большой территории. Условная полная смена воды в озере может происходить примерно 1 раз в 11–12 лет. По соотношению элементов приходной и расходной частей водного баланса озеро относится к стоково-приточному типу, где преобладающими составляющими являются речной приток и сток. Роль осадков и испарения значительно меньше.

В то же время на формирование уровенного режима оказывают влияние особенности строения озерной системы, определяющие ее отклик на климатические сигналы. Это, в первую очередь, размеры бассейна, его высокая озерность и форма русла вытекающей из озера реки Нева. В бассейне озера сосредоточено более 50 тыс. озер разного размера, регулирующих речной сток, в том числе крупнейшие озера — Онежское, Сайма, Ильмень. Режим притока играет главную роль в формировании уровня озера, так как в водном балансе Ладожского озера приток по рекам составляет более 85% всей приходной части водного баланса. При этом около 90% от общего притока поступает по трем крупнейшим рекам: Свири, Волхову и Вуоксе, — сток которых зарегулирован перечисленными выше озерами, соответственно Онежским, Ильменем, Саймой. Многолетние колебания уровня озера изучены достаточно хорошо (Doganovski, 1997, Филатов, Сало, 1996, Филатов, 1997); тем не менее для совершенствования методов расчетов и прогнозов, необходимых для водоснабжения, судоходства, рыболовства и др., следует знать генезис условий, их формирующих. Поэтому важным элементом анализа режима является расчет водного баланса, который был выполнен по годовым интервалам за период, лучше всего освещенный наблюдениями.

Для анализа этих условий всю систему Ладожского озера следует разделить на частные бассейны: Волхов — до Волховской ГЭС (район I), Свирь — до Верхне-Свирской ГЭС (район II), Вуокса — до Тайнионкской ГЭС (район III), само озеро и прилегающая к нему территория (район IV). Таким образом, режим колебаний уровня Ладожского озера должен во многом определяться уровенным режимом перечисленных выше озер. Однако главным показателем особенностей формирования уровня озера является водный баланс.

4.2.1. Водный баланс озера

Уровенный режим озера определяется соотношением элементов водного баланса и представляет собой преобразованную величину ежегодных приращений уровней. Уравнение водного баланса, представленное основными его элементами, имеет вид:

$$V_{пр} + V_{ос} - V_{ст} - V_{исп} = \pm \Delta V \quad (4.2.1)$$

где $V_{пр}$ — ежегодный приток вод по рекам и подземным путем, $V_{ос}$ — атмосферные осадки на поверхность озера, $V_{ст}$ — сток воды по реке Нева, $V_{исп}$ — испарение с водной поверхности озера.

Приток воды в озеро по рекам является достаточно точно определяемой компонентой, так как около 80% площади водосбора озера приходится на три наиболее крупные и хорошо изученные реки: Свирь, Волхов, Вуокса (соответственно I–III районы). Хорошо изученными являются реки, впадающие в озеро с территории IV района — Оять, Сясь, Паша. Изученными можно также считать реки Олонку, Видлицу, Вьюн и др. Определение стока с неосвоенных площадей выполнено с помощью метода аналогов. Атмосферные осадки составляет около 10% приходной части баланса. Однако эти величины заметно варьируют. Анализ распределения осадков по площади показал, что в разных частях озера выпадает неодинаковое количество осадков, а на станции Валаам отчетливо фиксируется плювиометрическая депрессия (5–6%). При этом более неравномерно осадки выпадают летом (коэффициент корреляции между рядами осадков на разных станциях $r < 0,7$ зафиксирован при расстоянии между ними более 90 км). Зимой связь более тесная; даже на расстоянии 200 км $r = 0,80$. Всего анализ проведен по 10 станциям, при расчетах баланса принято 3 станции. Среднее значение годовых осадков, выпавших на поверхность озера, определено как средневзвешенная величина.

Сток воды из озера происходит по реке Нева. Свое начало река берет в юго-западной части озера из бухты Петрокрепость, которые в плане сужается в сторону истока Невы. Изучение стока реки начато после 1900 г. у Петрокрепости, с 1946 г. — у Новосаратовки в 27 км от устья. На участке от истока Невы до Новосаратовки в озеро впадают реки Мга, Тосно, Ижора и по крайней мере 10 постоянно действующих малых водотоков. Суммарный сток этих объектов составляет около 3% стока Невы у Новосаратовки. В отдельные годы величина незначительно меняется.

Испарение с поверхности озера выполнено с открытой воды по формуле ГГИ, со льда по формуле П.П. Кузьмина, и, также как и атмосферные осадки, эти значения усреднены по площади.

Результирующей уравнения водного баланса озера является приращение объемов воды (уровней) за каждый год. При этом для определения строго горизонтальной поверхности озера на начало и конец каждого года (для исключения денивеляции) принята методика осреднения уровней за 5 предшествующих и 5 следующих за 1 января дней. В качестве опорного поста выбран пост Сясьские Рядки. Степень синхронности колебаний уровня на нескольких постах оценена коэффициентами корреляции, которые во всех случаях выше 0,97.

4.2.2. Особенности многолетних колебаний уровня озер

Изменение уровня Ладожского озера вызывает изменение не только площади (объёма) всего озера, но и литоральной зоны и конфигурации береговой линии, приводящее к различной степени воздействия волн на берег и интенсивности прогрева воды в прибрежной части. На

основе откорректированной морфометрической модели Ладожского озера (Науменко, 1995) с пространственным разрешением **500×500** м были рассчитаны площади и объемы всего озера и литоральной зоны при различных уровнях.

Понижение уровня озера на 1 м уменьшает его площадь на 2,2%, повышение на 1 м — увеличивает площадь на 2,5%, объем озера соответственно уменьшается или увеличивается практически на одну и ту же величину 17,8 км³ (на 2,2% от уровня озера при 5,1 м БС). Площадь и объем литоральной зоны рассчитаны с учетом постоянства глубины нижней границы зоны на отметке 8 м от реального уровня, т. е. нижняя граница водной растительности изменяется пропорционально уровню. Площадь литоральной зоны при навигационной отметке уровня 5,1 м (назовем ее средней) равняется $S_{\text{лит.}} = 2543.0 \text{ км}^2$, а объем составляет $V_{\text{лит.}} = 9,67 \text{ км}^3$. Годы с годовой амплитудой не менее 100 см характеризуются высокой изменчивостью уровня Ладожского озера. Литоральная зона в эти годы претерпевала значительные изменения своих характеристик, ее площадь изменялась до 10%. На рис. 4.2.1, а приведены статистические характеристики и ход среднемесячного уровня озера по посту Сясьские Рядки за период с 1859 по 2011 гг. Уровень отсчитывается от уровня Балтийского моря (Кронштадский футшток). Уровни с 1859-1880 гг. восстановлены по посту Валаам. Статистические характеристики изменений уровня приведены в таблице и на рис. 4.2.1.

Таблица 4.2.1

Статистические характеристики многолетних изменений уровня Ладожского озера

Статистики	Среднемесячные значения – 1859 - 2011			
	Минимум	Ср.год.	Максимум	Годовая амплитуда
Минимум, см	333,0 (I, 2003)	360,8 (1940)	374,0 (V, 1940)	23,0 (1940)
Максимум, см	556,0 (XII, 1924)	608,9 (1924)	664,0 (VI, 1924)	129,0 (1899) 129,0 (1962)
Диапазон, см	223,0	248,2	290,0	106,0
Среднее, см	440,6	478,4	511,5	71,0
Медиана, см	441	480,2	510,0	68,0
25% квантиль, см	412,8	445,2	474,5	54
75% квантиль, см	472	508,2	544,2	84
Ошибка среднего, см	3,4	3,7	4,2	1,9
Ср. квадр. откл., см	42,4	45,6	51,2	23,0

В таблице в скобках указаны даты экстремумов. На рис. 4.2.1 цифры у экстремальных значений уровня показывают годы, когда эти значения наблюдались. Различия между минимальным и максимальным уровнем для каждого месяца с января по декабрь за весь период наблюдений составляет около трех метров. Это означает, что степень изменчивости среднемесячного уровня велика по сравнению со среднегодовой амплитудой, которая не превышает 70 см. Указанное значение амплитуды наиболее вероятно, о чем свидетельствует гистограмма (рис. 4.2.1, б). Годовая амплитуда уровня определяет площадь литоральной зоны.

При таянии снега повышение уровня наблюдается с апреля. Самый высокий летний уровень обычно имеет место в июне, реже — в июле или августе в зависимости от весенних и летних осадков. В годы с обильными осенними осадками максимальный уровень достигается в конце года. Наименьший уровень обычно наступает в декабре – январе.

Положения о цикличности колебаний общей увлажнённости территории водосборов крупных озёр и, как следствие, их уровней и стока рек, сформулированное Шнитниковым (1968) являются важными при рассмотрении уровня режима Ладожского озера. Следуя положениям Шнитникова, водный баланс рассчитывался по циклам и фазам водности. За весь период наблюдений выделено несколько полных циклов колебаний — квазитридцатилетние циклы (циклы Шнитникова) водности Ладожского озера (Шнитников, 1969). Можно констатировать, что во всех циклах в приходной части баланса доля притока достигает 83–89%, а доля осадков 15–11 %. В расходной части сток из озера составляет 90–94% и 10–8% приходится на испарение (Атлас..., 2002).

Различие фазовых балансов состоит в том, что в маловодную фазу по сравнению с многоводной происходит сокращение объема притока, стока и осадков с незначительным увеличением испарения. Например, в цикле 1953–1980 гг. в многоводную фазу доля притока составила 87%, а доля стока — 93%, в маловодную фазу их относительная величина уменьшилась до 85 и 90% соответственно, тогда как роль осадков и испарения возросла и составила 15 и 10%.

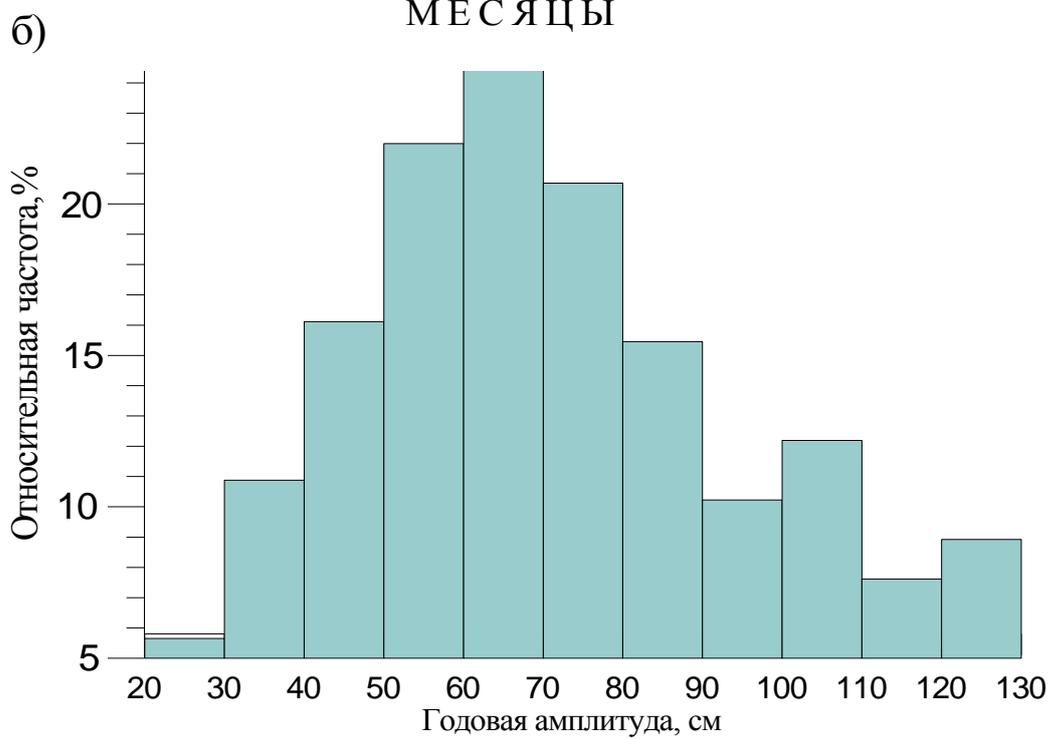
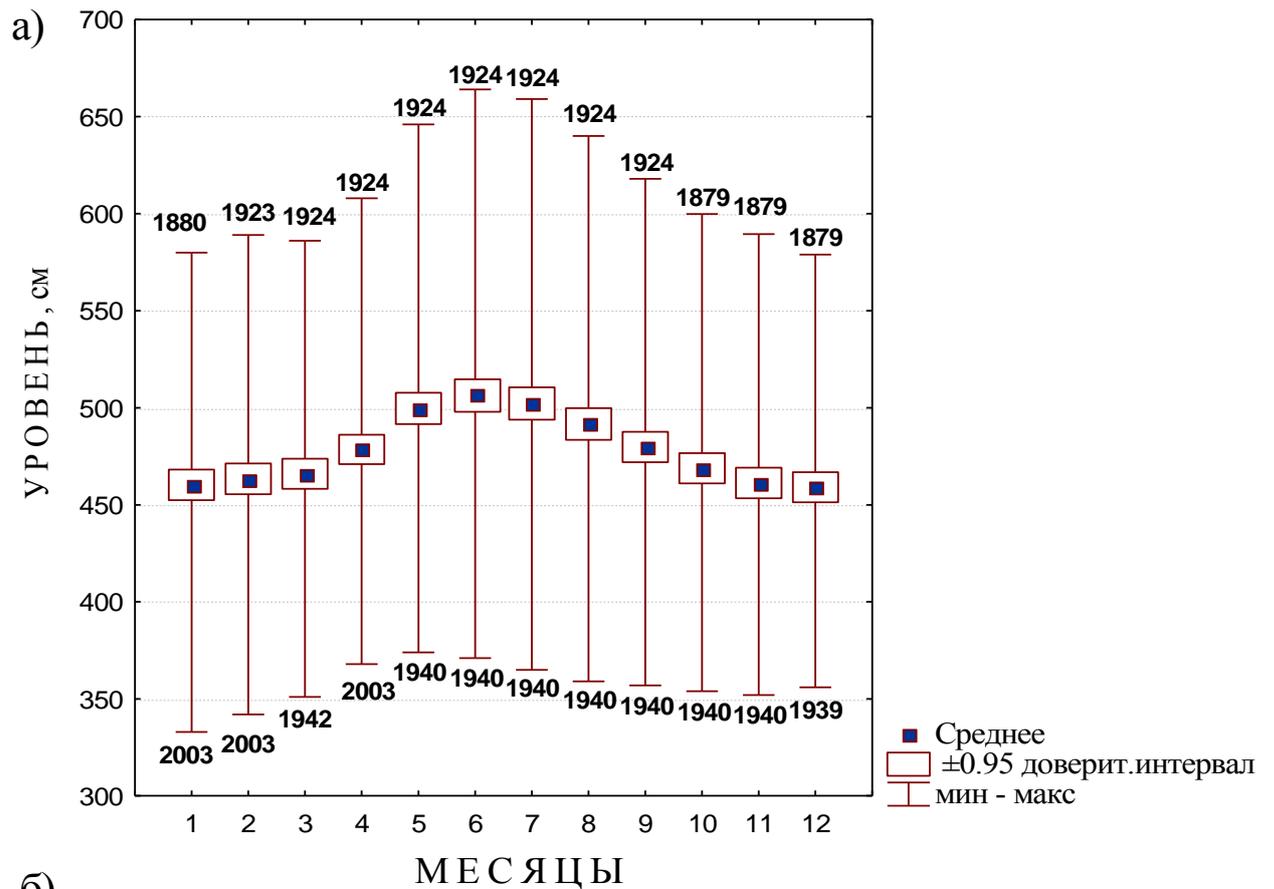


Рис. 4.2.1. Статистические характеристики уровня и гистограмма годовых амплитуд Ладожского озера.

За весь период наблюдений отмечается тенденция к уменьшению среднемесячного уровня со скоростью около 2,4 см за 10 лет.

При определенных допущениях ряд уровней Ладожского озера можно считать стационарными в широком смысле, что чаще всего делается авторами, занимающимися моделированием рядов и прогнозов. Для исследования структуры временного ряда уровней Ладожского озера за период инструментальных наблюдений рассмотрены его выборочные спектры (рис. 4.2.2), которые позволили установить наличие хорошо выраженных периодов повышенной и пониженной водности продолжительностью 28–32 и 5–6 лет. Первые превосходят спектральные годовые уровни в 10–15 раз, вторые – в 2–3 раза.

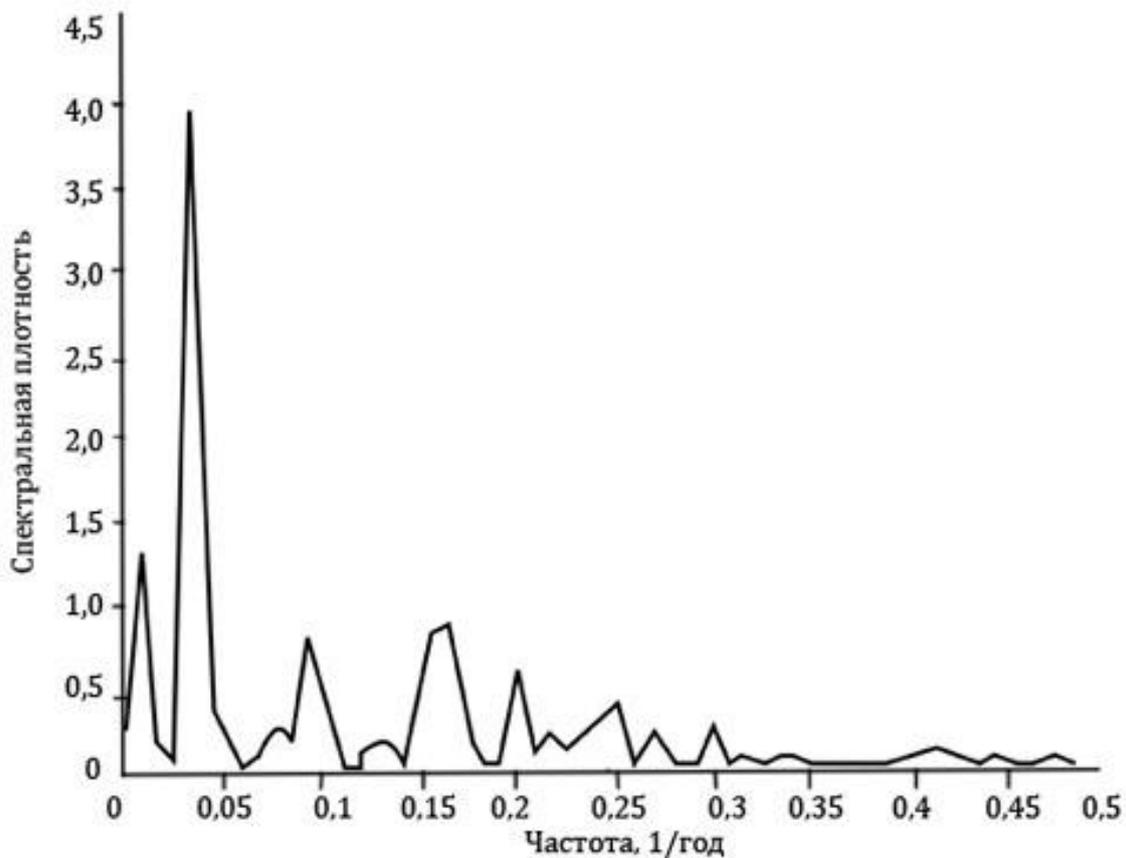


Рис. 4.2.2. Спектр межгодовых колебаний уровня Ладожского озера.

Установленные закономерности дают возможность провести фильтрацию рядов и выделить соответствующие (значимые) гармонические составляющие. Для выделения гармоник и фиксаций квазипериодических колебаний использован метод быстрого преобразования Фурье. При этом каждому выявленному периоду соответствует определенный номер гармоники. Для аппроксимации тридцатилетних колебаний использованы первые шесть гармоник. Для выделения более высокочастотных колебаний номера гармоник возрастают.

На рис. 4.2.3 приведен график колебаний уровня Ладожского озера за весь период наблюдений, на котором представлены квазитридцатилетний цикл изменчивости уровня озера (цикл Шнитникова), возможно, девятидесятилетние колебания и отрицательный линейный тренд (значим при $p = 10\%$). Из рис. 4.2.3 следует, что за рассматриваемый период годовой уровень понизился более чем на 43 см, объем воды в озере уменьшился на $8,1 \text{ км}^3$.

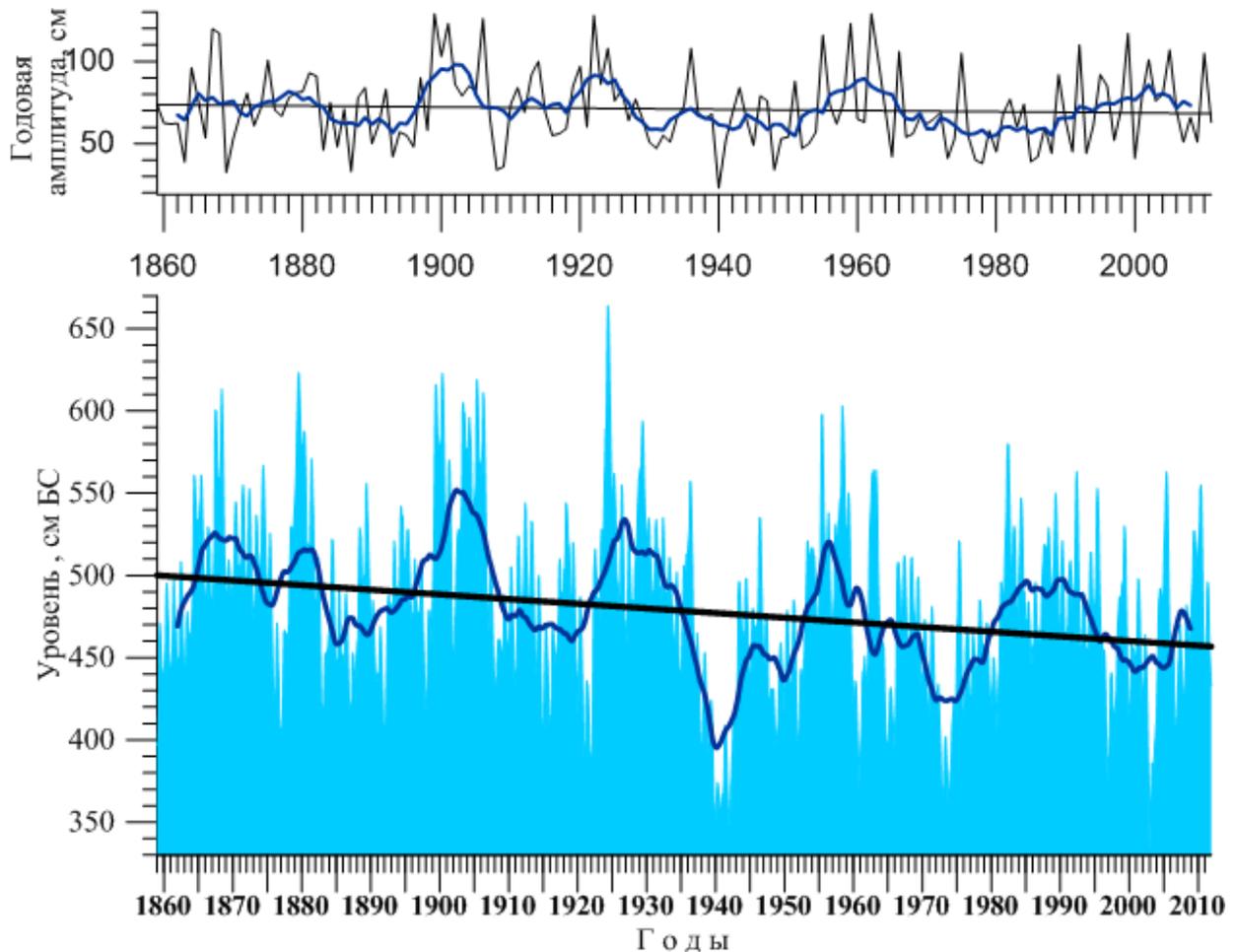


Рис. 4.2.3. Многолетние колебания годовой амплитуды (вверху) и среднемесячного уровня (внизу) Ладожского озера. Жирная кривая — скользящее среднее с шестилетним осреднением. Прямые — линейные тренды.

Очевиден квазитридцатилетний цикл изменчивости уровня озера, так называемый цикл Шнитникова (Шнитников, 1969, Догановский, 2006). В табл. 4.2.2 приведены уравнения линейных трендов для всех крупных озер Ладожской озерной системы.

Таблица 4.2.2.

Линейные отрицательные тренды в рядах годовых уровней крупных озер Ладожской озерной системы

Озеро	Период, лет	Тренд, см/год
Ладожское	153	0,2831
Ильмень	116	0,2722
Сайма	135	0,2259

Наличие низкочастотных составляющих хорошо подтверждает интегральная кривая годовых приращений уровня (ΔH) Ладожского озера (рис. 4.2.4).

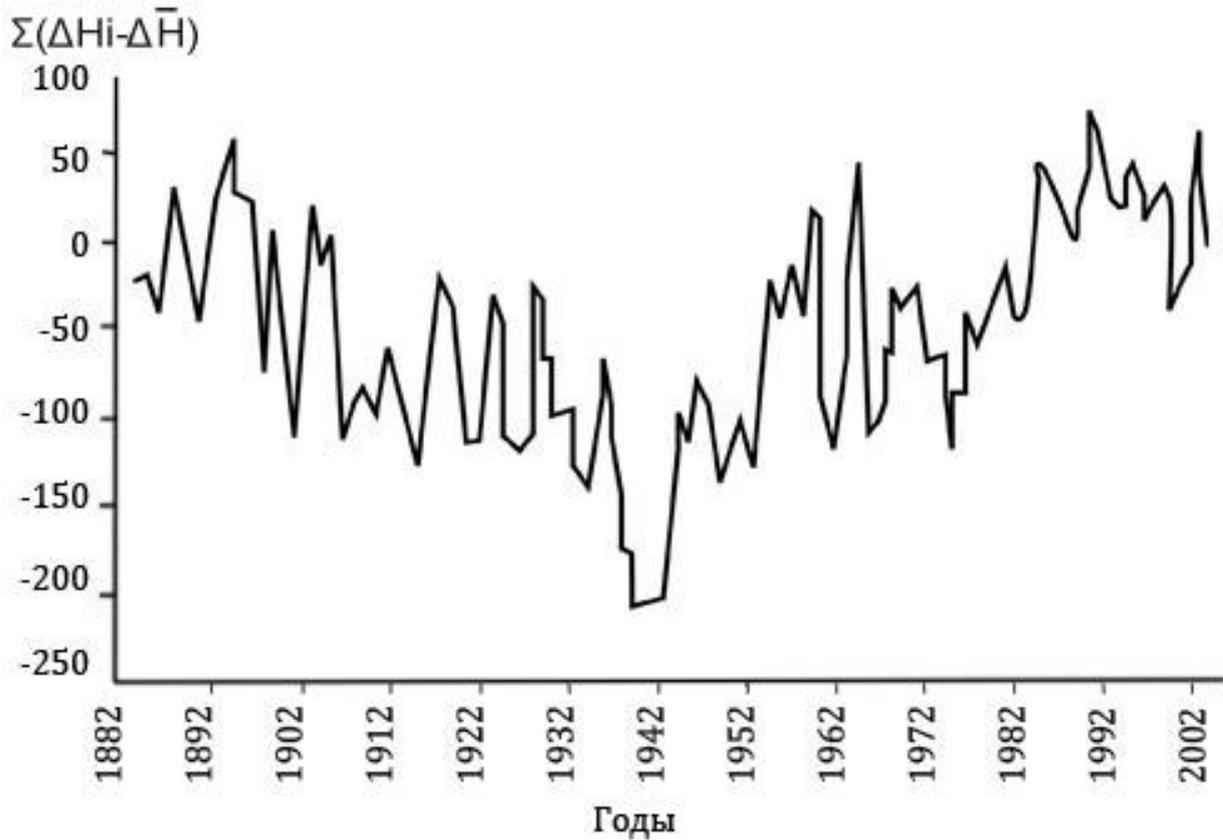


Рис. 4.2.4. Интегральная кривая ежегодных приращений уровня Ладожского озера.

Общий характер колебаний уровня озер, в том числе и Ладожского, связан в первую очередь с особенностями климатических вариаций, как это показано в предыдущем разделе. Различия же определяются как неодинаковым строением озерных систем, так и уровнем хозяйственной деятельности, связанным с постройкой плотин и работой гидроузлов, которые искажают естественный ход уровня озер, превращенных в водохранилища.

4.2.4. Особенности колебаний климатических характеристик

Основные климатические показатели, влияющие на наполнение озер, это прежде всего тепло и влага. Спектральный анализ годовых рядов атмосферных осадков (p), представленных средневзвешенными значениями по всей Ладожской озерной системе (ЛЮС), показал, что, как и в уровнях озер, в случае климата хорошо прослеживается тридцатилетний цикл. Значительно слабее выражены флуктуации с периодом в 5–6 и 11 лет. Но линейный тренд в рядах осадков в отличие от уровней озера оказался возрастающим ($p = 10\%$):

$$P = 0,3091 * t + 13,264. \quad (4.2.2)$$

Положительным оказался и тренд в рядах среднегодовых температур (Т), от которых зависит испарение (Е):

$$T = 0,0109 * t - 16,674. \quad (4.2.3)$$

Анализ выборочных спектров не подтвердил наличия тридцатилетних циклов, а колебания с периодом в 5–6 лет выражены слабо, наиболее значим оказался цикл 11–12 лет. Расчеты показали, что количество осадков за 106 лет на рассматриваемой территории увеличилось на 5–6%, а температура на 25% (около 1 °С), т. е. темп возрастания температур выше, чем осадков. Тем не менее, уровень Ладожского озера снижается (Догановский, 2003). Подобное соотношение между осадками, испарением и речным стоком установлено для Карелии (Филатов, Сало, 1996; Филатов, 1997).

Неодинаковый темп возрастания осадков и температур формирует отрицательный тренд временного ряда коэффициентов увлажнения $(P/T) = K_{yb}$, что показывает снижение общего притока в озеро (Q), величина которого определяется водным балансом рек.

$$Q = P - E + \Delta u, \quad (4.2.4)$$

где Δu — накопление или расходование влаги в бассейне, в том числе запасы в почве, задержка воды в озерах, что увеличивает связность ряда притока и уровней озера. В обоих случаях входной сигнал имеет тенденцию к понижению, что соответствует ходу уровня воды в озере

$$K_{yb} = - 47092 * t + 16273. \quad (4.2.5)$$

Важным моментом в исследовании генезиса формирования уровня озера является установление вида осадков, которые оказывают наибольшее влияние на колебания годовых уровней. Для этих целей были исследованы осадки теплого (апрель – сентябрь) и холодного (декабрь – март) периодов, имеющих разную генетическую основу.

Интегральные кривые обоих видов осадков, которые также усреднены по частным бассейнам и по всей озерной системе, имеют ветвь спада до 40–50-х гг., затем подъем (рис. 4.2.5). Более четко это выражено в холодный период, зато в теплую часть года лучше проявляются тридцатилетние флуктуации. При этом наблюдается неравномерное распределение осадков и их изменчивости по территории (табл. 4.2.3).

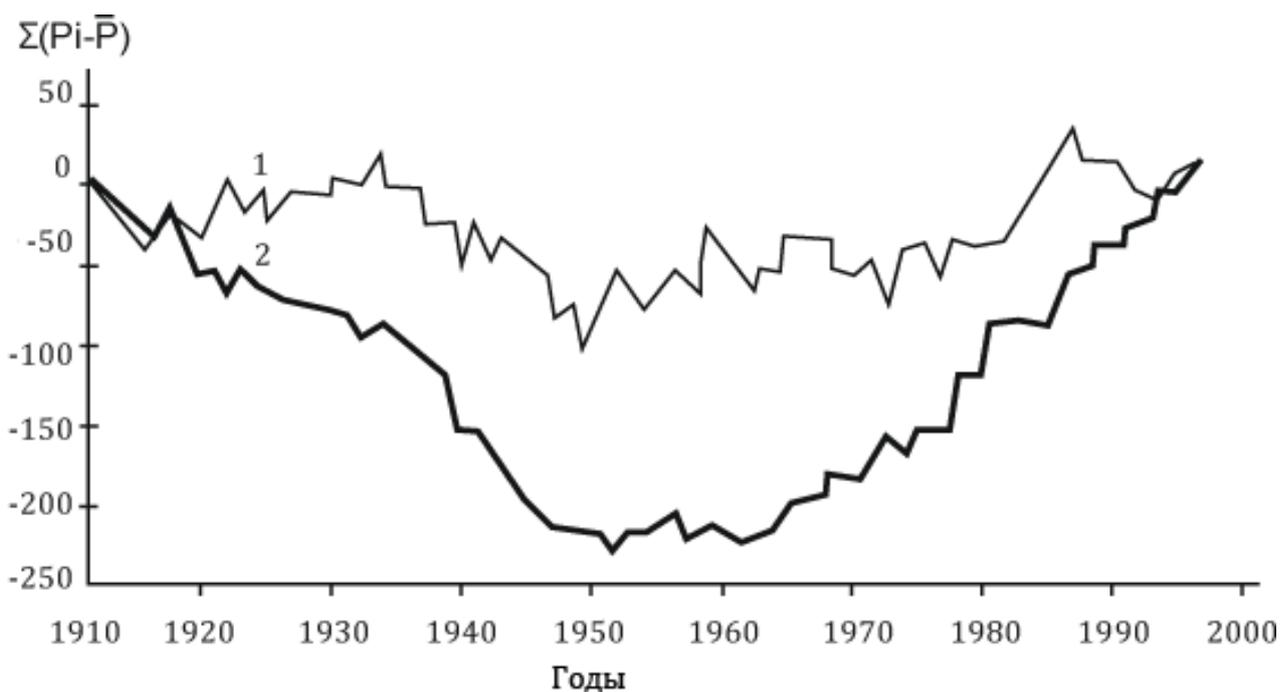


Рис. 4.2.5. Интегральные кривые средневзвешенных по Ладожской озерной системе (ЛОС) атмосферных осадков: 1 — теплый период; 2 — холодный период

Таблица 4.2.3
Атмосферные осадки в Ладожской озерной системе

Частные бассейны	Длина ряда, годы	Теплый период P_T , мм/мес.		Холодный период P_X , мм/мес.		$\frac{P_o}{D_o}$
		среднее количество	C_v	среднее количество	C_v	
I	113	62,0	0,18	38,3	0,24	1,62
II	114	55,2	0,19	35,2	0,27	1,57
III	90	56,9	0,16	41,8	0,22	1,36
IV	109	57,5	0,18	42,2	0,24	1,36
Среднее по ЛОС	90	57,7	0,15	40,6	0,21	1,42
Средневзвешенное по ЛОС	90	57,8	0,16	40,3	0,20	1,43

Из данных табл. 4.2.3 следует, что осадки за теплую часть года примерно в полтора раза выше, чем за холодную, и имеют меньшую изменчивость. При этом за весь период наблюдений на всех частных бассейнах и всей ЛОС хорошо выражены положительные тренды за холодную часть года ($p = 5\%$) и слабо выражены за теплую. Наиболее четко положительный тренд за холодную часть года отмечается во II районе — в северо-восточной части ЛОС (коэффициент детерминации $\gamma^2 = 0,41$). Среднее взвешенное значение по ЛОС $\gamma^2 = 0,28$.

На степень неравномерности распределения осадков по территории указывают значения коэффициентов корреляции (γ) между частными бассейнами и всей ЛОС (табл. 4.2.4).

Таблица 4.2.4
Коэффициенты корреляции между рядами осадков частных бассейнов и ЛОС

Районы	I	II	III	IV	Среднее по ЛОС	Средневзвешенное по ЛОС
I	1	$\frac{0,59}{0,72}$	$\frac{0,50}{0,63}$	$\frac{0,61}{0,74}$	$\frac{0,73}{0,82}$	$\frac{0,75}{0,85}$
II		1	$\frac{0,64}{0,76}$	$\frac{0,78}{0,88}$	$\frac{0,87}{0,92}$	$\frac{0,83}{0,92}$
III			1	$\frac{0,75}{0,87}$	$\frac{0,84}{0,89}$	$\frac{0,84}{0,90}$
IV				1	$\frac{0,92}{0,95}$	$\frac{0,84}{0,95}$
Среднее по ЛОС					1	$\frac{0,93}{0,97}$
Средневзвешенное по ЛОС						1

Над чертой — коэффициенты корреляции за теплый период, под чертой — за холодный. Наиболее слабые связи между I и III районами и зимой и летом, I и II районами — только летом. Практически везде связи между осадками за холодный период оказались более тесными. Наибольший вклад в формирование ежегодных приращений уровня оказывают осадки за теплую часть года ($r = 0,67$), за холодную части = 0,09.

Характер колебаний температуры воздуха по территории ЛОС более равномерный. Так, коэффициент корреляции между рядами годовых температур Санкт-Петербурга и Петрозаводска составляет 0,8, между Петрозаводском и Новгородом — 0,75. Однако средние значения существенно различаются. Так, среднемноголетняя температура воздуха в Петербурге 4 °С, в Петрозаводске 2,5 °С. Температура воздуха холодного периода для Петербурга и Петрозаводска равна соответственно -3,04 °С и -7,47 °С, а теплого +12,3 °С и +10,6 °С. Осредненные по нескольким станциям коэффициенты вариации (C_v) для теплого периода не превышают 0,1, для холодного — 0,4–0,6. При этом наблюдается уменьшение величины C_v с возрастанием температуры.

Таким образом, в формировании уровня озера участвуют и атмосферные осадки и температура (испарение). Доля участия каждого из этих элементов баланса оценена с помощью множественной регрессии, где в качестве предикторов приняты P и T , а предиктант — приращения годовых уровней

$$\Delta H = 0,60 * P - 18 * T - 176,9. \quad (4.2.6)$$

Сводный коэффициент корреляции $r = 0,60$. Значения весовых коэффициентов показывают, что решающее влияние в формирование ΔH вносят атмосферные осадки.

4.3. Динамика вод Ладожского озера

Течения в крупных озерах возникают главным образом под действием трех причин — ветра, речных притоков и горизонтального градиента давления в водной толще. Неравномерное поглощение солнечного тепла по акватории водоема способствует формированию плотностного течения и конвективного перемешивания. Вертикальная неоднородность распределения температуры воды приводит к возникновению стратификации. На границе слоя скачка температуры, а значит и плотности воды, возникают внутренние волны. При наличии перепада уровня, обусловленного притоком или оттоком речных вод, может сформироваться затухающая по пути движения и меандрирующая по горизонтали струя или транзитный поток с примыкающими к нему водоворотными зонами (Судольский, 1991). Сгонно-нагонные движения, сейши, циркуляции Ленгмюра — движения, различающиеся по пространственно-временным масштабам, но вносящие значимые энергетические добавки в движения воды в крупном озере. В природных водоёмах редко можно наблюдать какой-либо из установившихся видов движения. Обычно измеряемые течения в озере представляют собой векторную сумму движений различных пространственно-временных масштабов (Бояринов, Петров, 1991). С помощью систематических длительных наблюдений определены особенности системы течений в Ладожском озере (Филатов, 1978). Крупномасштабная система течений Ладожского озера, как и всех крупных озер умеренной климатической зоны, подвержена сезонным изменениям.

В период ледостава течения в основном определяются режимом притоков и стока рек. Весной под воздействием ветра и формирующейся термической стратификации система течений имеет сложный характер с тенденцией к формированию генеральной циклонической циркуляции.

Летом динамические процессы определяются плотностной стратификацией, ветровым воздействием и рельефом дна. В летний период стратификация в озере гидростатически очень устойчива, поэтому в озере доминируют внутренние волны, струйные течения, а вертикальный обмен ниже слоя скачка ослаблен.

Осенний период — это сезон максимальных скоростей ветра, в этот период особое значение приобретают апвеллинги. Это явление подъема глубинных вод к поверхности в результате вдольберегового ветра (апвеллинг) — одна из важных особенностей динамики прибрежной зоны в период открытой воды. В районе апвеллингов температура прибрежной воды может быть на 4–9 °С ниже температуры поверхности в центральной части озера. По

материалам космической тепловой съемки хорошо прослеживаются зоны апвеллингов, которые могут занимать площади в несколько сот квадратных километров.

Особые условия с точки зрения динамических процессов представляют прибрежные участки, где распространяются речные воды. В прибрежной зоне наибольшие скорости течений приурочены к району устьев рек Свирь, Волхов, Вуокса; здесь же наблюдаются наибольшие (для прибрежной зоны) пульсации течений. Максимальная энергия изменчивости течений в озере отмечается в районах с наибольшей проточностью (выход речных вод). С удалением от устьев рек скорость и флуктуации течений постепенно уменьшаются вдоль по потоку, т. е. обычно вдоль берега.

Распространение и разбавление сточных вод различных предприятий в водоемах в значительной мере определяются характером динамических явлений, возникающих под действием гидрологических и метеорологических факторов, и в первую очередь течений и турбулентности. Многочисленные измерения течений в озерах и морях свидетельствуют, что вектор течения воды подвержен всевозможным внешним и внутриводным силам. Существует спектр флуктуаций течений с периодами от нескольких минут до нескольких часов и суток. По мнению некоторых гидрофизиков, локальное мгновенное измерение течений, особенно около поверхности, не имеет никакого смысла (Лакомб, 1974). Без учета изменчивости течений в крупных озерах крайне трудно определить места забора чистой воды, определить условия гидротехнического строительства, заниматься промышленным рыболовством.

Филатов и Рянжин (Филатов, 1978) рассмотрели широкий диапазон изменчивости гидрофизических процессов в крупных озерах от синоптической до мелкомасштабной и построили обобщенные спектры колебаний уровня (от 15 лет до 40 минут) и течений (от 100 часов до 3 секунд) Ладожского озера. Сведения о спектральной структуре колебаний показали существование нескольких фиксированных (дискретных) зон энергоснабжения. На основе этих спектров были классифицированы движения в крупных озерах и выделены крупномасштабные движения с характерными временными масштабами больше естественного синоптического периода, среднемасштабные (мезомасштабные) с характерными временными масштабами от естественного синоптического периода до периода стоячих сейш (4–5 часов) и мелкомасштабные — с временными масштабами меньше периода свободных баротропных колебаний в озере (Филатов, 1983). Вклад синоптической изменчивости течений наряду с мезомасштабными инерционными колебаниями составляет 80–90% общей энергии изменчивости для рассматриваемых временных масштабов. Выявлено, что основная кинетическая энергия приходится на движения с синоптическим периодом.

В результате действия ветра на поверхность воды в Ладожском озере возникают непериодические вынужденные колебания, которые получили название нагонов и сгонов. Сгонно-нагонные денивиляции уровня воды носят различный характер в северной глубоководной части озера и южной мелководной. Значение денивиляции в северной части озера составляет 5–10 см, тогда как в южной оно в два раза больше.

Горизонтальные масштабы синоптических вихрей составляют десятки километров, время жизни — несколько суток. Вихревые образования, сходные с синоптическими — топографические вихри. Причина их образования — взаимодействие течений с нерегулярностями подводного рельефа, чаще всего с одиночными подводными возвышенностями.

Инерционные движения — один из наиболее мощных видов мезомасштабной изменчивости течений крупных озер (Филатов, 1983). Инерционные колебания в озере возникают почти одновременно по всей акватории озера. Вектор течений вращается по часовой стрелке с периодом 13,7 ч в Ладожском озере, такое вращение характерно для инерционных движений Северного полушария. Вертикальные масштабы инерционных движений имеют порядок около 10 км, горизонтальные — 1–3 км. Инерционные движения генерируются импульсным источником (резкими изменениями ветра, штормами) в результате нелинейной передачи энергии по спектру от низкочастотных флуктуаций. Инерционные колебания генерируются примерно через 3 ч после каждого резкого изменения скорости ветра.

В глубоководной зоне доминируют инерционные колебания, наряду с которыми существуют синоптические колебания с характерными временными масштабами от 4 до 14 суток. В прибрежной зоне озера вклад инерционных колебаний не превосходит 24%, а в глубоководной зоне озера (в поверхностном слое) этот вклад в среднем составляет 42%. В период развитой стратификации наибольшую энергию инерционные колебания имеют в слое скачка, а их энергия пропорциональна частоте Вайсяля-Брента. В глубоководной зоне инерционные движения существуют в течение нескольких инерционных периодов, а амплитуда их, как правило, больше, чем на мелководье, где они существуют обычно в течение одного инерционного периода. В глубоководной зоне форма инерционных орбит меняется во времени. Они могут быть как идеально круглыми, так и сильно вытянутыми, деформированными, петлеобразными (рис. 4.3.1)

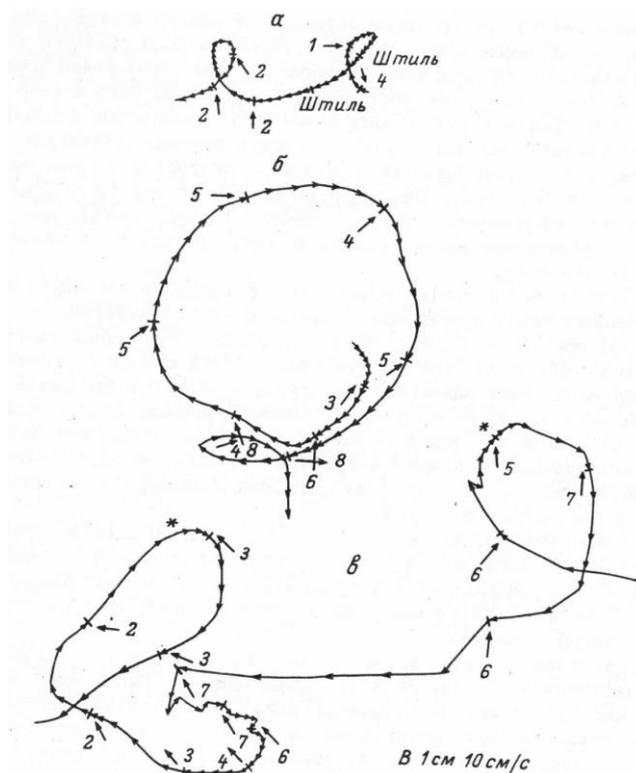


Рис. 4.3.1. Прогрессивно-векторные диаграммы инерционных течений в Ладожском озере. У стрелок цифрами указана скорость ветра.

Режим волнения Ладожского озера определяется преобладающим направлением и скоростью ветра над его акваторией в течение безледостативного периода. Ветер над Ладожским озером по большей части бывает неустойчивым. Повторяемость направлений ветров различных румбов характеризуется сравнительной однородностью. В годовом цикле заметно преобладание юго-западных, южных и юго-восточных ветров, реже всего наблюдаются восточные ветры. Южные и юго-западные ветры, имеющие наибольшую повторяемость, отличаются и наибольшими значениями среднемесячных скоростей ветра. Наименьшие скорости ветра наблюдаются в июле – августе. К концу года скорость ветра возрастает, достигая максимальных значений в ноябре, а затем уменьшается в течение зимы до апреля включительно. Среднее число дней в году с сильным ветром (более 15 м/с) изменяется от 2 в г. Приозерск до 60 на юге озера (остров Сухо). Ветры со скоростью более 10 м/с одного направления чаще всего наблюдаются до 2–3 дней, в отдельные периоды 6–7 дней. В остальное время года ветры неустойчивые, и их скорости не превышают 5–6 м/с.

В силу значительной протяженности Ладожского озера и больших горизонтальных градиентов температуры поверхности воды в период нагревания в прибрежной части озера возникают бризовые циркуляции (Воронцов, 1958). Скорости ветра над прибрежной акваторией на расстоянии 15–5 км и больше от берега могут значительно отличаться от скоростей ветра

над сушей. Ночью над сушей и берегом в нижних слоях атмосферы скорость ветра обычно меньше, а днем — больше, чем скорость ветра над водой. При бризовой циркуляции при переходе от акватории к берегу имеет место значительный перепад температуры воздуха до 5 °С. Озерный бриз (ветер дует с озера) развивается по типу холодных вторжений и сопровождается скачкообразным ростом относительной влажности. Высота озерного бриза меняется от 200 до 900 м.

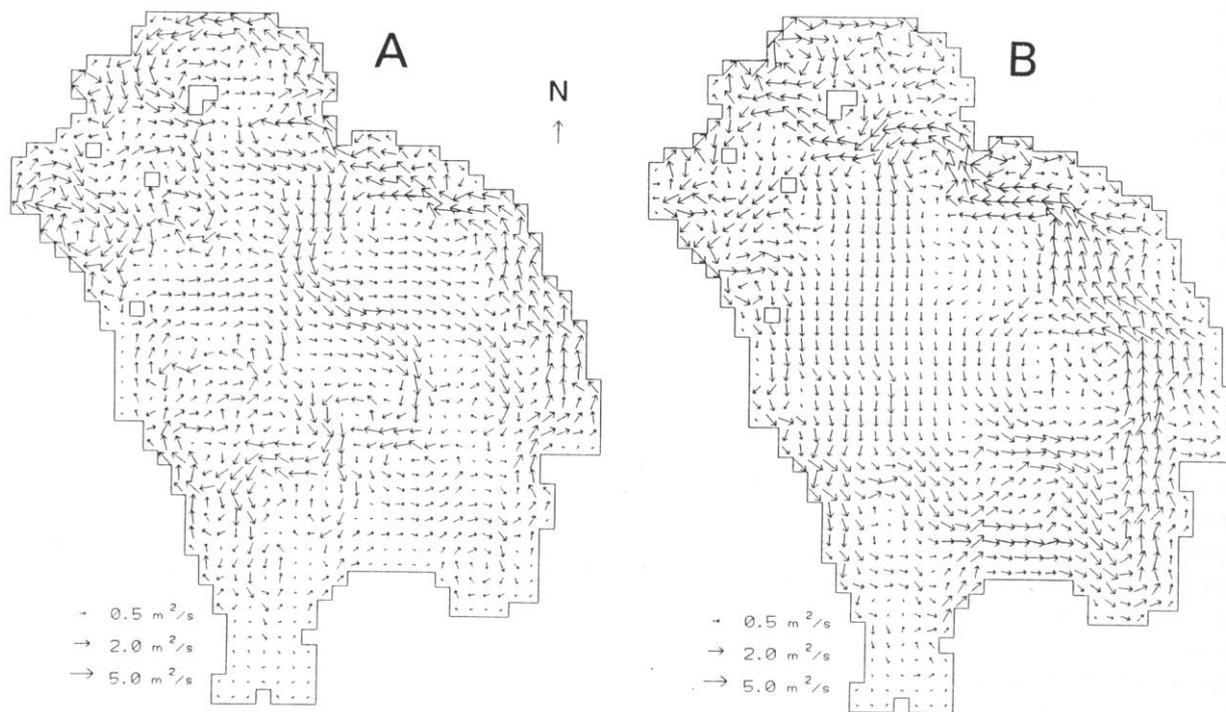
Волнение на Ладожском озере значительно отличается от морского. Характер волнения на озере зависит от размеров водного пространства, его глубины и от силы и продолжительности ветра. Озерная волна довольно короткая и имеет большую крутизну. Условия для развития волнения на Ладожском озере различны для его северной и южной частей. В глубоководной северной и центральной части озера размеры волн ограничиваются только протяженностью водного пространства, тогда как в южной части озера над глубинами менее 18–20 м волнение не достигает полного развития, испытывая влияние дна.

Самые высокие волны до 4,5 м наблюдаются у острова Валаам. По данным Ф.Ф. Воронцова, наибольшая высота волны на озере составляет 4,6 м при ветре 15 м/с; волны высотой 3,8 м измерены при скорости ветра 12 м/с.

Слой волновых орбитальных движений в условиях одинаковой плотности воды по глубине или при наличии плотностной стратификации может охватываться так называемыми циркуляционными движениями Ленгмюра. Они представляют собой пары чередующихся между собой цилиндрических вихрей с право- и левосторонним движением, осуществляемым относительно горизонтальных осей, параллельных друг другу и направленных примерно по нормали к фронту ветровых волн. Признаком циркуляций Ленгмюра в водоеме считается наличие полос из пены или «дорожек» из плавающих предметов на водной поверхности.

При одинаковой скорости ветра продолжительность развития ветрового течения будет больше, чем время нарастания волнения, особенно эта разница значима для глубоководных районов Ладожского озера. Крупномасштабные ветровые течения возникают в озере спустя несколько часов после начала действия ветра. Их появление в чистом виде наиболее вероятно в период гомотермии или слабой стратификации (осенью). Схема полных потоков при южных и западных ветрах приведена на рис. 4.3.2.

Ветровые циркуляции могут также наблюдаться также и в период существования термобара (весна) или развитой стратификации (лето) в случае достаточно сильных ветров.



Рис

4.3.2. Схема полных потоков в Ладожском озере при южном (А) и западном (В) ветрах — модельные расчеты Белецкого (Beletsky, 1996).

Для ветров южного и северного направлений характерно присутствие двух крупномасштабных ячеек с циклоническим и антициклоническим вращением. При этом течения в прибрежных районах направлены по ветру, а в глубоководных наблюдаются противотечения.

Для западного и для восточного ветра эта картина упрощается: в каждом случае наблюдается только одна крупномасштабная ячейка. Для ветров юго-восточного или северо-восточного направлений циркуляция в целом антициклоническая, как и в случае восточного ветра. Напротив, для юго-западного или северо-западного направления характер циркуляции в целом циклонический, как и в случае западного ветра.

В Ладожском озере верхний слой толщиной 20–30 м наиболее подвержен пространственно-временной изменчивости как температуры, так и течений. Прибрежная зона до глубин 18 м — зона наиболее интенсивного ветрового перемешивания, при сильных ветрах достигающего дна. В зоне с глубинами до 50 м значимы межгодовые вариации температурного режима. Начиная с глубин 50 м, ниже сезонного слоя скачка водная масса практически не подвержена резким климатическим (межгодовым) вариациям температуры и течений. Течения на этих глубинах невелики и мало изменчивы по времени.

4.4. Термический режим Ладожского озера

Озеро, в котором температура воды дважды в течение года достигает температуры наибольшей плотности 4 °С в период весеннего нагревания и осеннего охлаждения, что приводит к полному вертикальному перемешиванию и существованию термического бара, называется димиктическим. Такие озера расположены в зоне умеренного климата. Главной отличительной закономерностью термического состояния димиктического озера является четко определенная последовательность вертикального распределения температуры воды от поверхности до дна в течение годового цикла, связанная в каждом конкретном озере с распределением глубин. Ладожское озеро относится к типичным крупным димиктическим озерам. Термическое состояние крупных озер северо-запада России, в частности Ладожского и Онежского, исследовалось Тихомировым (1982). Выделены сезонные термические циклы, рассчитаны тепловые балансы, проведены исследования весенней фронтальной термической зоны (термобара).

4.4.1. Среднегодовой ход температуры и теплосодержания Ладожского озера

При описании термического режима крупных озер обычно оперируют среднегодовым ходом температуры воды (Bennet, 1978; Тихомиров, 1982; Бояринов, Петров, 1991). Ход температуры поверхности воды и водной массы позволяют определить средние характеристики периодов нагревания и охлаждения озер, соотношение температур для этих периодов. Отклонения от среднего годового хода характеризуют термические особенности того или иного года в многолетнем цикле. Исходными данными для вычисления этих характеристик послужили измерения температуры воды и метеорологические параметры, собранные в обширную базу данных Ладожского озера. Общий объем базы составляет более 300 тыс. значений температуры воды и сопутствующих характеристик за период с 1897 по 2010 гг. Информационная плотность базы данных (БД) Ладожского озера превысила 250 измерений на кубический километр водной массы (рис. 4.4.1).

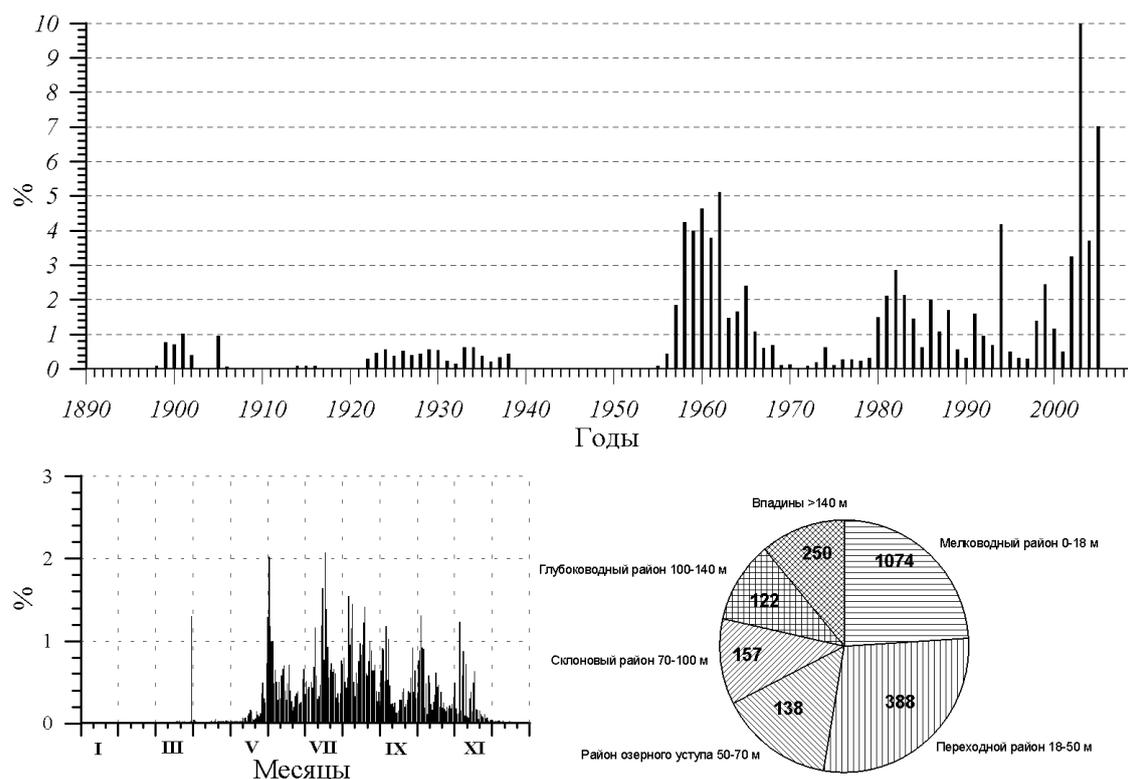


Рис. 4.4.1. Характеристика исходных данных, представленных в БД Ладожского озера.

Скользящее вычисление декадных статистических характеристик, таких, как среднее, дисперсия, мода, медиана и т. п., позволили построить изменение по времени и глубинам средней температуры воды и ее дисперсии для выделенных лимнических районов, проанализировать временной ход основных статистических характеристик на 12 горизонтах (0, 2, 5, 10, 15, 20, 30, 40, 50, 80, 150 и 180 м) с середины мая по середину ноября (Ладожское ..., 2002).

Димиктическое Ладожское озеро после вскрытия ото льда (апрель-май) начинают интенсивно нагреваться. Прогрев начинается еще подо льдом, однако основной рост температуры воды происходит в безледный период в связи с увеличивающимся суммарным потоком тепла через поверхность (Тихомиров, 1982). На рис. 4.4.2 показаны кривые хода среднемесячной температуры речных притоков T_i (1) (Веселова, 1968), среднедекадных температуры воздуха T_a (2), температуры поверхности T_s (3), а также всей водной массы Ладожского озера T_m (4).

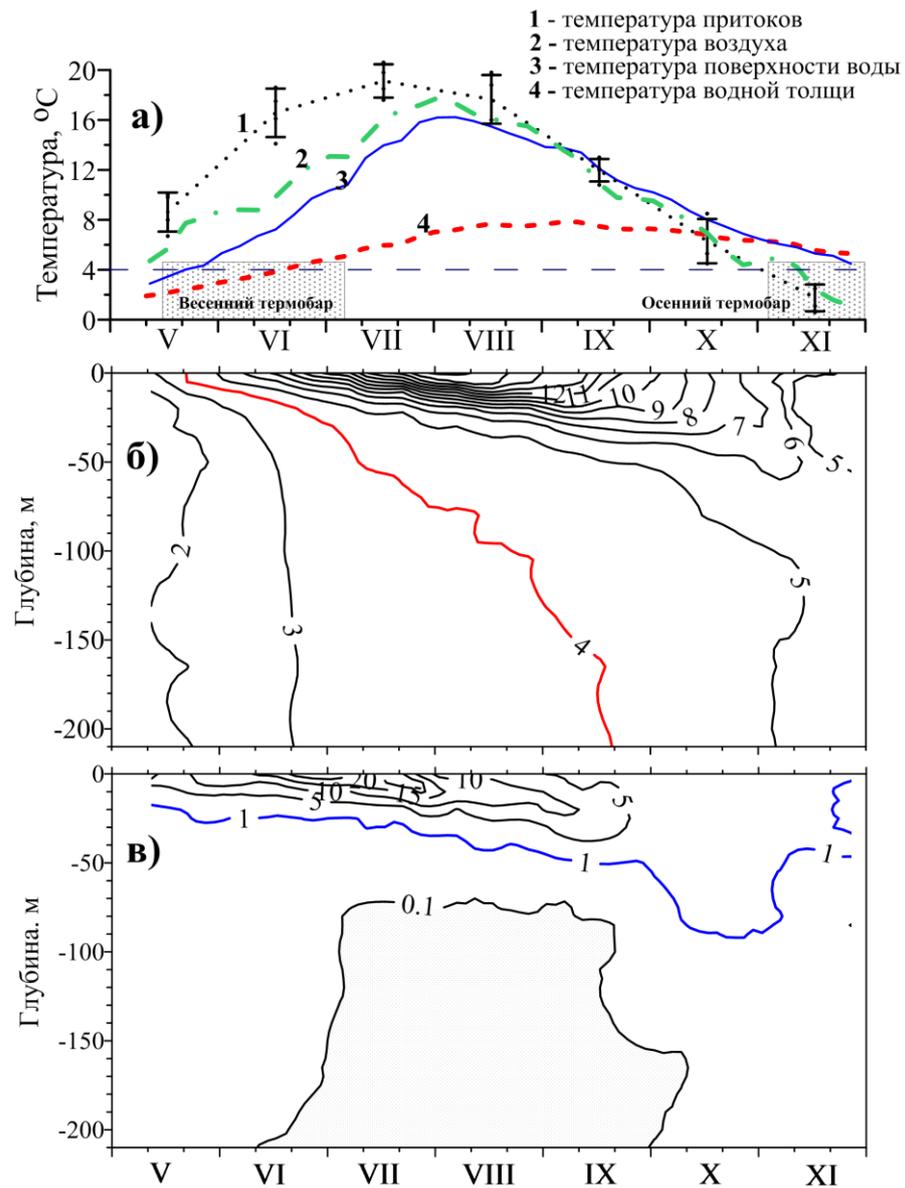


Рис. 4.4.2. Среднее декадное распределение температуры поверхности воды, речных притоков, воздуха и водной толщи (а), дисперсии температуры воды (б), теплосодержания водной массы (в) Ладожского озера для периода открытой воды.

Теплосодержание водной массы озера является важнейшей характеристикой взаимодействия поверхности озера с атмосферой, определяет способность озера накапливать тепло, представляется необходимым показателем при исследовании климатических изменений (Науменко, Гузиватый, 2010). Годовой ход теплосодержания Ладожского озера непосредственно связан с взаимодействием различных климатических и гидрологических факторов в период нагревания и охлаждения озера. Основные метеорологические факторы, такие как приход солнечной радиации, зависящий от широты места и облачности, и ветровое воздействие, определяют процессы свободной конвекции и заглубления верхнего

перемешанного слоя. Гидрологические процессы способствуют возникновению горизонтальных и вертикальных движений в озере. С использованием выше описанных данных был выполнен расчет теплосодержания для слоев толщиной 5 м с учетом плотности озерной воды и объема каждой лимнической зоны и для всего озера в целом. Рис. 4.3.3 показывает годовой ход теплосодержания водной массы Ладожского озера для среднегодовых условий.

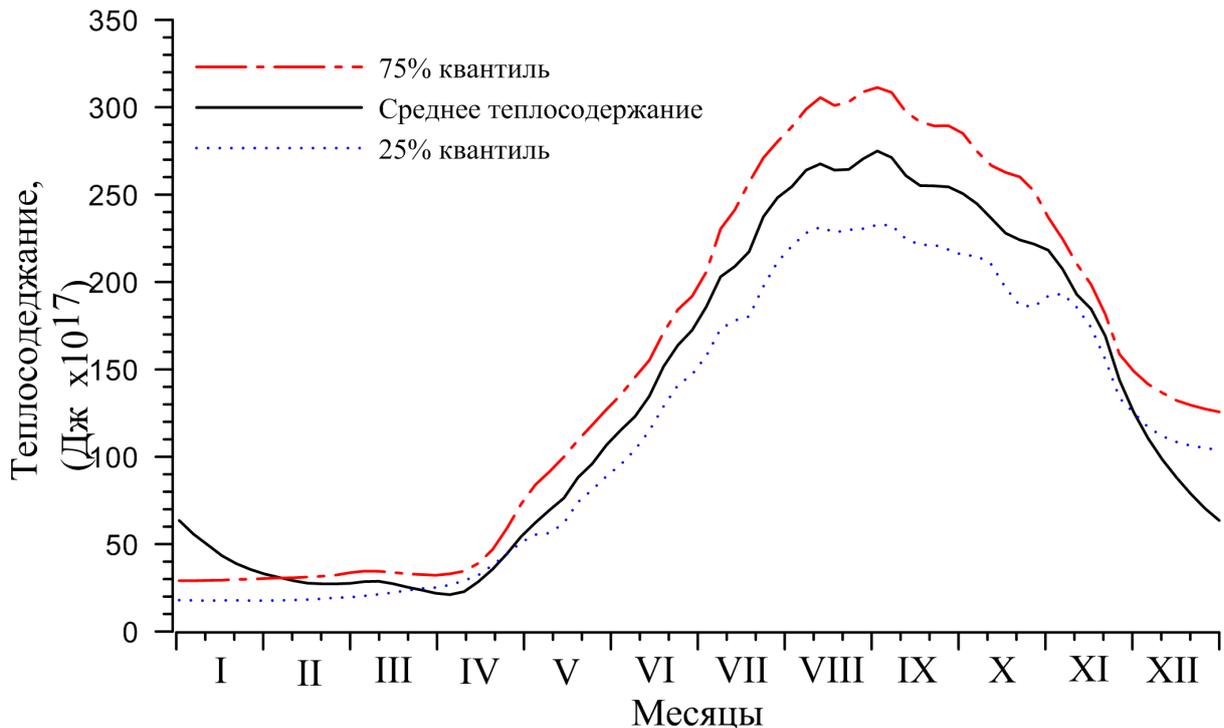


Рис. 4.4.3. Годовой ход теплосодержания для всего Ладожского озера.

Около 200 дней в году средняя температура всей водной массы озера меньше 4 °С и 165 дней превышает ее, достигая максимальной, равной 7,8 °С, в первой декаде сентября. Минимальную температуру (+0,6 °С), так же как и наименьшее теплосодержание ($21 \cdot 10^{17}$ Дж), водная масса озера имеет в первую декаду апреля. Годовой бюджет озера (разность между минимальным и максимальным теплосодержанием) составляет около $255 \cdot 10^{17}$ Дж, что примерно в два раза меньше, чем для озера Верхнего (США). Весенний бюджет озера (разность между минимальным теплосодержанием и теплосодержанием водной массы при температуре наибольшей плотности) составляет $118 \cdot 10^{17}$ Дж. Нагревание от температуры наибольшей плотности до максимальной температуры требует соответственно $137 \cdot 10^{17}$ Дж, что составляет около 54% годового теплового бюджета водной массы Ладожского озера. При средних

условиях в Ладожском озере в течение года приблизительно поровну идет тепла на нагревание при свободной конвекции (46%) и при устойчивой стратификации (54%).

Продолжительность существования фронтальной зоны весной и осенью примерно одинакова и составляет около двух месяцев. Эти периоды тонированы на рис. 4.4.2, а. Дата возникновения весеннего термического фронта совпадает с датой достижения температуры поверхности озера T_s (приблизительно $3\text{ }^{\circ}\text{C}$) и средней температурой всей водной массы T_m (около $2\text{ }^{\circ}\text{C}$). Однако для периода нагревания температура поверхности воды растет значительно быстрее температуры всей водной массы озера. В середине июня T_m переходит через $4\text{ }^{\circ}\text{C}$, а $T_s - 8\text{ }^{\circ}\text{C}$. В озере существуют большие горизонтальные градиенты температуры. В этот период речные воды значительно теплее озерных вод, также как и температура воздуха T_a превышает T_s , что усиливает контрасты между центральной и прибрежной частями озера и имеет важное значение для их обнаружения на инфракрасных космических изображениях.

Температура поверхности воды Ладожского озера обычно достигает максимума в начале – середине августа, через месяц после исчезновения весенней термической зоны и возникновения полной первичной устойчивой стратификации в озере. С этого момента начинается период охлаждения озера, причем южные мелководные районы начинают охлаждаться раньше, чем самые глубоководные области озера. В период охлаждения поверхностный слой воды полностью охвачен свободной конвекцией на фоне усиления волно-ветровой деятельности, способствующий формированию квазиоднородного слоя на Ладожском озере. К окончанию этого периода толщина этого слоя может достигать 30–40 м. Отдача тепла со всей поверхности озера практически одинакова независимо от морфометрии лимнических районов.

В период осеннего охлаждения термическая фронтальная зона существует в качественно других условиях. Только на начальном этапе температура поверхности воды выше температуры водной массы, начиная с середины ноября их значения сравниваются. Этот факт свидетельствует о крайне малых горизонтальных температурных контрастах в этот период. Только в районах впадения рек температура речных вод на $2\text{--}3\text{ }^{\circ}\text{C}$ ниже озерных, и они могут опускаться в придонные слои.

Осенний фронтальный раздел диссипирует во второй половине декабря, когда средняя температура всей водной массы приближается к температуре $2\text{ }^{\circ}\text{C}$, но может существовать вплоть до января в зависимости от суровости зимы. Однако в этот период поверхность озера может быть уже покрыта льдом более чем на 20%. Тепло сосредотачивается в придонных горизонтах.

Среднегодовая температура водной массы Ладожского озера ($T_{\text{вод.м}} = 3,8\text{ }^{\circ}\text{C}$) ниже температуры наибольшей плотности. Для сравнения — озеро Верхнее имеет среднюю

температуру 3,62 °С (Bennet, 1978). Вычисленные средние годовые значения температуры водной массы всего озера и его лимнических районов представлены в табл. 4.4.1. Эти значения свидетельствуют о том, что значительное количество приходящего тепла идет на нагревание водной массы до температуры наибольшей плотности, т. е. на свободноконвективное перемешивание.

Таблица 4.4.1

Средние годовые значения температуры воды всего озера и его лимнических районов

Горизонт		Лимнические районы					Все озеро	
		I 0–18 м	II 18–50 м	III 50–70 м	IV 70–100 м	V 100–140 м		VI 140–230 м
0 м		6,0	5,7	5,2	4,9	4,9	5,1	5,5
20 м		—	4,0	3,7	3,7	3,6	3,9	3,8
50 м		—	3,2	3,1	3,0	3,1	3,3	3,1
Водная масса озера	75% квантиль	6,9	5,2	4,1	3,9	3,9	3,9	4,4
	средняя	5,6	4,4	3,6	3,4	3,4	3,5	3,8
	25% квантиль	4,7	3,7	3,2	2,9	3,1	3,1	3,3

Средняя температура воды Ладожского озера на разных глубинах, ее дисперсия закономерно изменяются от месяца к месяцу (рис. 4.4.4, 4.4.5). Величины дисперсии температуры воды и периоды их наибольших значений указывают на возможное климатическое (межгодовое) влияние изменения прихода тепла на поверхность озера и его проникновение вглубь водной массы, различие в датах достижения той или иной температуры. В Ладожском озере с первой декады июня по первую декаду октября, когда средняя температура водной толщи растет от 3 °С до 4 °С, ниже глубины 70 м (глубина третьего лимнического района) практически не существует межгодовой изменчивости, на это указывают дисперсии температуры менее 0,1 °С². Таким образом, для глубоководных димиктических озер существуют периоды времени, в течение которых не проявляется межгодовая изменчивость в полях температуры, а лишь временные интервалы этих периодов могут варьировать. Эти периоды связаны с периодами, когда проникновение тепла на глубины более 50 м ограничено сверху значительным вертикальным градиентом температуры (слоем скачка).

Сезонная термическая структура лимнических районов Ладожского озера свидетельствует о значительной пространственной неоднородности вод озера. На рис. 4.4.4

показан годовой ход температуры воды Ладожского озера для шести лимнических районов с различными глубинами. Вертикальные градиенты температуры и плотности воды имеют максимальные значения у поверхности после окончания режима свободной конвекции (достижения температуры 4 °С). Со временем с июля по ноябрь они заглубляются и уменьшаются по величине.

В период нагревания возрастает влияние пространственной неоднородности подстилающей озерной поверхности на атмосферные процессы в придном слое. Для периода стратификации существует временное запаздывание между максимальными значениями температуры поверхности лимнических районов, причем максимумы отличаются своими значениями. Лимнические районы отличаются друг от друга сезонными амплитудами придонных температур: они наибольшие в прибрежной зоне и уменьшаются с увеличением глубины зоны, становясь постоянными, начиная с зоны озерного уступа (Ладожское..., 2002).

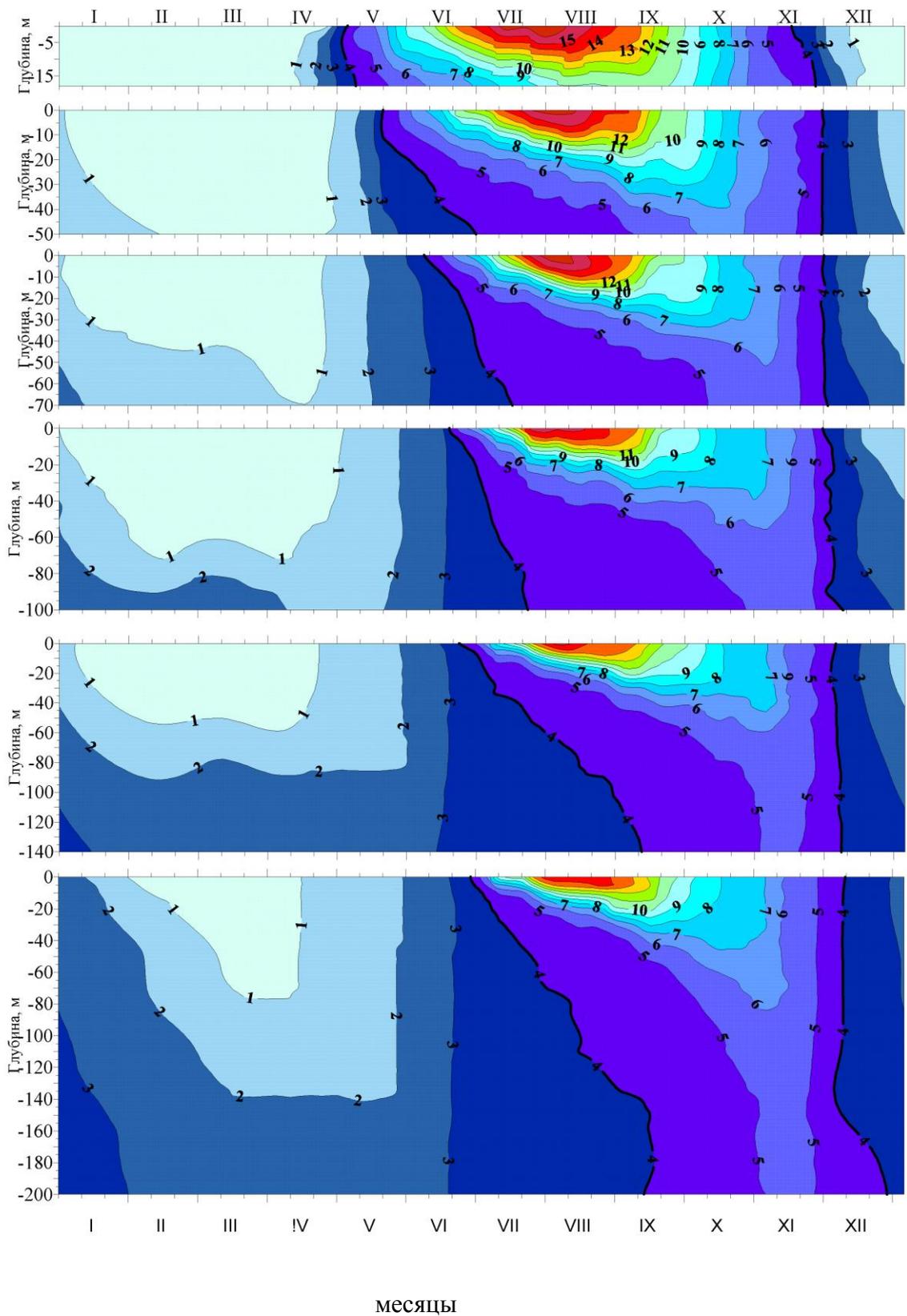


Рис. 4.4.4. Годовой цикл температуры воды для шести лимнических районов Ладожского озера.

Дисперсии температуры воздуха и воды закономерно изменяются от месяца к месяцу и по глубинам, что характеризует пространственно-временную неоднородность полей температуры на

различных горизонтах в период открытой воды. Все районы озера имеют наибольшие дисперсии температуры воды и воздуха в период нагревания до наступления максимума средних температур. В этот период значения максимальных дисперсий температуры воздуха возрастают от прибрежных районов к глубоководным.

После формирования устойчивой стратификации в различных районах озера сезонная изменчивость дисперсий температуры воды соответствует эволюции слоя температурного скачка и характеризует степень интенсивности внутренних волн. На рис. 4.4.5 приведены статистические характеристики на начало и середину каждого месяца влажности и температуры воздуха, а также температуры воды на поверхности, глубине 20 и 50 м по акватории всего озера. Диапазон изменения температуры воздуха по акватории составляет 7–10 °С, уменьшаясь к сентябрю-ноябрю до 4–6 °С. В период нагревания возрастает влияние пространственной неоднородности подстилающей озерной поверхности на атмосферные процессы в приводном слое. Наибольшая горизонтальная неоднородность температуры поверхности воды составляет 15–16 °С и существует на последних стадиях существования весенней фронтальной зоны (термобара) в первой декаде июля. В этот период интенсифицируются геострофическая циклоническая циркуляция. Именно в этот период существует наибольшая коррелятивная связь между распределением температуры и распределением глубин в озере. Коэффициент детерминации составляет около 70%, тогда как в период охлаждения, начиная с середины августа этот коэффициент уменьшается до 0% (Науменко, Каретников, 2002). На глубине 20 м, также как и на поверхности Ладожского озера, наибольшие пространственные градиенты возникают до наступления максимума средней температуры на этих горизонтах.

Раньше всего (15 июля) температуры поверхности воды достигают своего максимума (около 20 °С) в Волховской губе. Мелководный южный район после середины июля начинает охлаждаться, в то время, как поверхность северных глубоководных районов (V и VI) до конца первой декады августа все еще нагревается, однако не достигая величины максимума температуры южного района. Позже всего (25 августа) наступает самое теплое время с температурой поверхности воды около 13–14 °С над самым глубоким местом северной части Ладожского озера. Это — наименьшая величина максимума температуры поверхности воды. Этот район Ладожского озера характеризуется частым возникновением апвеллингов (рис. 4.4.9).

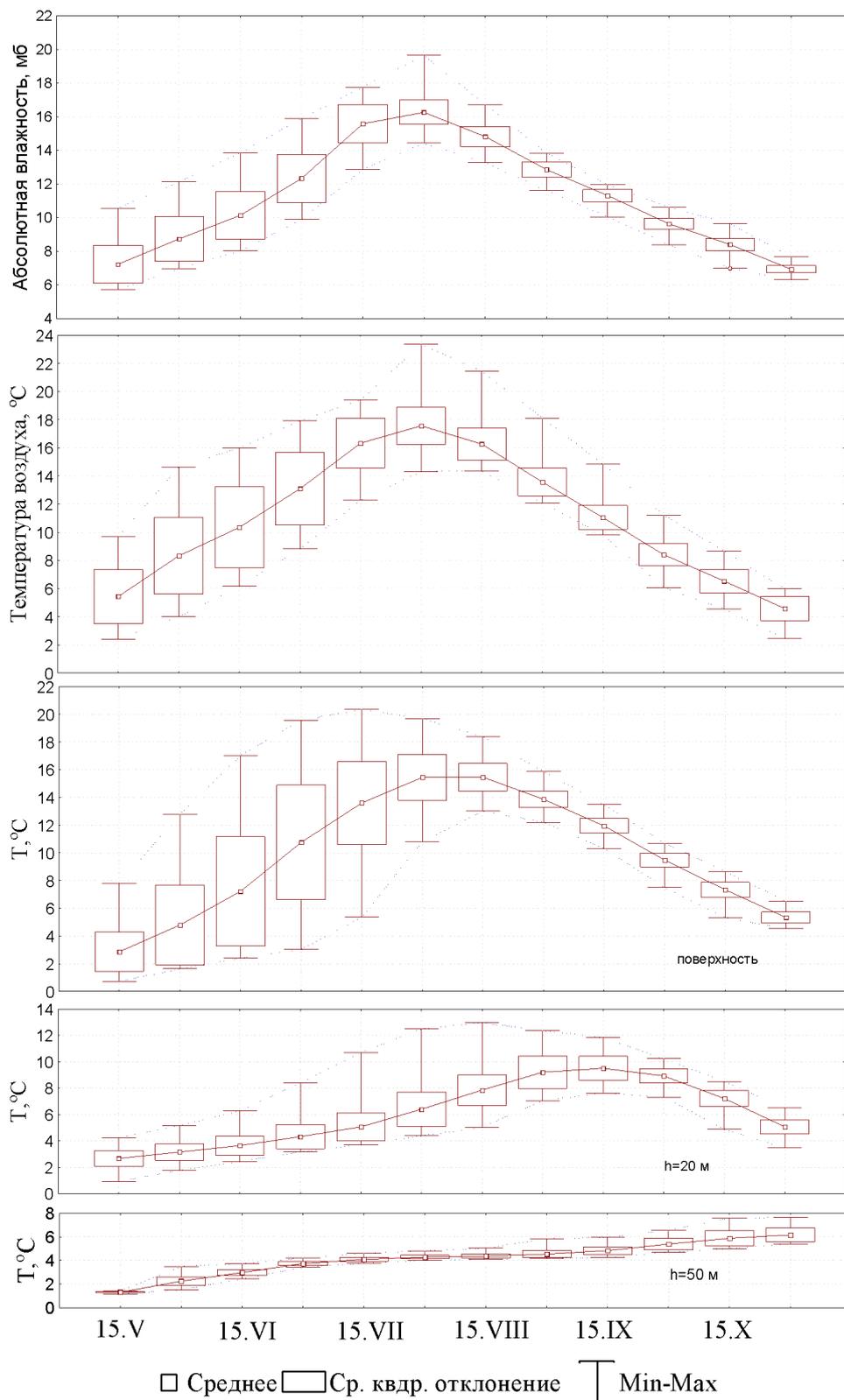


Рис. 4.4.5. Статистические характеристики пространственного распределения влажности и температуры воздуха, температуры воды на 0, 20 и 50 м в Ладожском озере.

Следует обратить внимание на то, что у восточного берега Ладожского озера максимальные температуры поверхности воды несколько выше, чем у западного берега, что характерно и для

Онежского озера. Такое распределение температур может быть объяснено в период развитой стратификации циклонической циркуляцией в крупном озере северного полушария.

О различной тепловой инерции районов с различными глубинами свидетельствует временной сдвиг между наибольшими максимумами и наибольшими минимумами для поверхности воды и горизонта 20 м. Минимумы запаздывают относительно максимумов на 1 месяц. Интенсивное нагревание на глубине 20 м начинается в период охлаждения поверхности воды после достижения ею максимума температуры, в поверхностном слое начинается процесс свободной конвекции, приводящий к поступлению тепла на нижележащие горизонты.

В начале сентября температуры поверхности воды и воздуха сравниваются практически одновременно по всему озеру, и устанавливается нейтральная стратификация приповерхностного слоя воздуха. Осенью пространственные температурные неоднородности уже практически не зависят от распределения глубин, и их дисперсии не велики. Наступает период максимального теплосодержания всей водной толщи озера, а охлаждение поверхности озера продолжается. Этот процесс способствует формированию верхнего квазиоднородного слоя (эпилимниона), интенсивному поступлению тепла вглубь и повышению температуры воды на нижележащих горизонтах. Рост температур на глубине идет до тех пор, пока плотности воды на поверхности и на глубине не сравняются. Нагревание воды на глубине 50 м также интенсифицируется после достижения максимума на глубине 20 м. Так, на определенной вертикали от поверхности до глубины 50 м возникает изотермия при температуре около 5,8–6 °С в начале ноября.

В Ладожском озере температура у дна на глубинах более 70 м изменяется в течение года от 1,5 °С до примерно 6 °С. В этом диапазоне температур существует приблизительное равенство плотности пресной воды, что приводит к практическому отсутствию градиентных течений на этих глубинах, а значит, и обмена между различными районами озера.

В Атласе Ладожское озеро (2002) и одноименной монографии (2002) приведены фоновые (типичные) пространственные распределения температуры поверхности Ладожского озера на определенные даты периода открытой воды. Эти распределения полезны для оценки средних климатических распределений температуры поверхности воды. Однако изменения термических характеристик поверхности Ладоги синоптического масштаба в значительной степени определяются ветровым полем, погодными условиями, внутриводоемными процессами и могут значительно отличаться от типичных (Науменко, Тимофеева, 2009). Так, типичное распределение температуры поверхности воды Ладожского озера в период открытой воды практически занимает не более 20% площади озера. Температура остальной акватории может отклоняться от типичной до 5 °С, а в мелководном районе — на еще более значительные величины. Неоднородный характер пространственно-временной аномальности температуры

поверхности озера представляет собой результат воздействия как внешних факторов, так и внутренних, обусловленных морфометрическими особенностями рассматриваемого водоема. Выявленные закономерности пространственно-временной аномальности Ладожского озера следует учитывать при моделировании его температурного режима, экологическом моделировании и прогнозировании.

4.4.2. Весенняя термическая фронтальная зона

В крупных пресноводных озерах зоны умеренного климата, таких как Ладожское, Онежское и Великие Американские озера, ежегодно в период весеннего нагревания формируется фронтальный раздел (термобар) за счет неравномерного прогрева мелководной и глубоководной областей. Фронтальная зона существует в период, когда температура воды на определенной вертикали достигает температуры наибольшей плотности ($4\text{ }^{\circ}\text{C}$), что приводит к возникновению двух качественно отличных друг от друга вертикальных структур: прибрежных прогретых выше $4\text{ }^{\circ}\text{C}$ стратифицированных вод и квазиизотермических вод с температурой ниже $4\text{ }^{\circ}\text{C}$, подверженных свободноконвективному перемешиванию. Термическая фронтальная зона — термобар — впервые была описана Форелем в конце прошлого века на Женевском озере, затем изучением ее занимался Тихомиров на Ладожском озере, после его исследований были инициированы измерения на озере Онтарио. Аномальное свойство пресной воды, связанное с увеличением плотности при повышении температуры от $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $4\text{ }^{\circ}\text{C}$, является причиной существования основного механизма, определяющего динамический режим крупного озера и обмен энергией и массой между поверхностью воды и водной толщей, прибрежной и центральной частями озера в период существования термического бара.

Термобар — это зона с большими горизонтальными градиентами температуры, отделяющая стратифицированные воды от квазиизотермических (Науменко, 1989, Науменко и др., 2012), ширина которой в зависимости от горизонтального градиента температуры может изменяться от 2 до 5 км (рис. 4.4.6). Формальной границей раздела между разнотипными водами является четырехградусная изотерма, указывающая на зону опускания наиболее плотных вод. В период нагревания термическая фронтальная зона продвигается к глубоководной части Ладожского озера со средней скоростью $0,5\text{--}1\text{ км/сутки}$ и окаймляет центральные холодные воды, причем к 1 июня эта площадь занимает половину озера, к 20 июня она уменьшается до 15% от общей площади озера. Исчезновение четырехградусных вод на поверхности озера в глубоководной части происходит в первой половине июля.

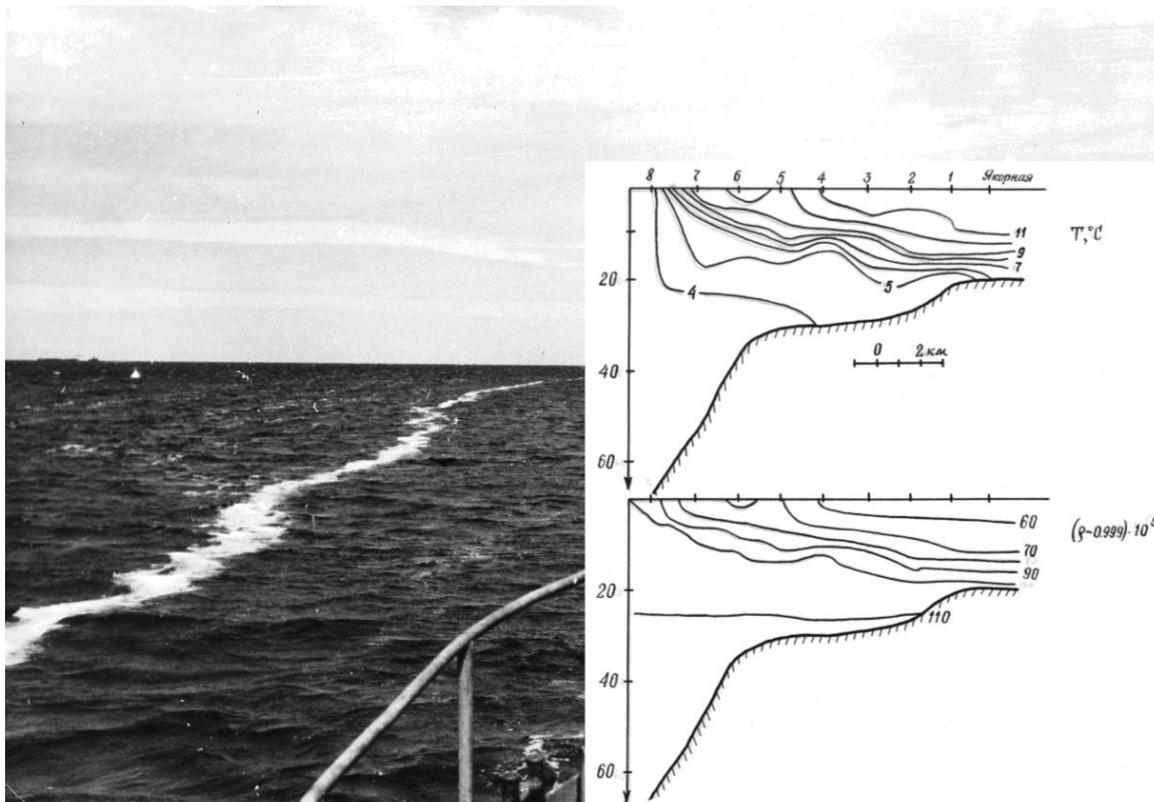


Рис. 4.4.6. Распределение температуры воды и условной плотности во фронтальной зоне Ладожского озера и маркер фронта — пенная полоса.

Во фронтальной зоне происходит перестройка вертикальной структуры водной толщи. Границей раздела, вдоль которой существуют интенсивные нисходящие движения, служит наклонная поверхность, соответствующая температуре наибольшей плотности. Весенняя фронтальная зона существует около двух месяцев с середины апреля до середины июня в озере Онтарио (Rodgers, 1965, 1987), в Ладоге — с начала мая до начала июля и Онеге — с конца мая по июнь (Тихомиров, 1982). Ее продвижение от берегов в глубоководную часть озера определяет сроки возникновения стратификации в различных районах озера. Окончательное смыкание фронтальных разделов в глубоководной части озера определяет дату наступления термической стратификации по всему озеру.

Отличительным свойством фронтального раздела является наличие резких, превышающих средние, горизонтальных градиентов репрезентативных характеристик, в первую очередь, температуры, и, как следствие, плотности и частоты Вэйселя-Брента, показателя вертикальной устойчивости водной толщи. Горизонтальные градиенты температуры в зоне фронта значительно превышают средние сезонные градиенты, причем максимальные градиенты существуют не на изотерме 4 °С, а на расстоянии нескольких сотен метров от нее со стороны стратифицированной области. Они могут достигать на поверхности 7 °С км⁻¹, что создаст большие горизонтальные перепады плотности и формирует особую систему

течений. Поля плотности определяют трехмерную структуру течений в глубоком водоеме. Измерения течений и температуры в весенней фронтальной зоне Ладожского озера выполнены Науменко и Каретниковым в 80-е гг. XX в. на специальных полигонах. Во фронтальной зоне в весенний период происходит перестройка структуры течений крупного озера (Науменко, 1992). При этом механизм взаимодействия вод определяется в основном особенностями изменчивости горизонтальных течений и вертикальными движениями. Изменчивость течений, связанная с непосредственным прохождением фронта, проявляется не сразу на всех горизонтах одной вертикали, что связано с наклоном фронтального раздела. Во фронтальной зоне существует конвергенция течений на приповерхностных горизонтах, тогда как на придонных — дивергенция. Явным признаком сходимости течений на поверхности является пенная полоса на поверхности озера (рис. 4.4.6).

Период прохождения фронта через определенную вертикаль продолжается несколько часов. Течения теряют устойчивость, определенного переноса не наблюдается. На приповерхностных горизонтах при прохождении фронта перестройка течений проходит быстрее, чем на нижележащих горизонтах. На придонных горизонтах период прохождения фронта может продолжаться несколько суток без значительного уменьшения устойчивости течений. Энергия флуктуаций течений увеличивается на приповерхностных горизонтах и с запаздыванием в несколько часов возрастает на нижележащих горизонтах, что согласуется с наклоном фронтальной поверхности.

Наблюдения изменчивости температуры и течений во фронтальных зонах Онежского и Ладожского озер позволяют сделать вывод, что при прохождении фронтального раздела обмен количеством движения становится анизотропным, что связано со сдвигом скоростей и прежде всего поперечной к фронту составляющей. Вместе с этим во фронтальной зоне интенсифицируется обмен между поверхностными и глубинными слоями.

Взаимное расположение изотермических и изопикнических поверхностей во фронтальной зоне крупного озера свидетельствует о том, что в этой зоне происходит переход от баротропных условий к бароклинным. Действительно, в квазиизотермической области вертикальное распределение давления зависит только от глубины, тогда как в стратифицированной области значительное влияние на него оказывает температура. Таким образом, именно во фронтальной зоне происходит взаимное приспособление системы течений и поля массы в условиях формирования устойчивой стратификации. Следует подчеркнуть, что, поскольку термический фронт разделяет стратифицированные и изотермические воды, гидрофизические процессы по разные стороны от фронта будут иметь различные пространственно-временные масштабы.

Резкая граница раздела между стратифицированными и квазиизотермическими водами определяет горизонтальные градиенты различных биотических и абиотических характеристик, которые находятся в тесной взаимосвязи с конфигурацией фронтальной границы (Науменко и др., 1990). Метод полигонных наблюдений во фронтальной зоне (Науменко и др., 2012) позволяет более детально изучить эволюцию линии фронта и связанную с ней трансформацию химико-биологических характеристик в масштабах синоптического периода.

На основе собранных баз данных построены средние многолетние схемы положения весенней фронтальной зоны в Ладожском озере (рис. 4.4.7) (Науменко, Каретников, 2002; Науменко et al., 2000; Атлас, 2002).



Рис. 4.4.7. Продвижение весенней термической фронтальной зоны в Ладожском озере.

Обмен между стратифицированной и изотермическими областями может происходить при помощи вихревых структур, а свойства, присущие теплым стратифицированным водам, могут обнаруживаться в центральных частях озера. На фоне среднего движения фронтальной

зоны к наибольшим глубинам со скоростью $1-2,5 \text{ км/сут}^{-1}$ возникают волнообразные колебания фронта и интрузионные линзы с горизонтальными масштабами несколько километров (Naumenko, Karetnikov, 2000). Весенняя фронтальная зона в Ладожском озере, следовательно, не может рассматриваться как непроницаемая граница между прибрежными и центральноозерными водами. Этот крайне важный вывод необходимо учитывать при анализе как гидрохимических, так и гидробиологических параметров, особенно в районах с нерегулярным рельефом дна.

4.4.3. Прибрежные апвеллинги

Большая площадь крупнейших озер мира и нерегулярности рельефа дна способствуют возникновению неоднородностей как в полях температуры, так и других лимнических характеристик вследствие неравномерного воздействия ветра и особенностей горизонтальных и вертикальных движений в водной толще. Явление подъема глубинных вод к поверхности в результате вдольберегового ветра в крупных озерах и морях (апвеллинг) — одна из важных особенностей динамики прибрежной зоны в период открытой воды (Боуден, 1988; Бояринов, Петров, 1991; Филатов, 1991; Yaguchi, 1977). Ветер вызывает направленный от берега экмановский перенос вод в поверхностном слое и, как следствие этого, приводит к возникновению восходящих движений вод у берега и компенсационного течения к нему в промежуточных слоях. Когда озеро имеет хорошо выраженную термическую стратификацию, прибрежный апвеллинг формирует аномально низкую температуру воды в поверхностном слое. На рис. 4.4.8 показан пример апвеллинга у северо-западного берега озера в районе г. Приозерск при ветре южных румбов.

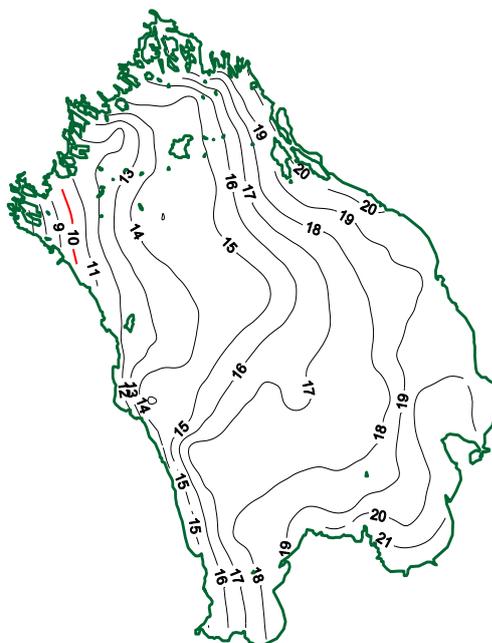


Рис. 4.4.8. Апвеллинг в районе г. Приозерск, 10 августа 1986 г.

В мелководных прибрежных районах, где глубина меньше или равна глубине трения H_e ($H_e = \pi \sqrt{k_z / \rho f}$, где k_z — коэффициент вертикального турбулентного обмена, ρ — плотность воды, f — параметр Кориолиса), прибрежный апвеллинг может возникать не только из-за воздействия вдольберегового ветра, но и благодаря сильным ветрам с суши. В зависимости от скорости ветра глубина H_e для озер со средней широтой 60° составляет 30–60 м.

В крупном озере апвеллинг — чисто синоптическое явление, время жизни которого составляет несколько суток. Одним из первых, кто систематизировал информацию об апвеллингах для Онежского и Ладожского озер, был Бояринов (1991). Им были определены характерные вертикальные скорости подъема вод, составляющие $(0,5-1) \times 10^{-2}$ см s^{-1} , которые по крайней мере на порядок превышают средние характерные вертикальные скорости в озере. Площади акваторий, занятых апвеллингом, могут достигать 30% от общей площади водоема. По материалам космической тепловой съемки хорошо прослеживаются зоны апвеллингов, которые могут занимать нескольких сот квадратных километров. В районе апвеллингов температура прибрежной воды может быть на 4–9 °С ниже температуры поверхности в центральной части озера. Самолетные ИК-измерения, проведенные на Великих Американских озерах, также свидетельствуют о важности апвеллингов для термодинамических процессов крупных озер (Irbe, 1969).

На рис. 4.4.9 показаны районы Ладожского и Онежского озер, где повторяемость апвеллингов наибольшая для периодов открытой воды, однако Филатов (1991), указывал, что апвеллинги возникают не одновременно во всех районах, что связано с направлением и силой ветра.

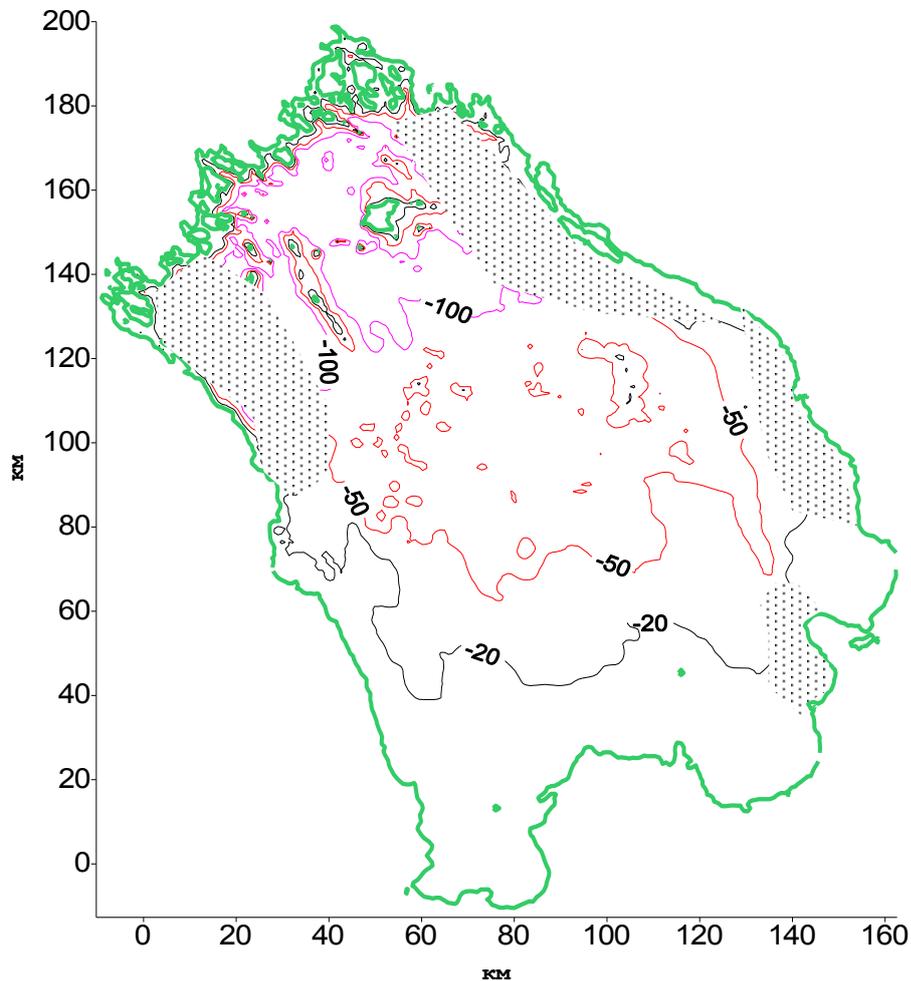


Рис. 4.4.9. Районы Ладожского озера с наиболее часто возникающими апвеллингами.

Очевидно, что прибрежные районы ограничены изобатами, соответствующими глубинам трения Экмана H_e , а береговая линия достаточно изрезана.

4.5. Ледовый режим

Ледовый режим Ладожского озера имеет ряд существенных отличий от ледового режима малых водоемов. Прежде всего, это выражается в продолжительности фаз замерзания и вскрытия озера. Кроме того, большие размеры озера, его открытость увеличивают роль ветра при формировании и разрушении ледового покрова. Существенное влияние на ледовые явления оказывает распределение глубин озера. Мелководный южный район замерзает раньше и

быстрее, глубоководный северный замерзает позже, а иногда — не покрывается льдом на протяжении всей зимы. Исследования ледового режима необходимы для оценки теплового состояния Ладожского озера в зимний период. Частичный ледовый покров уменьшает, а полный практически прекращает обмен теплом и количеством движения между атмосферой и водной толщей озера, значительно изменяет световой режим.

Многолетняя изменчивость ледового режима крупного озера может служить интегральным индикатором изменений локального климата, гораздо более информативным, чем многолетняя изменчивость температуры воздуха (Livingstone, 1997, 1999). Мониторинг текущего ледового состояния Ладожского озера весьма важен при уточнении сроков завершения и, особенно, начала судоходства. Информация о ледовых явлениях важна при прокладке ледовых трасс и организации автомобильного сообщения с островами Валаам и Коневец, на которых расположены действующие монастыри. Рыбное хозяйство так же является потребителем информации о средних, экстремальных и конкретных сроках наступления основных фаз ледового режима. Эндемичный вид тюленей, обитающий на Ладожском озере, выводит свое потомство в зимний период на льду.

Жители берегов Ладожского озера с давних пор уделяли внимание ледовому режиму озера, от которого зависело судоходство и рыболовство. Эпизодическая информация о состоянии льда на Ладожском озере в XIX в. позволили А.П. Андрееву (1875) сделать вывод о замерзании Ладожского озера в декабре. До 1940 г. северное побережье Ладожского озера относилось к Финляндии, и существуют регулярные данные о ледовом состоянии озера начиная с 1915 г. На основе этих материалов с прибрежных и островных гидрометеорологических постов И.В. Молчанов (1945) подробно описал физические свойства льда, дал характеристику ледового режима и привел приблизительные схемы замерзания и вскрытия Ладожского озера. С появлением в 1943 г. регулярных авиационных наблюдений за пространственным распределением льда на Ладожском озере П.Л. Медрес (1957) уточнил предложенные И.В. Молчановым схемы. Кроме того, он создал зависимости скорости увеличения площади и толщины льда от нарастающей суммы отрицательных температур воздуха, а уменьшения ледовитости озера при вскрытии — от нарастающей суммой положительных температур воздуха. До 1990 г. ледовые авиаразведки осуществлялись Гидрометслужбой примерно 2 раза в месяц, и публиковались картосхемы покрытости Ладожского озера льдом с указанием его сплоченности (рис. 4.5.1, а). Начиная с 1971 г. в дополнение к авиаразведкам стали доступными снимки из космоса с разрешением 1 км (рис. 4.5.1, б), по этим материалам (Усачев и др., 1985) были построены типовые схемы ледовой обстановки в зависимости от процента покрытия озера льдом для четырех основных направлений ветра. В настоящее время основным материалом для изучения степени покрытости озера льдом в оперативном режиме в условиях отсутствия

облачности остаются снимки из космоса с разрешением 250 м (рис. 4.5.1, в). Данные в радиодиапазоне с разрешением 25 км позволяют следить за степенью покрытия озера льдом вне зависимости от облачности.

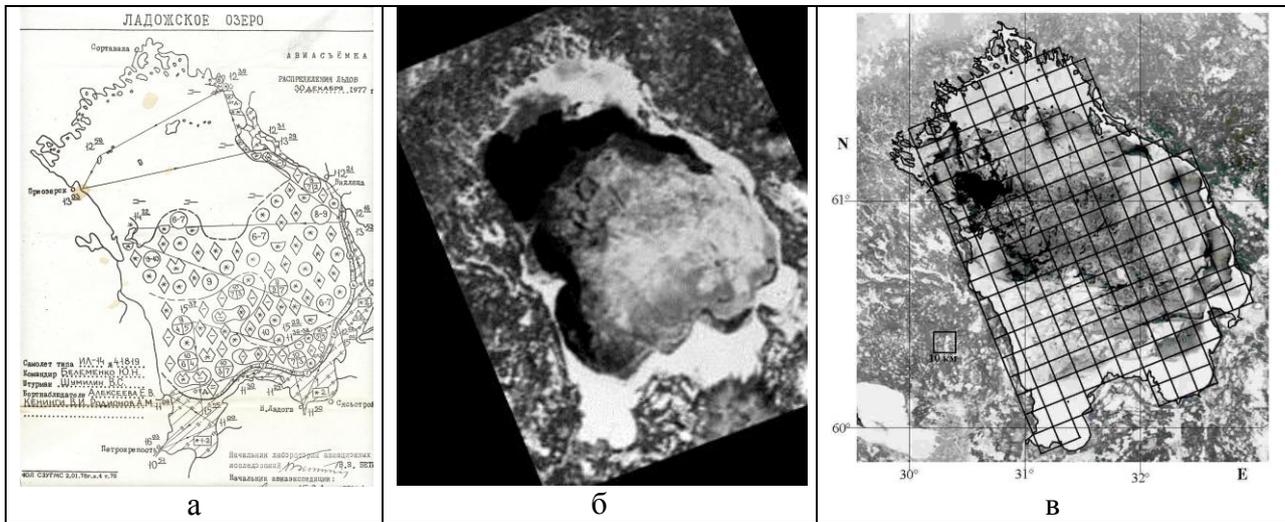


Рис. 4.5.1 Примеры дистанционных изображений ледовых условий по авиаразведке 30 декабря 1977 г. (а), NOAA–14 изображение 31 января 1996 г. в 10:14 UTC (б) и MODIS изображение 2 февраля 2007 г. (в).

В настоящем разделе проведен анализ сроков появления и исчезновения компактных ледяных образований, общей продолжительности ледовых явлений на Ладожском озере и продолжительности полного ледостава, а также их межгодовых вариаций. Из-за малочисленности и нерегулярности данных о толщине льда не представляется возможным получить их средние значения, поэтому основой для анализа ледового режима становятся только данные о степени покрытия озера льдом с учетом его сплоченности.

Динамика увеличения числа съемок за год приведена на рисунке (рис. 4.5.2); в среднем за весь период наблюдений производилось 19 съемок за год при максимальном значении в 1994 г. (51 обработанное изображение).

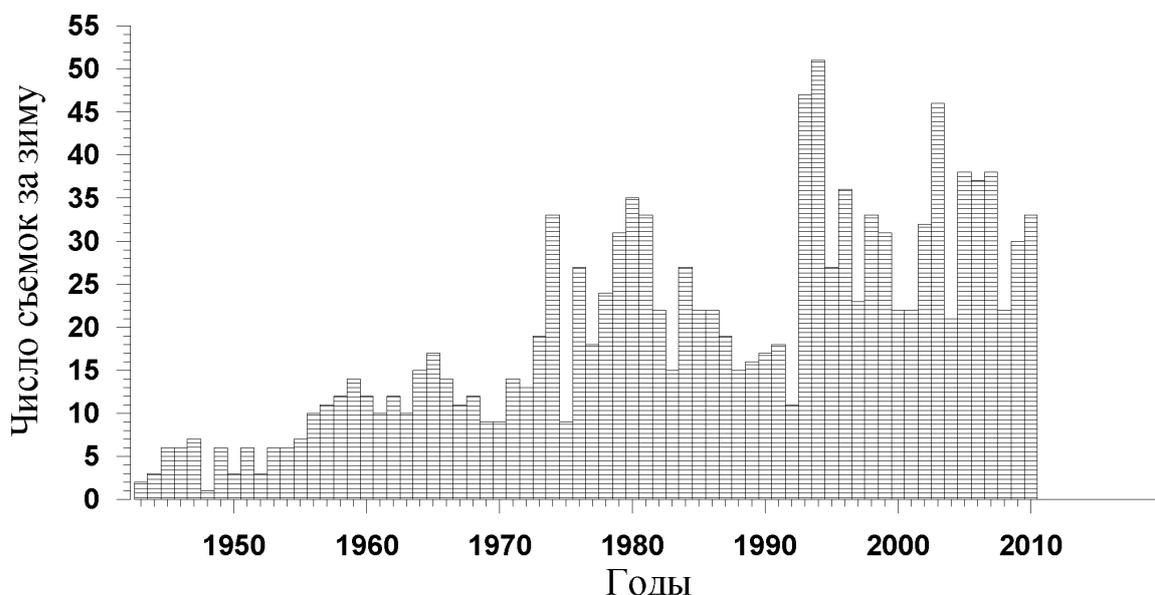


Рис. 4.5.2. Распределение информации о ледовом покрове Ладожского озера по годам.

Для подсчета процента покрытости озера льдом с учетом его сплоченности каждая самолетная картосхема или трансформированное в географическую проекцию спутниковое изображение в видимом диапазоне разбивалось на 183 закрепленных на карте Ладожского озера квадрата со сторонами 10×10 км (рис. 4.5.1, в). Для каждого квадрата с точностью 10% указывался процент покрытости его льдом, и после осреднения по всем квадратам получался средний для всего озера процент покрытости льдом.

За период более 65 лет было обработано около 1300 съмоков, а величины процента покрытости озера льдом с учетом его сплоченности занесены в ледовую базу данных с соответствующей датой. На рисунке 4.5.3 приведены хронологические графики изменения степени покрытия озера льдом за все зимы, представленные в базе данных. Штрих с обозначением года на горизонтальной оси относится к 1 января. Периоды с июня по сентябрь с оси времени удалены.

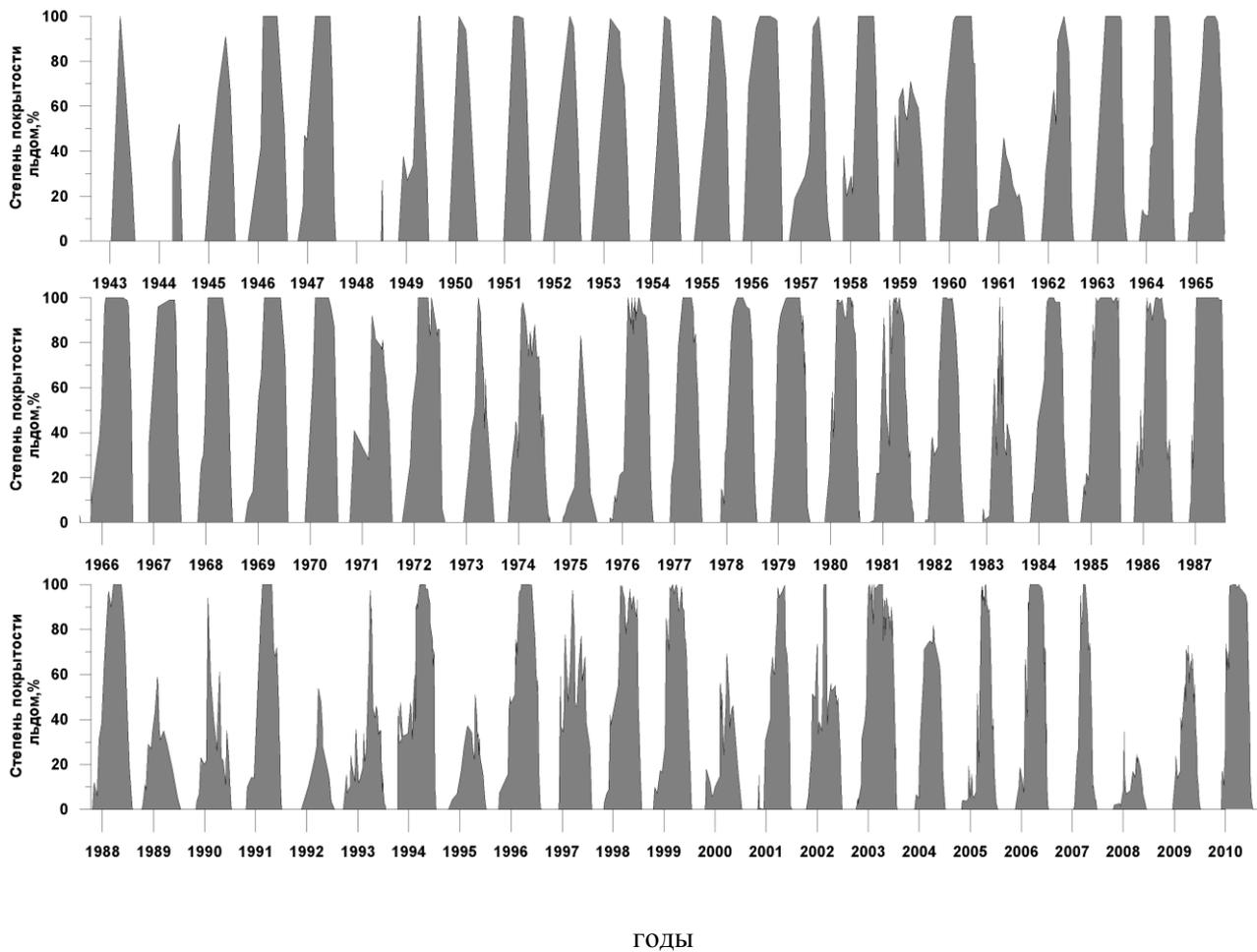


Рис. 4.5.3. Изменение процента покрытости льдом Ладожского озера за зимний период по годам.

Анализ всех имеющихся в ледовой базе данных позволил предложить типовую схему замерзания и вскрытия озера. Более полугода (с начала ноября по конец мая) на поверхности воды Ладожского озера могут наблюдаться ледовые явления. По средним многолетним данным раньше всего (в конце декабря) появляются компактные ледовые образования, различимые по дистанционным наблюдениям в Петрокрепостной губе и к концу января все южные губы полностью покрываются неподвижным льдом. Основной плес озера полностью покрывается льдом с середины февраля до середины марта, однако, за последние 65 лет было 13 зим, когда озеро не полностью покрывалось льдом. Как правило, безледной остается северо-западная глубоководная часть озера.

Вскрытие озера обычно идет более интенсивно, чем его замерзание. Раньше всего (в конце марта) под действием ветра образуется трещина южнее Валаамского архипелага и вдоль южных заливов. Дольше всего лед, различимый дистанционными методами, остается вдоль восточного берега. К концу мая, как правило, озеро полностью очищается ото льда. Небольшая часть льда, согнанного ветром в бухту Петрокрепость, поступает в реку Нева.

Для каждого года было построено изменение процента покрытости льдом за период от даты первого появления льда через максимальное его распространение и до даты его полного исчезновения в озере. Иногда бывает трудно установить сроки появления и исчезновения льда на озере по материалам авиационных разведок. В этих случаях использовались даты, полученные с прибрежных гидрометеопостов, или даты, полученные путем экстраполяции кривой хронологического хода ледовитости до нулевых значений.

Данные о состоянии ледового покрова в течение зимы распределялись неравномерно, поэтому решено было интерполировать эти величины с шагом в 5 дней. Получаем равномерно распределенные во времени величины ледовитости озера, что позволило провести статистическую обработку всех величин ледовитости озера. База среднесуточных значений температуры воздуха по данным метеостанции Сортавала, расположенной на северном побережье Ладожского озера, позволила рассчитать суммы отрицательных температур воздуха для каждой зимы с 1945 г. На рис. 4.5.4 представлены результаты совместного анализа этих сумм отрицательных температур воздуха (а) и ледовитости (б). В качестве климатической нормы процента покрытости акватории льдом были взяты медианные величины за весь период наблюдений. Принято считать, что экстремумы оказывают меньшее влияние на медианные значения (Panofsky, Briern, 1958; Assel, 2003). Величина медианного значения ледовитости показывает, что на озере, как правило, наступает полный ледостав, что, по сути, ближе к реальности, чем среднее значение ледовитости, не превышающее 80%.

Для сумм отрицательных температур воздуха приведены средние их значения. Из рис. 4.5.4 видно, насколько широк диапазон наблюдавшихся величин за последние 65 лет. При достижении средней величины суммы отрицательных температур воздуха — 597 ± 26 градусо-дней, на озере, как правило, образуется полный ледостав. Ледостав начинает разрушаться, когда перестает расти сумма отрицательных температур воздуха, и начинает расти сумма положительных температур в начале апреля.

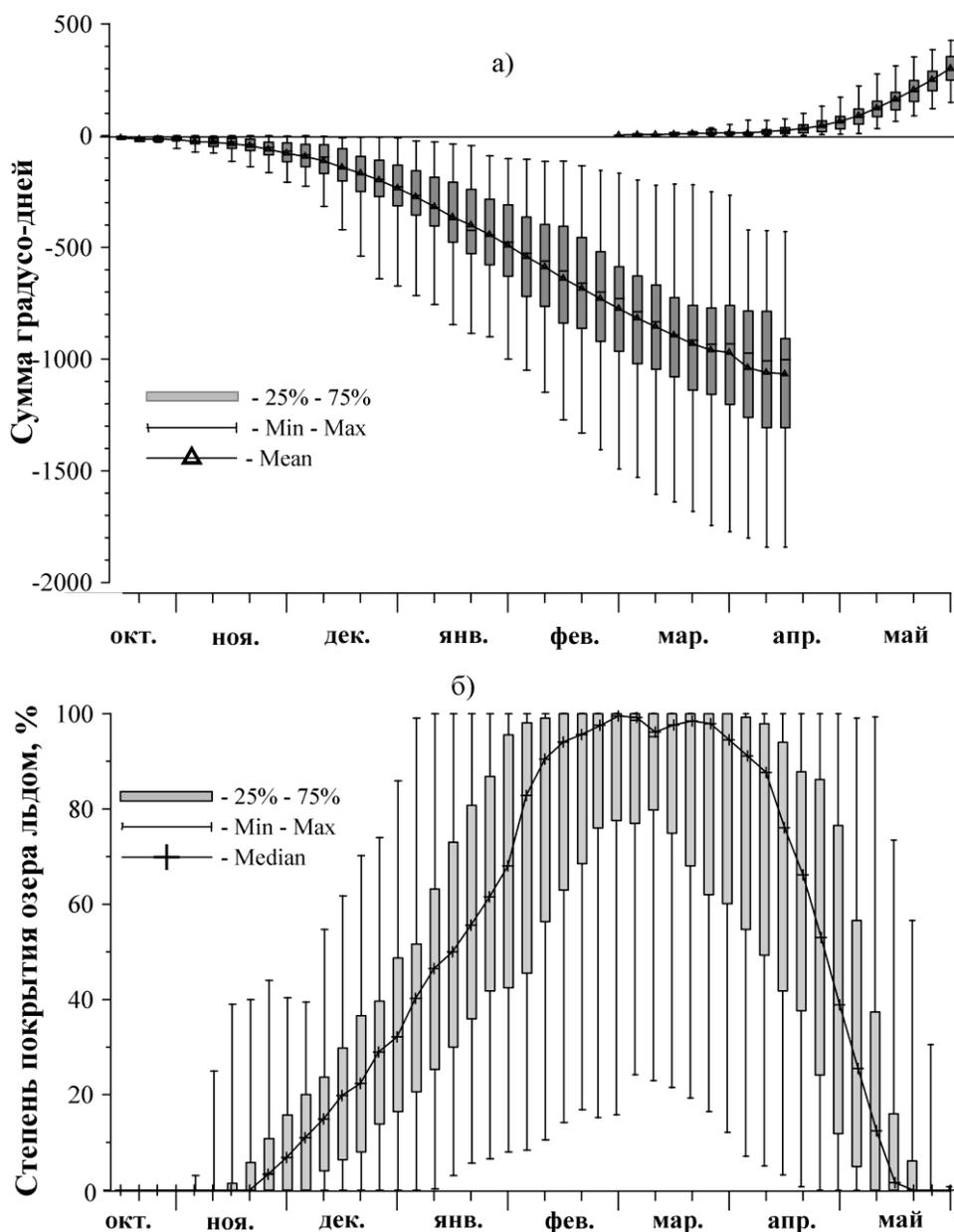


Рис. 4.5.4. Сезонный ход предельных, средних (медианных) и величин с обеспеченностью 25 и 75% за зимний период суммы отрицательных температур воздуха (а) и процента покрытия озера льдом (б).

Для характеристики степени ледовитости озера для каждого зимнего сезона года нами был предложен относительный индекс ледовитости (RICI), представляющий собой площадь под линией, соединяющей значения процентного покрытия льдом озера (S_i) (рис. 4.5.4 или 4.5.5), нормированную на площадь, ограниченную медианными значениями ($S_{\text{медиан.}}$), рассчитанными по всему ряду величин покрытия озера льдом (рис. 4.5.4, б)

$$RICI = \frac{\tau_{кон.} \sum S_i}{\tau_{нач.} \sum S_{медиан.}}, \quad (4.5.1)$$

где τ — средние многолетние и за каждый год даты первого появления ледовых условий и их окончания.

На рис. 4.5.5 приведены примеры разнообразных по форме изменений ледовитости и величины RICI для Ладожского озера для зим с различной степенью суровости.

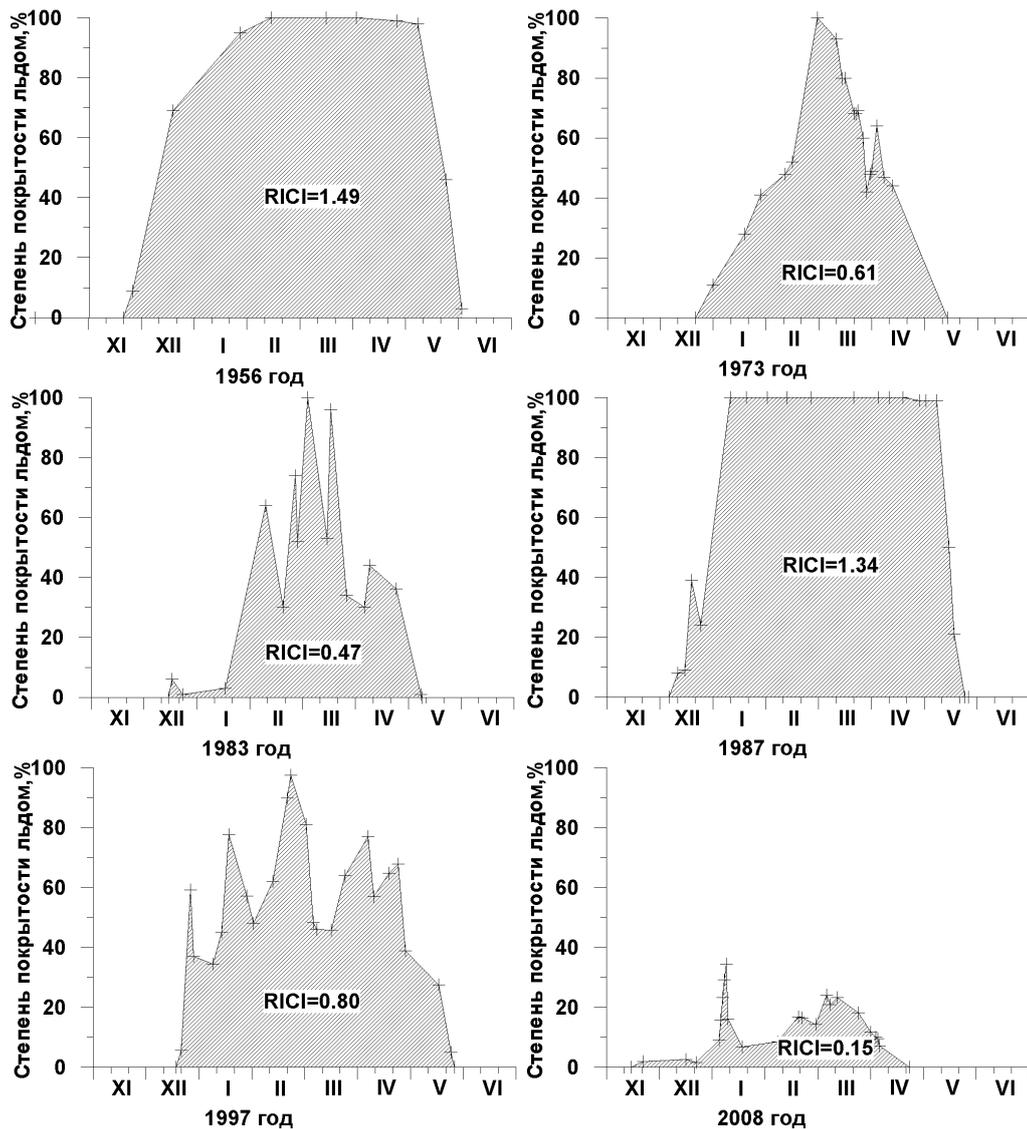


Рис. 4.4.5. Изменения ледовитости Ладожского озера в различные зимние сезоны.

Введение индекса ледовитости позволяет сравнивать годы между собой с помощью лишь одной величины, а так же исследовать взаимосвязи между характеристикой ледовитости озера и суровостью зимнего сезона. Очевидно, что распределение льда на поверхности Ладожского озера может значительно изменяться год от года. Возможно быстрое полное

замерзание озера и существование стопроцентного ледяного покрова в течение нескольких месяцев (зима 1955–1956 гг.) с превышением RICI примерно на 50%. В зависимости от суровости зимы и ветрового воздействия возможно многовершинное распределение различной ледовитости поверхности озера, как, например, в сезон 1996–1997 гг., когда значение RICI было меньше 1.

В качестве характеристики суровости зимы использованы суммы отрицательных среднесуточных температур воздуха по метеостанции в городе Сортавала, расположенном на северном берегу озера. Сумма отрицательных температур воздуха за зиму вычислялась по среднесуточным значениям температуры, начиная с даты, когда эти температуры устойчиво перейдут через 0 °С и заканчивая датой, когда среднесуточные значения температур воздуха устойчиво приобретут положительное значение. Строго говоря, температуры воздуха в г. Сортавала взаимно связаны с наличием открытой воды в северной части озера, где полынья сохраняется дольше всего, а иногда и на протяжении всей зимы. Особенно сильна эта взаимосвязь при южных ветрах.

Индекс RICI одним числом характеризует ледовые условия зимы, включая и продолжительность полного ледостава на озере. Установлена отличная корреляционная связь между ледовитостью Ладожского озера (Y) и суровостью зимы, выраженной в виде максимальной за зимний период суммы отрицательных температур воздуха (X) (рис. 4.5.6). Уравнение вида $Y = a + bX + cX^2 + dX^3$, где a, b, c и d — эмпирические параметры, имеет коэффициент детерминации, который равен 0,84. Нелинейность приведенной зависимости возникает при экстремально больших значениях сумм отрицательных температур воздуха, когда начинает увеличиваться толщина льда при полностью покрытой льдом поверхности озера.

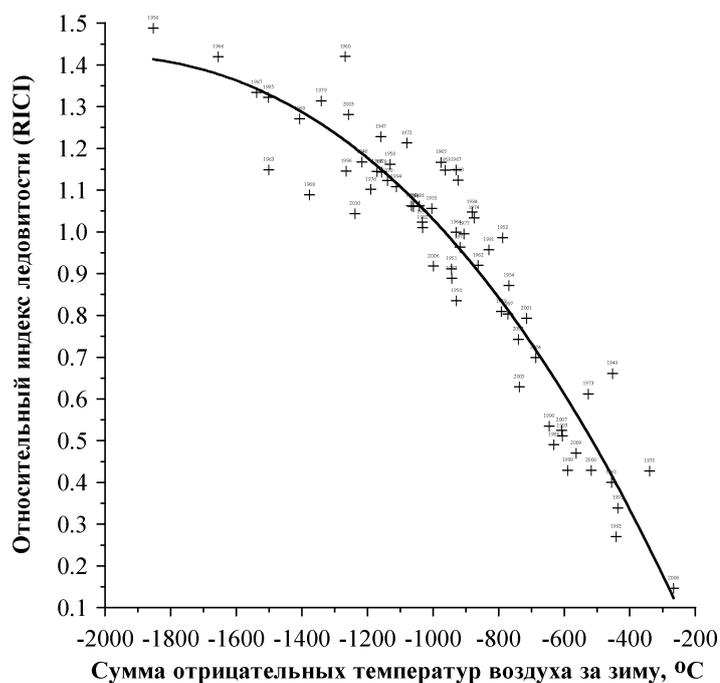


Рис. 4.5.6. Зависимость между индексом ледовитости (RICI) и суммой отрицательных температур воздуха по данным метеостанции Сортавала.

Разнообразие ледовых условий на Ладожском озере обусловлено различием характеристик погоды каждой зимы, однако, учитывая продолжительность периода наблюдений (более 65 зимних сезонов), можно получить средние даты начала и окончания ледостава, даты наступления и окончания полного ледостава, их предельные значения и оценить их изменение во времени. Следует отметить асимметричность временного хода ледовитости Ладожского озера по средним многолетним данным: увеличение покрытости озера льдом в начале зимы происходит медленнее, чем его разрушение в конце зимы (рис. 4.5.4).

В табл. 4.5.1 сведены статистические характеристики сроков наступления основных фаз ледового режима и их продолжительности за 65 лет с 1943 по 2010 г. за исключением 1948 г. За дату начала ледовых явлений (первый лед) принималась дата, средняя между последней датой отсутствия льда и первой датой наличия льда по дистанционным данным. Аналогично определялась дата окончания ледовых явлений (последний лед). За даты начала и окончания фазы полного ледостава принималась первая или последняя даты, когда озеро было покрыто льдом не менее чем на 95%, что объясняется десятипроцентной точностью определения степени покрытости озера льдом.

Таблица 4.5.1

Статистические характеристики сроков наступления основных фаз ледового режима и их продолжительности на Ладожском озере

Характеристика	Первый лед	50% льда при замерз.	95% льда при замерз.	95% льда при вскр.	50% льда при вскр.	Последний лед	Прдлж. 95%	Общ. прдлж.
Среднее	23 ноября	13 января	4 февраля	1 апреля	20 апреля	14 мая	45	172
Станд. ошибка	2,0	2,5	2,2	3,0	2,8	1,2	4,4	2,6
Медиана	19 ноября	10 января	4 февраля	4 апреля	25 апреля	13 мая	49	176
Станд. отклон.	16,1	20,2	16,2	22,3	22,2	9,6	35,3	20,9
Минимум	24.10.1993	9.12.1953 9.12.1956 9.12.2003	1.01.2003	30.01.1974	22.01.1989	20.04.1950 20.04.2008	0 (1945,1959, 1961,1971, 1975,1989, 1990,1992, 1995,2000, 2004,2008, 2009)	111 (2007)
Максимум	7.01.2007	15.03.1995	10.03.1952	10.05.1985	20.05.1956	30.05.1956	119 (1987)	204 (1981)
Диапазон значений, сутки	75	96	68	113	100	93	119	93
Количество зим	65	63	52	53	63	67	65	65

Для анализа межгодовых изменчивостей характеристик ледового режима был применен расчет линейных трендов за весь период наблюдений (Karetnikov, Naumenko, 2008). Оценивалась значимость и угловой коэффициент в уравнении линейного тренда. Межгодовая изменчивость сроков начала образования льда, представленная на рис. 4.5.7, д, незначительна, на что указывают величины стандартного отклонения (табл. 4.5.1). Расчет линейного тренда сроков начала образования льда указывает на наличие слабой тенденции (0,05 дня/год), направленной в сторону более поздних их значений, однако, коэффициент детерминации этого тренда очень мал (0,38%).

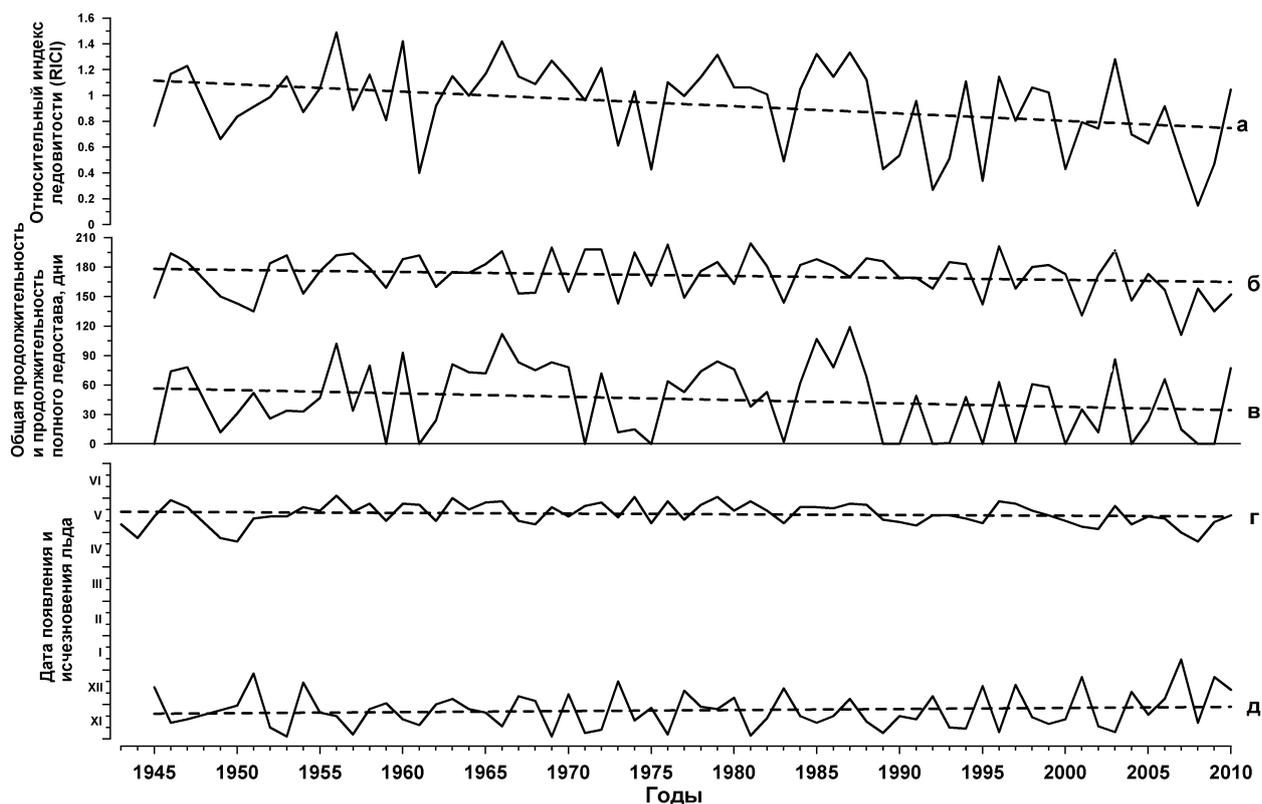


Рис. 4.5.7. Межгодовая изменчивость относительного индекса ледовитости (а), общей продолжительности (б) и продолжительности полного ледостава (в), дат появления (г) и исчезновения (д) льда в озере.

Даты окончания ледостава имеют (рис. 4.5.7, г) очень малую межгодовую изменчивость (табл. 4.5.1) и так же имеют слабую тенденцию ($-0,06$ дня/год), но в сторону более ранних их значений при коэффициенте детерминации (1,58%).

По датам первого появления льда (рис. 4.5.7, д) и последнего его компактно расположенного присутствия в озере (рис. 4.5.7, г) можно получить продолжительность ледовых явлений за каждый год. Межгодовая изменчивость продолжительности ледовых явлений в Ладожском озере (рис. 4.5.7, б) за период 65 лет имеет незначительную тенденцию ($-0,06$ дня/год) на уменьшение общей продолжительности. Продолжительность полного ледостава (рис. 4.5.7, в), если он наступает на Ладожском озере, может варьировать в широких пределах от нескольких дней до почти 4 месяцев, как это было зимой 1986–1987 гг. Для малых озер Карелии (Ефремова, Пальшин, 2011) получены аналогичные выводы о малости коэффициентов детерминации для линейных трендов межгодовой изменчивости сроков начала и окончания ледовых явлений.

Относительный индекс ледовитости был рассчитан для всех зим, когда было достаточно данных для построения хода ледовитости (рис. 4.5.7, а). Значение RICI за последние 65 лет имеет тенденцию к уменьшению, но при коэффициенте детерминации этого тренда равном 11,9%.

Для выделения экстремальных лет по ледовому режиму озера были использованы данные за 65 зим, начиная с зимы 1943–1944 гг. по зиму 2009–2010 гг., исключая зиму 1947–1948 гг., для которой не было возможности построить хронологический ход изменения покрытости озера льдом. Зимние периоды в зависимости от суровости были разбиты на непересекающиеся группы.

Таблица 4.5.2

Типизация зим по их суровости за период с 1943 по 2010 гг.

	Полное покрытие озера льдом, сутки				Частичное покрытие, %	
	≥ 90	61–89	31–60	≤ 30	≥ 70	< 70
Тип	экстремально суровая	суровая	средняя	мягкая	теплая	экстремально теплая
Количество (%)	5 (8)	23 (35)	13 (19)	11 (17)	7 (11)	6 (9)
Зимы	1955–56	1945–46	1949–50	1948–49	1944–45	1960–61
	1959–60	1946–47	1950–51	1951–52	1958–59	1988–89
	1965–66	1957–58	1952–53	1961–62	1970–71	1991–92
	1984–85	1962–63	1953–54	1972–73	1974–75	1994–95
	1986–87*	1963–64	1954–55	1973–74	1989–90	1999–00
		1964–65	1956–57	1982–83	2003–04	2007–08*
		1966–67	1976–77	1992–93	2008–09	
		1967–68	1980–81	1996–97		
		1968–69	1981–82	2001–02		
		1969–70	1990–91	2004–05		
		1971–72	1993–94	2006–07		
		1975–76	1998–99			
		1977–78	2000–01			
		1978–79				
		1979–80				
		1983–84				
		1985–86				
		1987–88				
		1995–96				
		1997–98				

		2002–03				
		2005–06				
		2009–10				

* экстремальные зимы

В качестве критерия выбрана продолжительность полного ледостава на Ладожском озере. Зимние сезоны были разбиты на шесть типов (категорий), четыре типа с полным покрытием поверхности озера льдом, две – с частичным. 62% всех зим Ладожское озеро было покрыто полностью льдом не менее одного месяца. Наибольшая повторяемость (35%) принадлежит суровым зимам, когда озеро полностью покрыто льдом более двух месяцев. Самой суровой за последние 65 лет по ледовым условиям была зима 1986–1987 гг. Второй по суровости была зима 1955–1956 гг. Начало замерзания в эту зиму было отмечено уже 19 ноября 1955 г., 24 января 1956 г. озеро полностью покрылось льдом, началось разрушение льда 5 мая 1956 г., исчез лед в озере 31 мая 1956 г. Таким образом, общая продолжительность ледовых условий в озере была 192 дня, и 102 суток озеро полностью находилось подо льдом (рис. 4.5.5). Экстремально мягкой была зима 2007–2008 гг. (рис. 4.5.5), когда максимальное распространение льда по поверхности озера не превысило 40%.

С точки зрения климатических изменений Ладожское озеро обладает огромной тепловой инерцией. Видимо, поэтому современные климатические изменения незначительно сказались на его ледовом режиме. Однако экстремальных лет (очень теплых или очень холодных) за последние три десятилетия было в полтора раза больше, чем за предыдущий период (Karetnikov, Naumenko, 2011). Работы по изучению ледового режима Ладожского озера позволили собрать и гармонизировать информацию о процентах покрытости льдом Ладожского озера во время авиационных и спутниковых съемок начиная с 1943 г. по настоящее время. Применение статистического анализа позволило определить сроки основных фаз ледового режима и их продолжительности. Для характеристики каждой зимы по ледовитости был предложен относительный индекс ледовитости, позволяющий сравнивать зимы между собой. Значение индекса имеет хорошую зависимость от суммы отрицательных температур воздуха за зиму по метеостанции Сортавала. На основе этого индекса произведена дифференциация зим по ледовым условиям и выбраны годы с экстремальными значениями ледовитости. Проведенный статистический анализ межгодовой изменчивости сроков начала, окончания и продолжительности ледостава, а также относительного индекса ледовитости позволил оценить их линейные тренды.

4.6. Пространственное распределение и многолетние тренды прозрачности воды Ладожского озера

Прозрачность воды поверхностного слоя крупных озер определяет глубину проникновения света, который является основой фотосинтеза автотрофных организмов. Принято принимать за нижнюю границу фотического слоя глубину проникновения в воду 1% света в полдень. Среди гидробиологов существует близкое понятие «эвфотическая зона» (или трофогенный слой) — верхний слой воды, куда проникает достаточное количество света для поддержания фотосинтеза. Многие исследователи считают эти понятия совпадающими для средних условий проникновения света и существования фитопланктона. Основным общепринятым интегральным показателем прозрачности верхнего слоя воды является глубина исчезновения белого диска (диска Секки D_s). Основные положения теории видимости белого диска и его связи с гидрооптическими характеристиками обсуждаются в работах (Preisendorfer, 1986, Tyler, 1968). Эйнор (1987) предлагает принять глубину эвфотического слоя равной удвоенной глубине исчезновения диска Секки.

Коэффициент ослабления солнечной радиации, проникающей в воду, входящий в качестве параметра в закон Буге-Ламберта, определяется прозрачностью воды и может быть связан с глубиной исчезновения диска (Preisendorfer, 1986). Более того, D_s служит величиной, пропорциональной индексу трофности водоемов. Исторически прозрачность по диску Секки является наиболее часто измеряемой характеристикой озерных вод и может служить показателем для анализа межгодовых (климатических) изменений.

Морфометрические особенности крупных озер мира наряду с их термическим и динамическим режимом определяют распределение общей взвеси (органической и неорганической) в водной толще, что в конечной степени регулирует оптические свойства верхнего слоя воды. Наиболее полная сводка всех имеющихся в литературе материалов и данных экспедиционных исследований о прозрачности и цвете воды Ладожского озера, полученных при помощи белого диска, приводится в книге Молчанова «Ладожское озеро» (1945). Более поздние исследования связаны с именем Петрова (1967) и исследованиями Института озероведения (Антропогенное ..., 1982). Одно из последних обобщений в виде карт распределения прозрачности для весны, лета и осени дано в Атласе Ладожского озера (2002).

В базе данных по Ладожскому озеру насчитывается 7085 измерений прозрачности по белому диску Секки за период открытой воды начиная с 1905 г. На рис. 4.5.1 представлена количественная характеристика данных за весь период наблюдений на озере. Только начиная с 1955 г. измерения стали носить систематический характер. На рисунке (рис. 4.6.1, а) приведена линия тренда, который указывает на уменьшение прозрачности, не превышающее 0,73 м за 100

лет. Эмпирическая функция распределения значений D_s соответствует нормальному (гауссову) закону распределения. Среднее, модальное и медианное значения прозрачности за период наблюдений практически совпадают и равны 2,9–3,0 м при среднеквадратическом отклонении 0,9 м. Максимальное значение прозрачности за период наблюдений не превышало 6,6 м и предположения Молчанова (1945) о том, что прозрачность может быть 7–8 м, не подтверждаются.

Распределение прозрачности зависит от времени года, определяющего периоды наибольшего стока воды с водосборного бассейна, температурный и ветровой режим, а также условия развития в озере микроорганизмов (планктона). На графике (рис. 4.6.1, б) показан сезонный ход прозрачности вод Ладожского озера по лимническим районам (Науменко, 1995). Каждый район характеризуется особенностями светового, термического, гидрологического и гидрохимического режимах (Ладожское..., 2002).

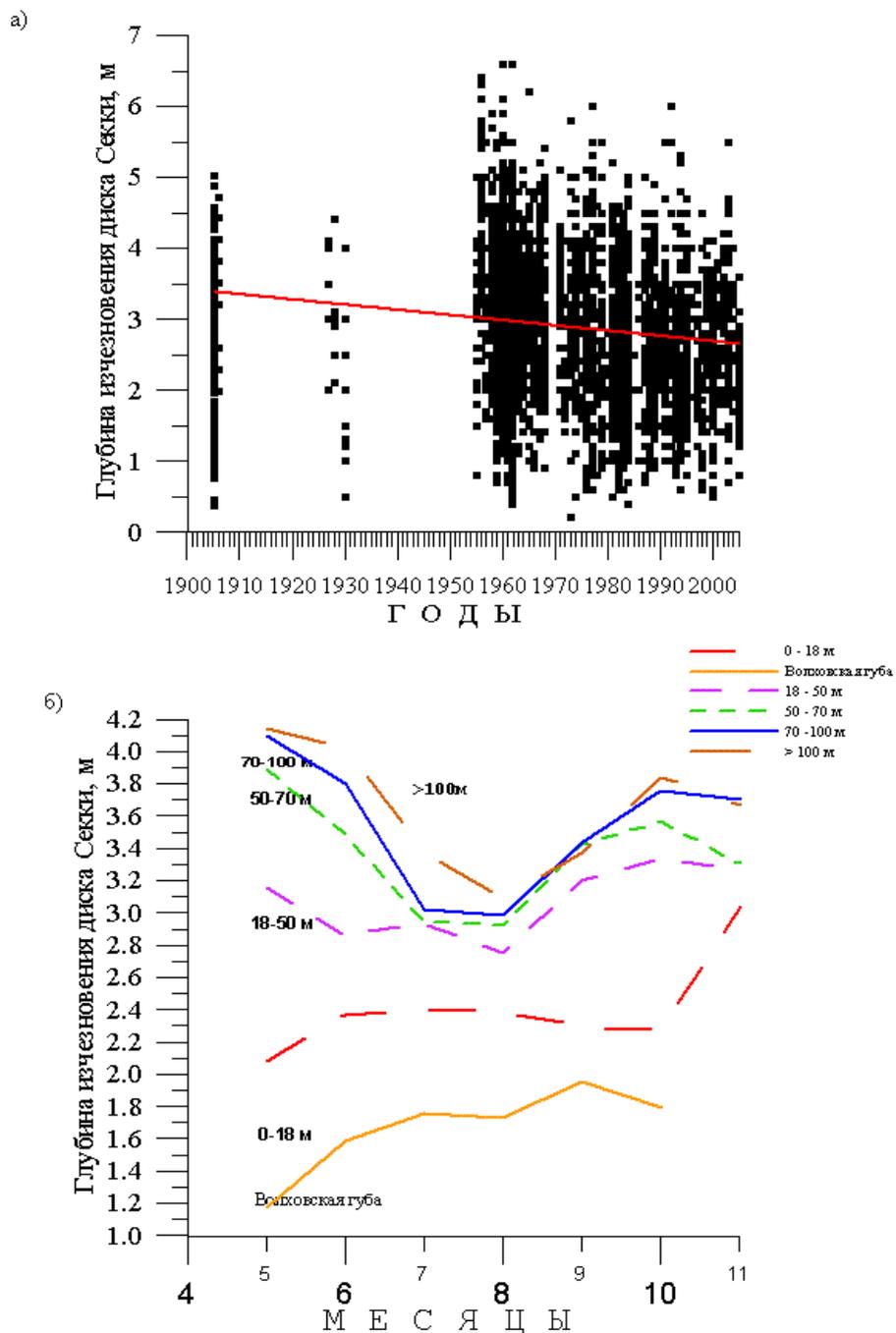


Рис. 4.6.1. Общий тренд прозрачности воды по всем данным (а) и сезонный ход прозрачности по лимническим районам (б).

Прозрачность в мелководном районе с глубинами до 18 м практически не претерпевает значимых изменений в течение периода открытой воды, что объясняется постоянной интенсивной волно-ветровой деятельностью, приводящей к взмучиванию донных отложений.

Волховская губа, входящая в этот район и являющаяся устьем реки Волхов, приносящей в озеро значительное количество взвешенных частиц, — наименее прозрачная бухта Ладожского озера. В глубоководной части озера с глубинами более 50 м прозрачность верхнего слоя озера имеет минимум в августе, причем наибольшие различия между максимальной и минимальной среднемесячными прозрачностью наблюдаются в самом глубоководном районе с глубинами более 140 м.

Сезонный ход прозрачности неоднороден в отдельных районах озера за счет морфологических особенностей прибрежной зоны (глубина, уклон дна и др.), распределения вод притоков и степени биологической активности. Для построения среднемесячного распределения прозрачности Ладожского озера его акватория была разбита на 71 квадрат размером 20*20 км. Такое разбиение является оптимальным как для анализа пространственного распределения, так и для анализа межгодовых трендов. Для каждого из квадратов произведена сортировка данных измерений прозрачности по месяцам (с мая по октябрь) для последующего получения среднемесячных значений, дисперсий и трендов. Указанные значения были отнесены к средним координатам измерений в квадрате. Пространственное распределение было построено для эквидистантной сетки с 30*25 узлами. Для шести месяцев открытой воды оно показано на рис. 4.6.2. В мае – июне изменения прозрачности воды соответствуют распределению глубин озера, они зональны — с увеличением глубины по мере удаления от берегов увеличивается и прозрачность. Наибольшие горизонтальные градиенты наблюдаются в мае, когда в глубоководной части озера с температурами менее 4 °С и малыми концентрациями общей взвеси, прозрачность достигает 4,5 м, а в Волховской губе — не более 1,5 м. В июне – июле, с увеличением прогрева озера, горизонтальные градиенты уменьшаются при общем уменьшении прозрачности глубоководных районов озера. В этот период пространственное распределение прозрачности уже не следует распределению глубин озера, а в значительной степени определяется уровнем развития биологических сообществ. Минимум прозрачности (так же как и наименьшие горизонтальные градиенты) в Ладожском озере имеет место в августе в связи с массовым развитием фитопланктона и с повышением доли органической взвеси в озере. Восточная часть озера с наибольшим количеством притоков, несущих органические вещества в виде окрашенных гуминовых соединений, на расстоянии нескольких километров от берега имеет прозрачность менее 2,5 м. Это значение может служить границей распространения вод притоков. Западная часть Ладожского озера характеризуется более высокими значениями прозрачности воды (до 3 м).

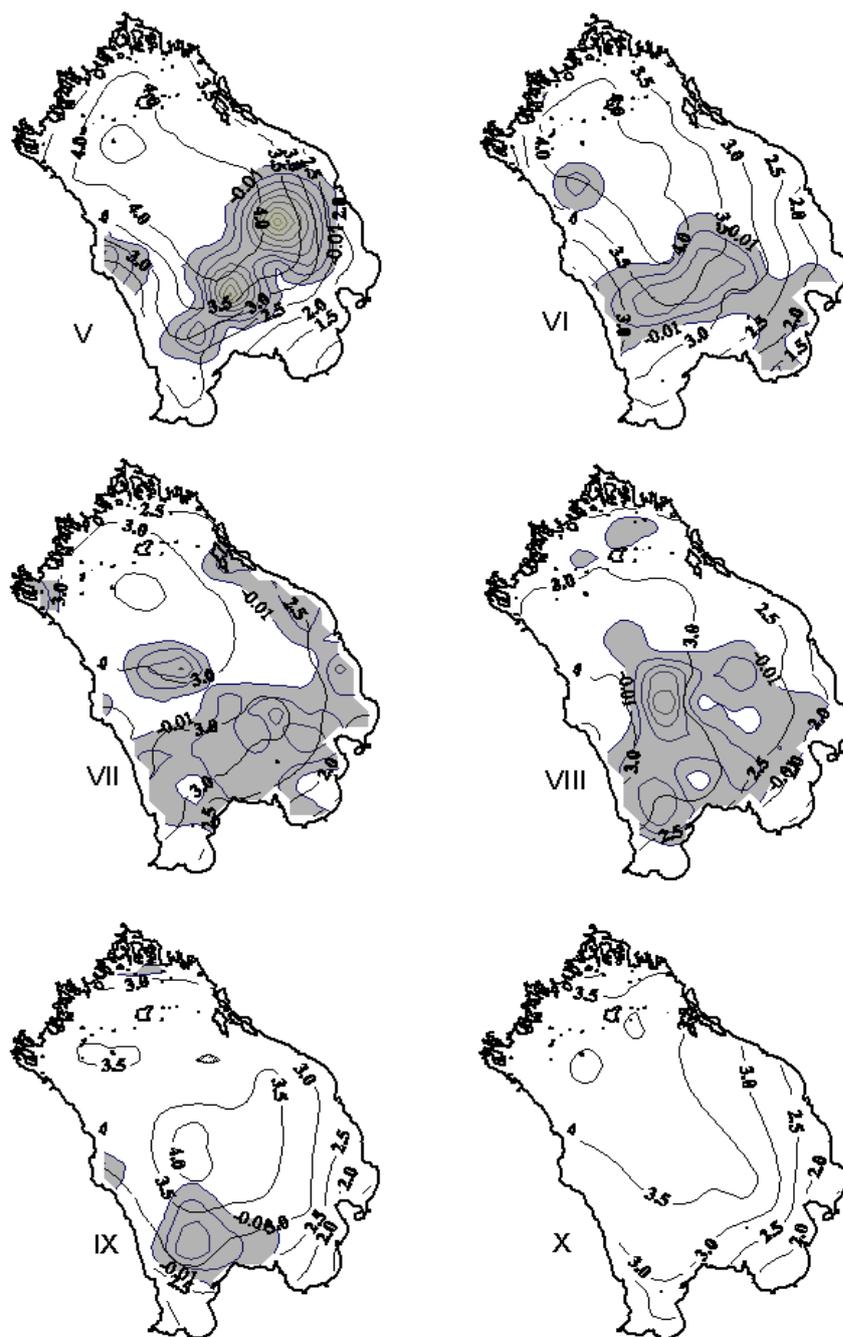


Рис. 4.6.2. Среднемесячное пространственное распределение прозрачности и районы с наибольшими отрицательными трендами (тонированы).

Установлена степень связи между прозрачностью верхнего слоя воды и распределением глубин Ладожского озера. При решении этой задачи в качестве кривой регрессии использовался полином третьей степени. Судя по значениям коэффициента детерминации, зависимость прозрачности от глубины меняется в течение периода открытой воды. Наибольший процент объясненной дисперсии (коэффициент детерминации равен 64%) имеет место в мае, а

затем уменьшается в июне, что характерно и для пространственного распределения температуры воды (Науменко, Каретников, 2002). В период максимального прогрева поверхности воды коэффициент детерминации становится меньше 40% , что свидетельствует о том, что пространственное распределение прозрачности в этот период регулируется другими факторами (гидробиологическими и гидродинамическими). В этот период средняя прозрачность в озере минимальная, как и диапазон ее изменений по акватории озера. С сентября коэффициент увеличивается, не достигая весенних величин. Аппроксимация полиномом пространственного распределения прозрачности позволяет проследить, при каких глубинах имеет место максимум прозрачности. Если для мая и июня прозрачности более 4 м находятся над глубинами более 100 м, то в августе – сентябре максимум отмечается над глубинами 60–80 м, т. е. в центральной части озера. Таким образом, в мае – июне существенную связь между распределением глубин и прозрачностью можно объяснить значительным влиянием глубины дна на температуру поверхности воды, влияющую на жизнедеятельность фитопланктона, а, следовательно, и прозрачность.

Анализ пространственного распределения дисперсий прозрачности как меры межгодовой изменчивости показал, что в течение периода открытой воды наибольшие дисперсии имеют место в южной части озера, лишь в июне – июле в северо-западной части озера отмечается еще одна область повышенных значений. В сентябре – октябре на юге область повышенных значений существенно сокращается.

Анализ климатических трендов выполнен с использованием линейной модели для каждого месяца с мая по октябрь. Выявлены площади со значимыми трендами (при уровне значимости 5%) для каждого исследуемого месяца. Практически все тренды отрицательны, что свидетельствует об уменьшении прозрачности воды за исследуемый период. Распределение областей со значимыми трендами изменяется в зависимости от месяца, причем летом область распространения больше, чем весной или осенью (рис. 4.6.2). Определены площади, занятые значимым трендом, в июле около половины акватории Ладожского озера подвержена отрицательному тренду (табл. 4.6.1).

Процент площади, занятой отрицательным трендом прозрачности воды,
и коэффициенты детерминации трендов

<i>Месяц</i>	<i>М а й</i>	<i>И ю н ь</i>	<i>И ю л ь</i>	<i>А в г у с т</i>	<i>С е н т я б р ь</i>
<i>% площади озера</i>	32,7	29,8	48	44,9	12,7
Коэффициент детерминации (%), <u>мин-макс</u>	<u>22–92</u>	<u>7–55</u>	<u>14–45</u>	<u>12–66</u>	<u>30–40</u>
среднее	48	24	25	31	34

Весной и осенью эта область значительно меньше и приурочена к южным районам озера. Совместный анализ пространственного распределения трендов по акватории озера позволил выявить район озера, где в течение пяти месяцев с мая по сентябрь имеет место понижение прозрачности с трендом выше среднего. Это район в южной части с глубинами от 10 до 30–40 м, практически совпадающий с сентябрьским распределением (рис. 4.6.2).

Полученные результаты позволили оценить климатические тренды изменения прозрачности за период с 1905 по 2003 гг. Наибольшее по абсолютной величине значение тренда характерно для мая и составляет $-0,07$ м/год, в остальные месяцы средние тренды примерно одинаковые и находятся в пределах от $-0,027$ до $-0,015$ м/год (в среднем $-0,02$ м/год).

4.7. Распространение вод притоков на акватории озера

Многолетние наблюдения за распределением удельной электрической проводимости (УЭП) в озере и истоке реки Невы, дополненные наблюдениями за температурой и глубиной видимости белого диска, позволяют различать водные массы в зависимости от их происхождения и оценивать траектории распространения вод притоков на акватории озера. Электропроводность воды может быть использована не только для детального оконтуривания шлейфов поступающих в него вод и в качестве показателя формирования и трансформации разнородных водных масс в озере, но и для оценки причин, вызывающих ее изменение, в процессе многолетних наблюдений.

Электропроводность вод основных притоков Ладожского озера. Ладожское озеро относится к водоемам замедленного водообмена, наполнение которого происходит преимущественно за счет речного стока с его бассейна. Поэтому формирование водных масс в озере зависит, прежде всего, от особенностей вод поступающих в него притоков.

Воды рек Свирь и Бурная поступают в озеро равномерно, так как их сток зарегулирован, при этом электропроводность их вод почти не меняется в течение года, составляя соответственно 63 и 73 мкСм см⁻¹. Электропроводность рек Паша и Оять, которые увеличивают годовой расход Свири в среднем на 20%, составляет соответственно 75 и 65 мкСм см⁻¹. Сток реки Волхов имеет выраженные периоды половодья и зимней межени, а УЭП воды в реке существенно меняется. В меженный период она составляет в среднем 270 мкСм см⁻¹, а в период весеннего половодья, на который приходится до 48% годового стока реки, она составляет 120–175 мкСм см⁻¹. В непосредственной близости от устья Волхова в озеро поступают также воды реки Сясь, средние годовые значения УЭП которой составляют 150–215 мкСм см⁻¹, и стоки Сяского целлюлозно-бумажного завода, электропроводность которых близка к 1000 мкСм см⁻¹. Годовой ход электропроводности воды основных притоков Ладожского озера приведен на рис. 4.7.1.

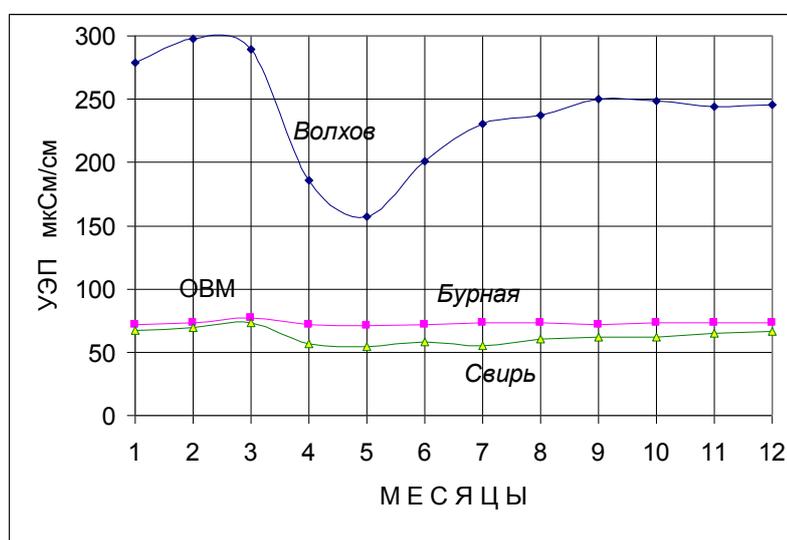


Рис. 4.7.1. Внутригодовые изменения электропроводности воды основных притоков Ладожского озера, осредненные за период с 1981 по 1989 г.

Таким образом, воды трех основных рек, питающих Ладожское озеро, имеют различную электропроводность, отличающуюся от электропроводности основной водной массы, а их устья находятся на значительных расстояниях друг от друга. Поступая в озеро, они образуют речные первичные водные массы (ПВМ), которые можно легко определить по их электропроводности: Бурненскую ПВМ — 70 мкСм см⁻¹, Сви́рскую ПВМ (включая Пашу и Оять) — 65 мкСм см⁻¹ и Волховскую ПВМ (включая р. Сясь и стоки Сяского ЦБЗ) — 150–270 мкСм см⁻¹.

Электропроводность воды Ладожского озера. Поскольку система течений Ладожского озера подвержена сезонным изменениям (Охлопкова, 1966), которые определяют распространение вод притоков, зоны их влияния на его акватории также носят сезонный

характер. Оценка зон распространения речных вод на акватории Ладожского озера в различные сезоны года, основанная на результатах измерений электропроводности ПВМ и основной массы воды (ОВМ) озера, представлена на рис. 4.7.2.

Весной речные воды распространяются под воздействием системы течений, которые имеют сложный характер, с тенденцией к формированию геострофической циклонической плотностной циркуляции. В первую фазу гидрологической весны фронт термического фронтального раздела (термобара) отделяет прибрежные (речные) теплые воды от более холодных и способствует накоплению речных ПВМ в прибрежных районах, затрудняя их смешение с ОВМ.

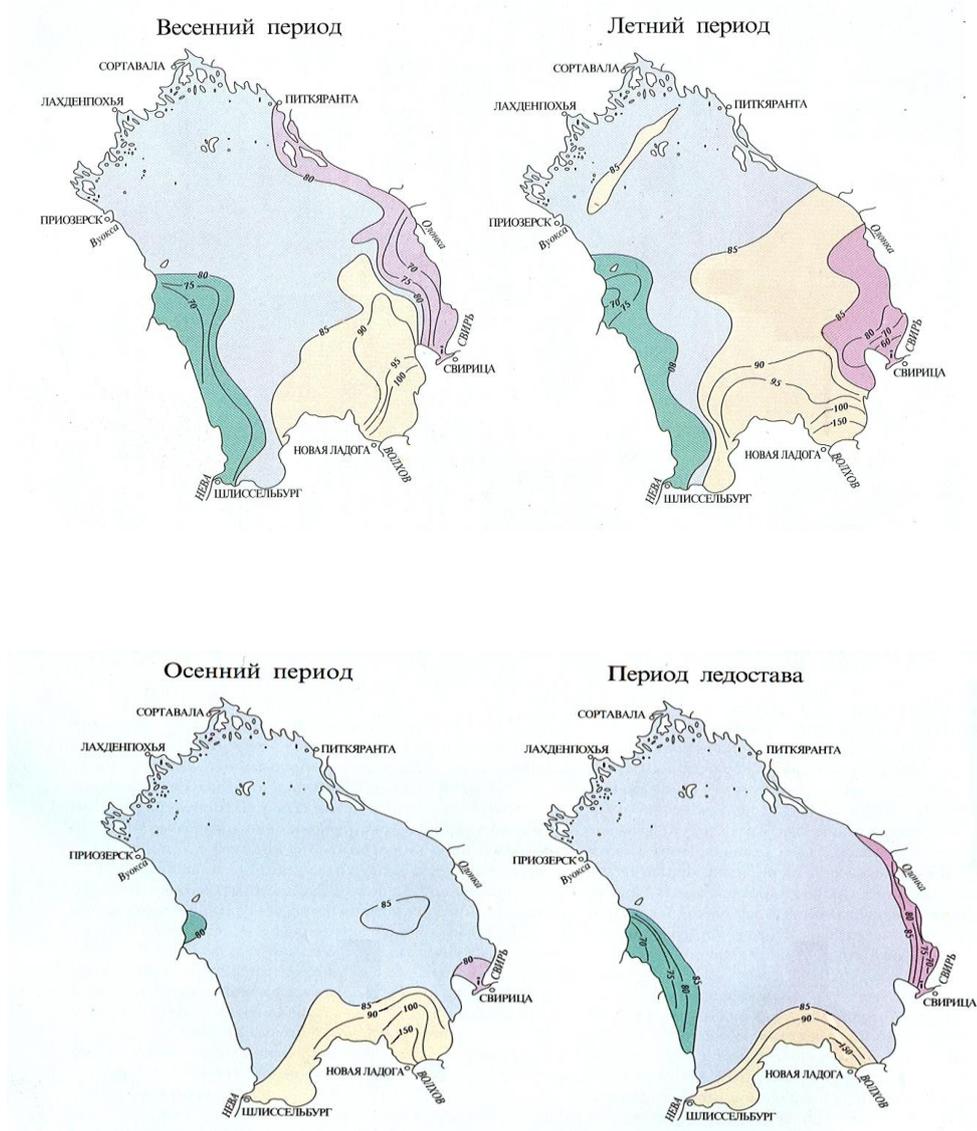


Рис. 4.7.2. Пространственное распределение УЭП (мкСм см⁻¹) в Ладожском озере, вызванное распространением речных ПВМ в различные сезоны года.

В западной части озера, вблизи выхода вод реки Бурная, термобар находится на незначительном расстоянии от береговой линии. Он препятствует проникновению речных вод (УЭП менее 95 мкСм см⁻¹) в центральную часть озера. Под воздействием геострофической

циклонической плотностной циркуляции вод ПВМ реки Бурная распространяются в южном направлении и, как правило, достигают истока реки Невы.

Размещение водной массы, сформированной водами реки Волхов (УЭП до 105 мкСм см^{-1}), также ограничено фронтом термического бара. Эта ПВМ перемещается к северо-востоку от устья реки и занимает большую по площади акваторию мелководной юго-восточной части озера. Свирская ПВМ (УЭП менее 95 мкСм см^{-1}) также перемещается в северо-восточном направлении и нередко отмечается на значительном удалении от устья реки. Таким образом, в весенний период распространение речных вод возможно лишь в полосе акватории, ограниченной с одной стороны береговой линией, а с другой — термическим баром, а их перемещение происходит преимущественно под влиянием течений плотностной циклонической циркуляции.

Летом динамические процессы определяются устойчивой плотностной стратификацией в озере, поэтому вертикальный обмен ослаблен. Образование слоя температурного скачка в весенне-летний период препятствует проникновению ПВМ вглубь озера. Однако в результате ветрового перемешивания они трансформируются в слое эпилимниона. По мере удаления от места образования их влияние на ОВМ становится все менее ощутимым. Под влиянием циклонической плотностной циркуляции продолжается процесс перемещения и трансформации ПВМ. Воды Свири, как и в весенний период, распространяются вдоль северо-восточного берега озера. Разбавленные водами основной водной массы воды Волховской ПВМ продолжают распространение в северном направлении и нередко достигают центральной части озера. При определенных метеоусловиях, под влиянием ветровых течений, они могут распространяться в западном направлении и частично заполнять Петрокрепостную губу. Воды Бурной распространяются вдоль юго-западного берега в направлении бухты Петрокрепость, уменьшая УЭП озера в этом районе. Важно отметить, что распределение гидрофизических характеристик в поверхностном слое воды в этот период отражает их распределение по всему эпилимниону, в пределах которого до слоя температурного скачка они остаются неизменными.

В период осеннего охлаждения наряду с процессом конвективного теплопереноса наступает сезон максимальных скоростей ветра, который является основным фактором, воздействующим на поверхность озера, и от которого зависят скорости и направления течений. В этих условиях воды притоков вовлекаются в процесс перемешивания с ОВМ озера. По мере охлаждения воды, вызывающей формирование антициклонической циркуляции (прежде всего в мелководной южной части озера), начинается перенос Волховской ПВМ в западном направлении. Разбавленные воды реки могут достигать истока Невы.

В зимний период создаются идеальные условия для транзитного перемещения речных вод по акватории озера. Они возникают по мере образования льда, который препятствует

ветровому воздействию на водную поверхность, исключая перемешивание и перемещение речных вод под его влиянием по акватории озера. В результате перенос речных вод осуществляется только за счет стокового течения, вызванного Невой, и плотностных течений. Причем зимой плотностные течения в большей степени обусловлены не горизонтальными градиентами температуры, как в период открытой воды, а различным удельным весом (минерализацией) воды ОВМ озера и его притоков. В наибольшей степени это касается Волховской ПВМ, минерализация (электропроводность) которой в январе – марте почти в 3 раза превышает минерализацию ОВМ. Поэтому воды реки распространяются в виде придонного потока вдоль южного берега в направлении бухты Петрокрепость, а затем под влиянием стокового течения — к истоку Невы. Менее минерализованные речные воды Свири и Бурной участвуют в циклональной циркуляции вод озера. Хотя скорости перемещения транзитных потоков речных вод сравнительно невелики, их постоянство на протяжении длительного времени и отсутствие внешнего воздействия на этот процесс приводят, как представлено на рис. 4.7.2, к их распространению на значительные расстояния.

Перечисленные сезонные особенности динамических процессов, происходящих на акватории Ладожского озера, четко проявляются в изменениях УЭП в Неве (Крючков, 1982, 1987). Они были подробно изучены во время ежесуточных наблюдений в ее истоке в период с 1981 по 1997 г. На основании этих данных выполнен расчет средних декадных значений УЭП за семнадцатилетний период наблюдений, представленный на рис. 4.7.3. Четко определяются три основных ежегодно повторяющихся периода изменений УЭП в Неве, отражающих периодичность поступления в нее различных водных масс.

В течение первого, зимнего периода, наиболее отчетливо проявляется поступление вод притоков в реку Неву, когда через Неву формируется вынос транзитных потоков сначала Волхова, а затем, одновременно с ним, Бурной. Поступление Волховской ПВМ в Неву начинается в декабре, но наиболее отчетливо транзит вод притоков проявляется по мере образования кромки льда в мелководных районах озера. При этом воды реки Бурная достигают истока Невы значительно позже, чем Волховские воды, обычно через 30–40 суток. Происходит это потому, что при равном расстоянии от устьев этих рек до истока Невы (примерно 90 км), образование кромки льда у юго-западного побережья озера наступает на 2–3 недели позже, чем в его южной части. Кроме того, скорость образующегося при этом транзитного потока реки Бурная меньше Волховского, так как меньше плотностные различия, обусловленные ее минерализацией по отношению к ОВМ. С января по март, когда в Неву поступают воды этих притоков, электропроводность в истоке реки достигает максимальных в году значений 110 мкСм см^{-1} .

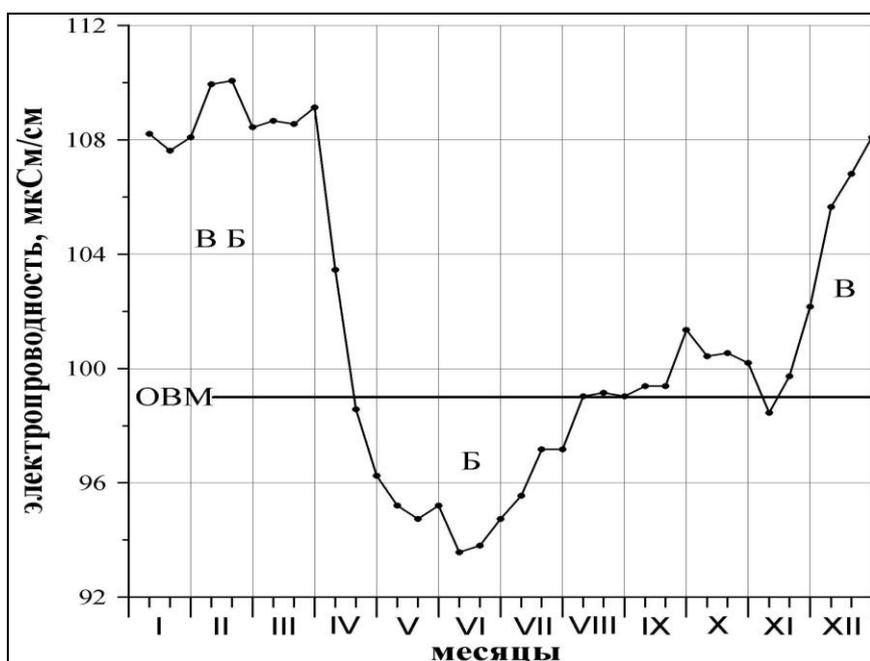


Рис. 4.7.3. Внутригодовое распределение электропроводности воды в истоке реки Невы (ежедекадные значения по результатам ежесуточных наблюдений, осредненные за период с 1981 по 1997 г.): ОВМ — среднее значение электропроводности основной водной массы озера за период наблюдений, В Б — влияние транзитных потоков рек Волхов и Бурная в период ледостава, Б — влияние транзитного потока Бурной, В — влияние транзитного потока реки Волхов.

В течение второго, весенне-летнего периода (с апреля по август), электропроводность воды в Неве находится под влиянием мощного переноса к ее истоку вод только реки Бурная, который обеспечен циклональным движением плотностной циркуляции воды, поэтому она уменьшается до значений 94 мкСм см^{-1} .

Осенью, в сентябре – октябре (третий период) электропроводность воды в Неве определяется преимущественно электропроводностью поступающей в нее ОВМ озера, а затем, с начала ноября, постепенно увеличивается за счет формирования притока Волховской ПВМ.

Полученные данные позволяют оценить объемы речных вод, поступающих в Неву с транзитными потоками. Расчеты показывают, что, в зависимости от продолжительности периодов действия транзитного выноса, в среднем они ежегодно составляют 15–20% от годового объема стока Волхова и Бурной.

Периоды зимнего транзита воды притоков к истоку Невы зависят как от сроков начала образования ледостава и его продолжительности, так и от покрытости льдом отдельных районов озера. Так, зимой 2007–2008 г. покрытие озера льдом не превысило 30%. Ледовый покров установился только в губах мелководной южной части озера, а центральная и северо-западная

части оставались свободными ото льда в течение всей зимы. В результате, не было условий для формирования транзита воды реки Бурная к истоку Невы. При этом в озере большую роль приобретают ветровые течения, которые существенно меняют характер переноса вод притоков. Не защищенные ледоставом речные воды быстро перемешиваются с озерными. Повторение подобных ситуаций, которые могут быть вызваны потеплением климата, ограничит транзитный сток маломинерализованной речной воды в Неву, что неизбежно приведет к распреснению основной водной массы озера, а значит уменьшению ее электропроводности.

Крупномасштабные ветровые циркуляции способны существенно влиять на характер переноса вод притоков по акватории водоема, меняя пространственные характеристики гидрофизической структуры его воды. При западных ветрах возникает циклоническая циркуляция, которая создает условия для накопления Волховских вод в юго-восточной части озера. В некоторых случаях они даже проникают в Свирскую губу. При устойчивом ветре с восточной составляющей в весенне-летний период в озере может образоваться антициклоническая циркуляция воды. Она способствует накоплению Волховской ПВМ в юго-западной части озера, бухте Петрокрепость, и ее поступлению в Неву. Объем этих вод, вычисленный по росту электропроводности воды в истоке реки Невы и его продолжительности, показывает, что в отдельные годы обеспеченный ветровыми течениями вынос Волховских вод соизмерим с объемами его зимнего транзита.

В димиктических озерах, к которым относится Ладожское озеро, дважды в год (весной и осенью) в условиях свободной конвекции происходит вертикальный перенос тепла и вещества. В период осеннего охлаждения интенсивное ветровое перемешивание и процесс конвективного теплопереноса достигают придонных горизонтов озера. В этих условиях речные первичные и трансформированные водные массы смешиваются с основной водной массой озера. Таким образом, внутригодовые особенности гидрофизической структуры поступивших в течение года в озеро вод приводят к изменению этих характеристик в ОВМ. Поскольку ее объем превышает 90% от общего объема озера, а с водами притоков ежегодно поступает лишь его двенадцатая часть, она является наиболее консервативной и обладает наибольшей однородностью. Поэтому изменения электропроводности ОВМ от года к году сравнительно невелики, однако они являются отражением масштабных процессов, которые существенно влияют на качественный состав воды озера. Причины, вызывающие эти изменения, связаны как с природными процессами, так и с антропогенным влиянием на озеро. Природные процессы обусловлены, прежде всего, многолетними колебаниями общей увлажненности бассейна, вызывающими изменение объемов суммарного речного притока в озеро и стока. При этом маловодные фазы внутривековых циклов увлажненности вызывают рост значений электропроводности ОВМ, а многоводные — их уменьшение. Антропогенное влияние является

результатом хозяйственной деятельности на водосборе, стока промышленных предприятий непосредственно в озеро, а также воздействия на атмосферные осадки (Крючков, 1992; Крючков, 2002). Указанные процессы отражаются на средних годовых значениях электропроводности ОБМ. В сорокадвухлетнем ряду наблюдений за этой характеристикой, представленном на рис. 4.7.4, можно выделить несколько периодов.

Первый период, с 1968 по 1980 г., характеризуется наибольшим увеличением значений УЭП за весь период наблюдений, которое составило 8,5%. Такой рост на 50% обеспечен маловодной фазой увлажнения 1960–1978 гг., а остальная его часть является результатом хозяйственной деятельности (Кириллова, Малинина, 1982; Крючков, 1992; Шнитников, 1966).

Второй период, с 1981 по 2000 г., отражает, прежде всего, снижение антропогенной нагрузки на водоем, начавшееся с середины восьмидесятых годов. В частности, в 1987 г. было остановлено производство на Приозерском целлюлозном заводе, стоки которого поступали в озеро. Поэтому, несмотря на то, что этот период включает полный цикл увлажнения, наблюдалось уменьшение роста значений УЭП основной водной массы озера по отношению к первому периоду. В первой половине этого периода, с 1981 по 1990 г., оно составило 5,0%, а во второй всего 2,2%.

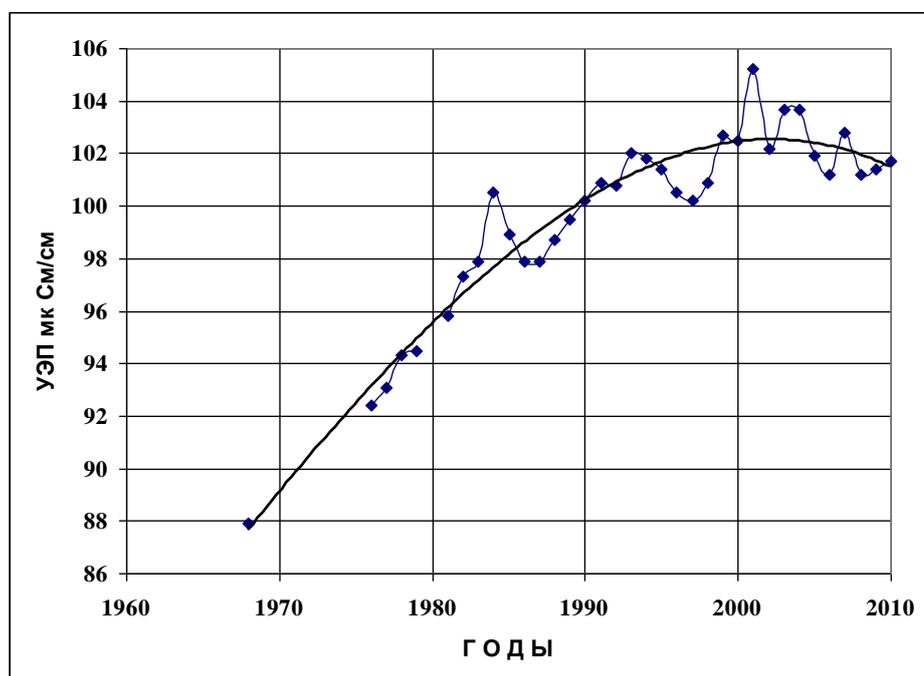


Рис. 4.7.4. Изменение электропроводности основной водной массы Ладожского озера в период с 1968 по 2010 г. (средние годовые значения УЭП на продольном разрезе озера).

Третий период, с 2001 г. по настоящее время, характеризуется прекращением роста электропроводности воды в озере, а с 2005 г. даже небольшим уменьшением ее значений (примерно на 1%). Вызвано оно началом многоводной фазы увлажнения на фоне сниженной

антропогенной нагрузки. Частично на это уменьшение могло повлиять сокращение в последние годы сроков ледостава и связанного с этим транзитного выноса воды реки Бурная в Неву, которое также вызывает снижение электропроводности ОВМ озера.

Таким образом, приведенные в настоящей главе материалы позволяют сделать вывод о том, что Ладожское озеро является типичным крупным димиктическим озером и имеет общие черты с аналогичными озерами мира.

Основными факторами, определяющими уровень режим озера, являются суммарный приток воды по рекам и сток реки Нева. Формирование уровня режима Ладожского озера в первую очередь связано с режимом атмосферных осадков, которые более чем в 2 раза превосходят величины испарения. За период инструментальных наблюдений выявлен отрицательный линейный тренд изменения среднемесячного уровня Ладожского озера.

Пространственно-временная изменчивость гидродинамических процессов (системы течений, волнения и др.) определяется взаимодействием поверхности воды и атмосферы, динамикой втекающих в озеро притоков, а также внутриводоемными процессами. В период ледостава течения в основном определяются режимом притоков и стока рек. Весной под воздействием ветра и формирующейся термической стратификации система течений имеет сложный характер с тенденцией к формированию генеральной циклонической циркуляции. В летний период стратификация в озере устойчива, поэтому в озере доминируют внутренние волны, струйные течения, а вертикальный обмен ниже слоя скачка ослаблен. Осенний период — это сезон максимальных скоростей ветра, в этот период особое значение приобретают апвеллинги. В прибрежной зоне наибольшие скорости течений приурочены к району устьев рек Свирь, Волхов, Вуокса; здесь же наблюдаются наибольшие пульсации течений.

В период нагревания озера во время существования термической фронтальной зоны (термобара) пространственное распределение температуры поверхности воды определяется распределением глубин. При этом гидрофизические и химико-биологические процессы зависят от прохождения термобара. На глубинах ниже 50 м в период с середины июня по начало октября практически не ощущается влияния межгодовой изменчивости температуры воды. В силу циклонической циркуляции в период развитой стратификации температура воды восточного берега обычно выше температуры воды западного берега.

В зимний период ледовый режим Ладожского озера во многом определяет термические и динамические характеристики на поверхности озера и в его толще. Выявлены основные фазы ледового режима и установлены связи их с температурой воздуха на основе многолетнего ряда дистанционных данных о покрытости льдом поверхности озера, оценены тренды в датах и продолжительности ледовых явлений.

Прозрачность воды Ладожского озера является регулятором проникновения света вглубь водной толщи. Сезонный ход прозрачности неоднороден в отдельных районах озера, особенно он ярко выражен в глубоководной части озера с минимумом в августе. Выявлены отрицательные тренды изменения прозрачности воды в Ладоге за период инструментальных наблюдений (до 2 см год⁻¹).

Глава 5. Гидрохимия

Химический состав воды Ладожского озера и его гидрохимический режим определяются поступлением веществ с водосбора, происходящими в озере гидрологическими процессами, функционированием озерной биоты. Одним из основных факторов, определяющих неоднородность лимнических процессов в разных частях акватории озера, является морфометрия озерной котловины. В связи с этим, гидрохимическая характеристика озера дается на основе морфометрического районирования по следующим зонам (Гусаков, Тержевик, 1992): прибрежной, деклинальной, профундальной и ультрапрофундальной (рис. 3.1.4).

5.1. Общая минерализация и ионный состав воды

Ладожское озеро характеризуется очень низкой минерализацией воды. Среди крупных озер России меньшее значение этого показателя имеет только вода Онежского озера. Основными причинами, определяющими малую минерализацию воды озера, являются климатические условия его бассейна, обеспечивающие хорошую промытость почв и грунтов, геологическое строение бассейна и состав пород, слагающих его. Ладожское озеро расположено в зоне избыточного увлажнения, большая часть его бассейна находится в пределах Балтийского кристаллического щита.

Водосборный бассейн Ладожского озера объединяет систему трех озер: озера Сайма, сток которого происходит по реке Вуокса (Бурная), Онежского озера, дающего начало реке Свирь, и озера Ильмень, из которого вытекает река Волхов. Сток этих рек формируется в основном за счет указанных озер.

Главная роль в формировании химического состава воды озера принадлежит речному стоку, который дает почти 85% приходной части водного и свыше 95% химического баланса озера (Алекин, 1953). Вынос химических веществ с водой рек в озеро можно рассматривать как интегральный показатель природных условий водосбора и хозяйственной деятельности на его территории. Поэтому минерализация воды озера ($60\text{--}65 \text{ мг л}^{-1}$) близка к средней минерализации воды трех главных притоков озера — рек Свирь, Бурная и Волхов, объем водного стока которых в сумме дает около 80% речного притока в озеро. Первые две реки очень слабо минерализованы, общая концентрация главных ионов ($\Sigma_{\text{и}}$) в них ниже, чем в озере, и равна $37,3 \text{ мг л}^{-1}$ для первой реки и $27,3 \text{ мг л}^{-1}$ для второй. Третий главный приток озера — река Волхов — имеет значительно более минерализованные воды, $\Sigma_{\text{и}} = 121,4 \text{ мг л}^{-1}$ (средневзвешенные концентрации по стоку) (Соловьева, 1967).

Общими чертами химического состава речных вод Ладожского бассейна являются невысокая минерализация, гидрокарбонатно-кальциевый состав, превышение сульфатных ионов над хлоридными. Химический состав воды рек определяется, с одной стороны, общностью основных климатических условий региона, с другой — неоднородностью геоморфологического строения, состава слагающих пород, различиями в составе и объеме подземной составляющей стока, озерностью и заболоченностью отдельных частей бассейна. Значительные нарушения в естественном гидрохимическом режиме рек происходят в результате хозяйственной деятельности человека. Различия геологического строения и состава пород, слагающих северную и южную части бассейна Ладожского озера, определяют региональную неоднородность минерализации и состава воды притоков озера.

Минимальной минерализацией воды характеризуются реки, водосборы которых сложены преимущественно кристаллическими породами Балтийского щита, перекрытыми толщей четвертичных отложений небольшой мощности. Основные типы почв здесь подзолистые. Сток рек характеризуется высокой степенью естественного и искусственного регулирования. Все это обуславливает низкую природную концентрацию большинства химических компонентов в их воде. Сюда относятся два главных притока — реки Свирь и Вуокса (река Бурная и северный рукав — река Вуокса), реки северного, северо-восточного и восточного побережья. К этой группе относятся реки Янисйоки, Уксунйоки, Тулемайоки, Видлица, Тулокса, Олонка. Минерализация воды в большинстве рек не превышает $50\text{--}60 \text{ мг л}^{-1}$.

Повышенная минерализация свойственна воде рек юго-восточного и южного побережья, водосборы которых сложены осадочными породами (реки Волхов, Паша, Оять, Сясь, Авлога). Наиболее высокой минерализацией воды выделяются реки Волхов и Сясь, средняя минерализация воды в них выше 100 мг л^{-1} , верхний предел достигает $200\text{--}300 \text{ мг л}^{-1}$ и более. Водосбор Волхова сложен мощной толщей четвертичных отложений, залегающей на палеозойских осадочных породах, зарегулированность стока невелика. Южная часть Ладожского водосбора (бассейны рек Волхов и Сясь) является наиболее развитой в хозяйственно-экономическом отношении. Сочетание природных и антропогенных факторов создает условия, при которых доминирующая роль в выносе многих химических веществ с речным стоком принадлежит Волхову.

Минерализация воды притоков Ладожского озера возрастает с севера на юг от $25\text{--}40$ до $200\text{--}300 \text{ мг л}^{-1}$ (межень), амплитуда сезонных изменений ее увеличивается в $3\text{--}5$ раз (табл. 5.1.1) (Соловьева, 1967, Расплетина и др., 2006).

Таблица 5.1.1

Пределы общей минерализации ($\Sigma_{\text{и}}$) в воде притоков Ладожского озера

Река	$\Sigma_{\text{и}}, \text{ мг л}^{-1}$
Северное и северо-западное побережье	
Иййоки	15,0–58,4
Мийнола	20,1–57,7
Тохмайоки	23,6–58,5
Янисйоки	19,4–37,0
Уксунйоки	11,2–34,8
Западное побережье	
Бурная	34,0–52,2
Вуокса	36,0–50,7
Хиитолан	26,6–68,8
Восточное и северо-восточное побережье	
Тулема	15,5–63,6
Видлица	31,3–40,3
Тулокса	12,3–34,6
Олонка	31,2–68,1
Свирь	31,3–52,5
Оять	27,2–136,2
Паша	36,1–179,6
Южное и юго-восточное побережье	

Сясь	79,9–290,9
Волхов	86,0–305,6
Лава	41,8–350,0
Назия	57,9–250,9
Юго-западное побережье	
Морье	40,6–64,0
Авлога	33,6–110,9

Косвенной характеристикой суммы ионов является электропроводность воды. Этот показатель, как правило, имеет прямую связь с минерализацией воды, что хорошо видно из данных табл. 5.1.2.

Таблица 5.1.2

Значения удельной электропроводности (УЭП) и общей минерализации ($\Sigma_{и}$) воды притоков Ладожского озера

Река	Сезон	УЭП, мкСм см ⁻¹	УЭП, мкСм см ⁻¹	$\Sigma_{и}$, мг л ⁻¹	УЭП, мкСм см ⁻¹	$\Sigma_{и}$, мг л ⁻¹
		2006 г.	2007 г.		2008 г.	
Свирь	лето	72,8	61,2	41,2	63,2	48,0
	осень	59,6	57,7	43,5	61,2	39,5
Бурная	лето	86,8	72,4	52,5	71,2	55,1
	осень	51,1	68,8	45,6	69,8	32,2
Волхов	лето	213	238	170	235	464
	осень	148	261	184	202	145
Паша	лето	215	133	111	122	112
	осень	51,9	65,7	59	48,4	35,3
Оять	лето	166	86,7	80,6	97,1	84,6
	осень	38,5	48,9	39,7	43,1	32,2
Сясь	лето	348	241	184	243	223
	осень	97,3	171	110	126	91
Янисйоки	лето	38,8	43	28,5	38,6	30,1
	осень	—	37,8	—	45	29,9
Олонка	лето	103,5	77,4	59,1	67,8	51,5
	осень	—	45,4	—	53	31,3
Морье	лето	—	—	69,3	—	—
	осень	—	146,1	—	64,5	31,5

Как отмечено выше, главная роль в формировании химического состава воды озера принадлежит речному стоку, который определяет величину его средней минерализации и является причиной пространственной неоднородности состава воды. В целом пределы колебания концентраций отдельных ионов в различных частях озера отличаются между собой незначительно, исключение составляют лишь воды Волховской и Свирской губ и некоторых районов западного побережья Ладожского озера.

Воды южного залива озера — Волховской губы, в которую впадают реки Волхов и Сясь, значительно отличаются от остальных районов более высокими верхними пределами концентраций компонентов состава воды. Что касается Свирской губы, в которую вносит свои воды река Свирь, имеющая менее минерализованные воды, чем озеро, ее химический режим очень неустойчив и зависит от ветровой обстановки. При штиле и ветрах восточных направлений здесь преобладают воды реки Свирь. При ветрах западной составляющей волховские воды, распространяющиеся в озере вдоль восточного побережья, попадают в Свирскую губу, значительно повышая минерализацию ее воды. На западном берегу на прибрежных станциях, находящихся под влиянием рек Бурная и Вуокса величины минерализации также иногда отличаются от среднего состава воды озера. В этих же районах периодически можно наблюдать и значительную вертикальную неоднородность состава воды озера, которая возникает под влиянием различных метеорологических условий. В качестве примера на рис. 5.1.1 приведены значения концентраций гидрокарбонатного иона на станциях, принадлежащих западному и восточному берегу и Волховской губе. Гидрокарбонатные ионы являются главным компонентом химического состава воды (> 50 экв. %) и поэтому являются лучшим индикатором распространения вод притоков в толще воды Ладожского озера. Среднее значение концентрации HCO_3^- в воде Ладожского озера составляет $31,5 \text{ мг л}^{-1}$.

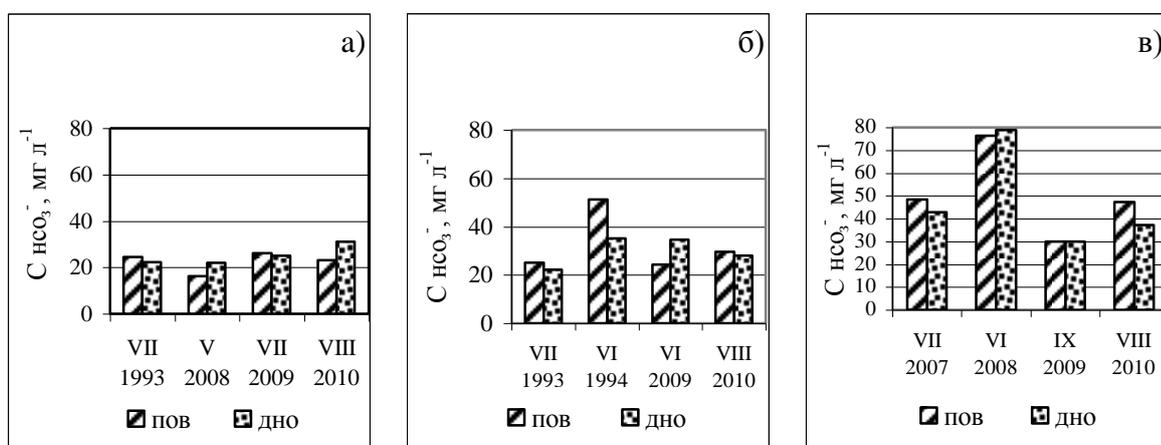


Рис. 5.1.1. Содержание гидрокарбонатного иона в различных частях Ладожского озера.
а) Содержание HCO_3^- на западном берегу Ладожского озера (близ реки Бурная).
б) Содержание HCO_3^- на восточном берегу Ладожского озера (Свирская губа).
в) Содержание HCO_3^- в Волховской губе (близ реки Волхов).

Как видно из рис. 5.1.1, содержание гидрокарбонатных ионов значительно варьирует на данных станциях, вертикальная стратификация очень неустойчива и может меняться на обратную.

Основная водная масса Ладожского озера обладает большой гидрохимической инертностью и сравнительной однородностью. Даже в большинстве заливов северной, шхерной части озера концентрации всех главных компонентов ионного состава воды мало отличаются от

озера. Одной из причин однородности состава воды Ладожского озера является низкое соотношение объемов притока и озера, которое составляет 1:13. Другой причиной малой изменчивости химического состава воды по акватории является большая динамичность водных масс. Помимо сезонных вертикальных циркуляций, охватывающих всю толщу воды, перемешивание воды осуществляется под воздействием постоянно действующего плотностного и периодически возникающих ветровых течений. Изменения химического состава воды по вертикали для большей части озера невелики (Расплетина и др., 1967).

Сравнительная однородность Ладожского озера позволяет произвести расчет среднего состава воды. Ниже, на рис. 5.1.2 и 5.1.3 приведены значения общей минерализации ($\Sigma_{и}$) и ионный состав основной водной массы Ладожского озера в 1960 г. и с 1990 по 2010 г. При определении основных компонентов ионного состава использовались преимущественно стандартные методики, широко применяемые на практике гидрохимических работ (Руководство..., 1977). Анализировалась нефльтрованная вода.

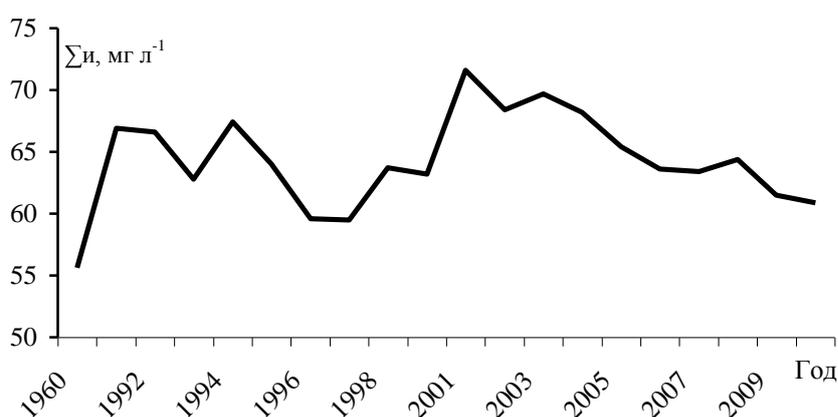


Рис. 5.1.2. Общая минерализация ($\Sigma_{и}$) воды Ладожского озера (1960–2010 гг.).

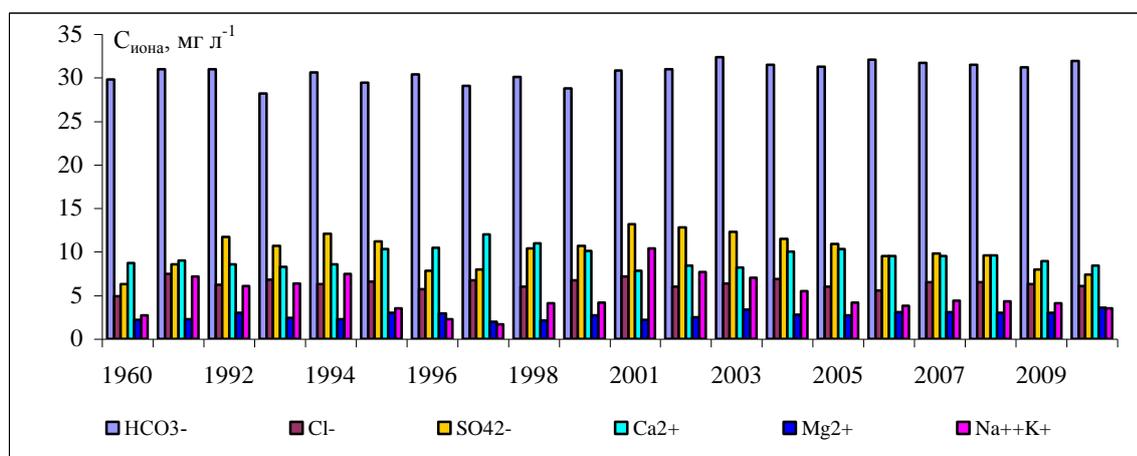


Рис. 5.1.3. Ионный состав основной водной массы Ладожского озера (1960–2010 гг.).

Как видно из рисунка 5.1.2, в 1960 г. величина средней минерализации была около 55 мг л^{-1} , в 1970-х – 1980-х гг. она имела тенденцию к повышению и в 1991–1998 гг. составляла в среднем $63,7 \text{ мг л}^{-1}$, т. е. возросла в 1,2 раза. Наибольшие значения минерализации были отмечены в 2001–2004 годах (до $71,6 \text{ мг л}^{-1}$), после чего наметилась тенденция к уменьшению до уровня 1990-х гг. Межгодовые изменения в концентрациях главных ионов, хорошо заметные на рисунке 5.1.3, по-видимому, связаны, с одной стороны, с колебаниями речного притока, а с другой — с антропогенным воздействием.

Антропогенное влияние на ионный состав воды Ладожского озера можно проследить по изменению соотношения между концентрациями основных ионов в разные годы. На рис. 5.1.4 хорошо заметно увеличение доли ионов Na^+ , K^+ , SO_4^{2-} и Cl^- в основном ионном составе воды озера в 2000-х гг. по сравнению с 1960 г., которое, безусловно, связано с хозяйственной деятельностью на территории водосбора. Наиболее заметный рост относительного содержания этих ионов был отмечен в 2001–2004 гг.

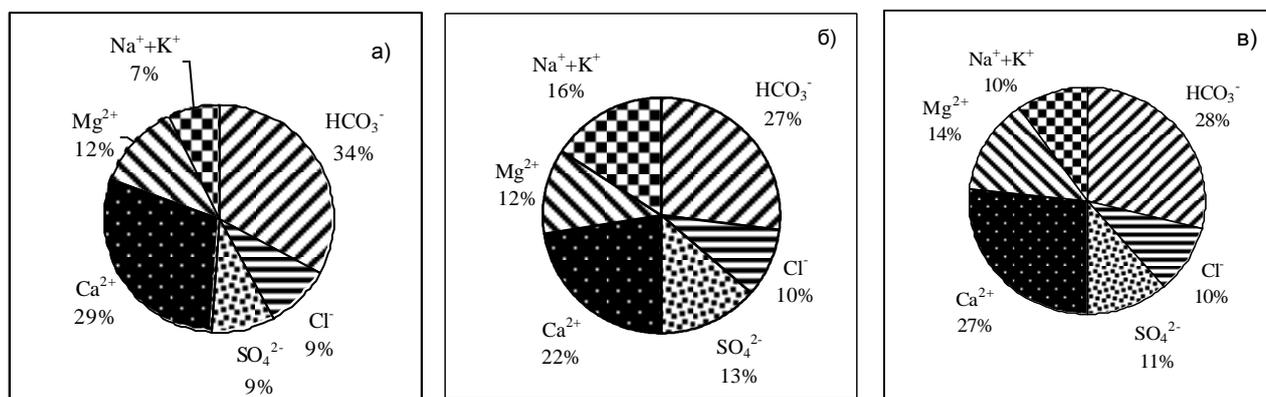


Рис. 5.1.4. Средний ионный состав воды Ладожского озера (экв. %) в разные годы а) 1960; б) 2001–2004; в) 2004–2009 гг.

Сделана попытка связать величину минерализации и среднегодовой уровень воды ($H_{\text{ср}}$ Б.С.) Ладожского озера (Догановский, 2006). На рис. 5.1.5 представлен многолетний ряд значений общей минерализации, удельной электропроводности и среднегодовой уровень воды Ладожского озера. Между величинами УЭП и Σ_n воды озера существует прямая пропорциональная зависимость, поэтому вместо значений общей минерализации могут быть использованы данные наблюдений за УЭП, поскольку их значительно больше, чем сведений об общей минерализации воды. На изменение минерализации (или УЭП)

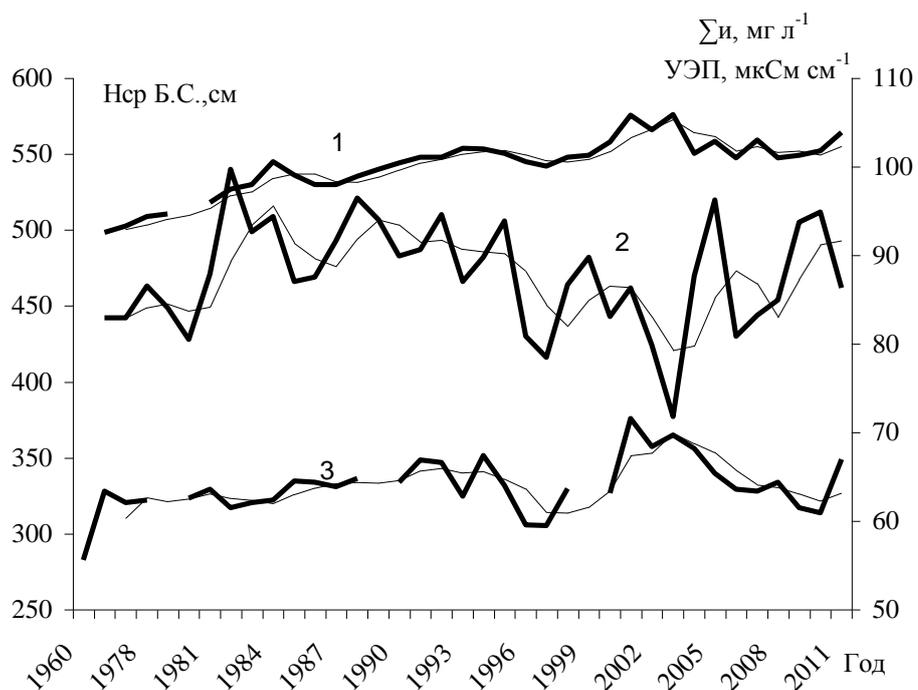


Рис. 5.1.5. Минерализация ($\Sigma_{и}$), удельная электропроводность (УЭП), среднегодовой уровень Ладожского озера (Нср Б.С.) и линии их тренда.
1 — УЭП; 2 — Нср; 3 — $\Sigma_{и}$

воды в озере влияют многолетние колебания речного притока, вызывая ее рост в маловодные фазы внутривековых циклов увлаженности и уменьшение в многоводные. Вследствие большой гидрохимической инертности озера изменение химического состава воды отстает от хода уровня воды, однако, обратнопропорциональная зависимость минерализации (или УЭП) от среднегодового уровня воды озера просматривается, особенно в период 2000–2011 гг.

5.2. Кислород и водородный показатель

Кислород. Главной чертой кислородного режима Ладожского озера, холодноводного димиктического водоема, является высокое содержание растворенного в воде кислорода в течение всего года. До конца 70-х гг. XX в. относительное содержание растворенного кислорода в глубоководной части озера по всему столбу воды было близко 100% насыщения (95–100%), в период летней температурной стратификации абсолютное содержание растворенного кислорода возрастало с глубиной. При этом пересыщение в трофогенном слое, обусловленное как процессами фотосинтеза, так и явлением гистерезиса при быстром прогреве воды, не превышало 110–120%. В гипolimнионе в течение всего лета относительное содержание

кислорода не опускалось ниже 95%, т. е. биохимические процессы деструкции органического вещества не играли заметной роли в расходовании растворенного кислорода.

К концу 1970-х гг. произошла перестройка озерной экосистемы в связи с нарушением соотношения продукционно-деструкционных процессов, вызванным развитием процесса эвтрофирования. Однако, несмотря на увеличение продуктивности озера, его кислородный режим еще оставался близким к наблюдавшемуся в 1960-х гг. Сезонная динамика этого показателя определялась в основном температурным режимом озера, хотя пересыщение воды кислородом наблюдалось чаще, чем в предыдущие годы и расширился диапазон колебания его относительных значений. Летом, в момент интенсивной фотосинтетической деятельности фитопланктона, в трофогенном слое относительное содержание кислорода могло достигать 120–130% насыщения, что на 10–20% больше, чем в предыдущий период. В гипolimнионе глубоководных зон в придонных горизонтах относительное содержание кислорода могло снижаться до 85–95%, что свидетельствовало о возросшей деструкции органического вещества в придонных горизонтах (Расплетина, 1982а).

С начала 1980-х гг. внутриводоемные процессы, связанные с трансформацией органического вещества, стали отражаться на кислородном режиме озера. Весной в теплоактивной области значения относительного содержания кислорода могли достигать 120–130%, что говорит об интенсивном процессе фотосинтеза (рН 8,0–8,6), в то же время в теплоинертной области относительное содержание кислорода в поверхностном слое воды могло снижаться до 90% насыщения и ниже, что ранее не наблюдалось. Летом относительное содержание кислорода в поверхностных слоях воды могло достигать еще больших значений — 130–135% насыщения (при значениях рН 8,6–9,3). В этот период впервые было отмечено летнее снижение относительного содержания кислорода до 85% в придонном горизонте по линии прохождения тридцатиметровой изобаты. Это снижение было связано с тем, что, вследствие существования весеннего термического бара, воды прибрежной зоны, обогащенные аллохтонным и автохтонным органическим веществом, не могут проникать в центральную часть озера. На границе фронта термобара за счет конвекции они опускаются в придонные слои, и органическое вещество вовлекается в придонные горизонты, где летом подвергается деструкции (Трегубова, Кулиш, 1987). Процесс снижения содержания кислорода в гипolimнионе продолжался до периода осеннего перемешивания водных масс.

С 1990-х гг. и до настоящего времени продолжают проявляться те же особенности кислородного режима Ладожского озера, которые впервые были отмечены в 1980-х гг. Однако в этот период даже при активном фотосинтезе относительное содержание кислорода в поверхностных слоях воды обычно не превышает 105–107%. Особенности кислородного

режима озера на современном этапе можно рассмотреть на примере 2007–2009 гг. (таблица 5.2.1).

Таблица 5.2.1

Пределы абсолютного (мг л⁻¹) и относительного (% насыщения) содержания кислорода в воде Ладожского озера в 2007 - 2009 гг.

Зона озера	Слой, м	мг л ⁻¹	%	мг л ⁻¹	%	мг л ⁻¹	%
		Весна		Лето		Осень	
2007 г.							
Прибрежная	0–дно	10,0–13,0	88–103	8,5–10,4	90–107	9,5–10,1	89–94
Деклиналичная	0–10	12,6–12,7	95–97	9,7–10,8	96–105	9,5–10,0	92–94
	10–дно	12,5–12,7	95–96	9,7–11,5	92–100	9,5–10,5	88–94
Профундальная	0–10	12,6–12,9	96	9,3–11,3	94–110	9,5–10,7	90–94
	10–дно	12,2–12,9	94–96	9,3–12,1	76–102	9,5–11,0	86–94
Ультра-профундальная	0–10	12,6	95	9,7–11,5	96–108	9,8–10,1	93–95
	10–дно	12,0–12,6	92–95	9,3–12,4	91–105	9,8–10,1	79–95
2008 г.							
Прибрежная	0–дно	8,5–11,8	87–112	6,7–9,2	79–102	10,5–11,2	94–98
Деклиналичная	0–10	11,9–12,4	98–102	9,5–9,9	97–109	10,8–12,2	96–99
	10–дно	11,8–12,4	94–102	9,5–11,3	91–97	10,8–12,1	96–99
Профундальная	0–10	12,5–12,8	97–99	9,5–11,5	97–105	10,8–10,9	96–97
	10–дно	12,5–12,7	97–99	10,1–12,3	93–103	10,8–11,7	89–98
Ультра-профундальная	0–10	12,7–12,8	95–98	—	—	11,1–11,7	96–98
	10–дно	12,2–12,7	94–98	—	—	11,1–12,3	93–100
2009 г.							
Прибрежная	0–дно	7,4–11,2	79–114	9,3–10,6	90–104	10,7–12,0	82–98
Деклиналичная	0–10	10,1–11,9	97–119	9,1–10,6	93–106	11,0–12,2	91–103
	10–дно	10,2–12,1	94–103	9,1–11,5	88–101	11,0–12,2	91–103
Профундальная	0–10	11,5–12,9	100–132	9,7–10,4	99–104	11,35	94–95
	10–дно	11,9–12,5	94–101	9,7–12,1	92–100	11,0–11,4	91–95
Ультра-	0–10	11,2–12,1	95–130	9,1–10,6	93–105	11,1–11,7	92–99

профундальная	10–дно	12,0–12,2	94–98	9,3–12,1	87–100	11,0–11,9	88–98
---------------	--------	-----------	-------	----------	--------	-----------	-------

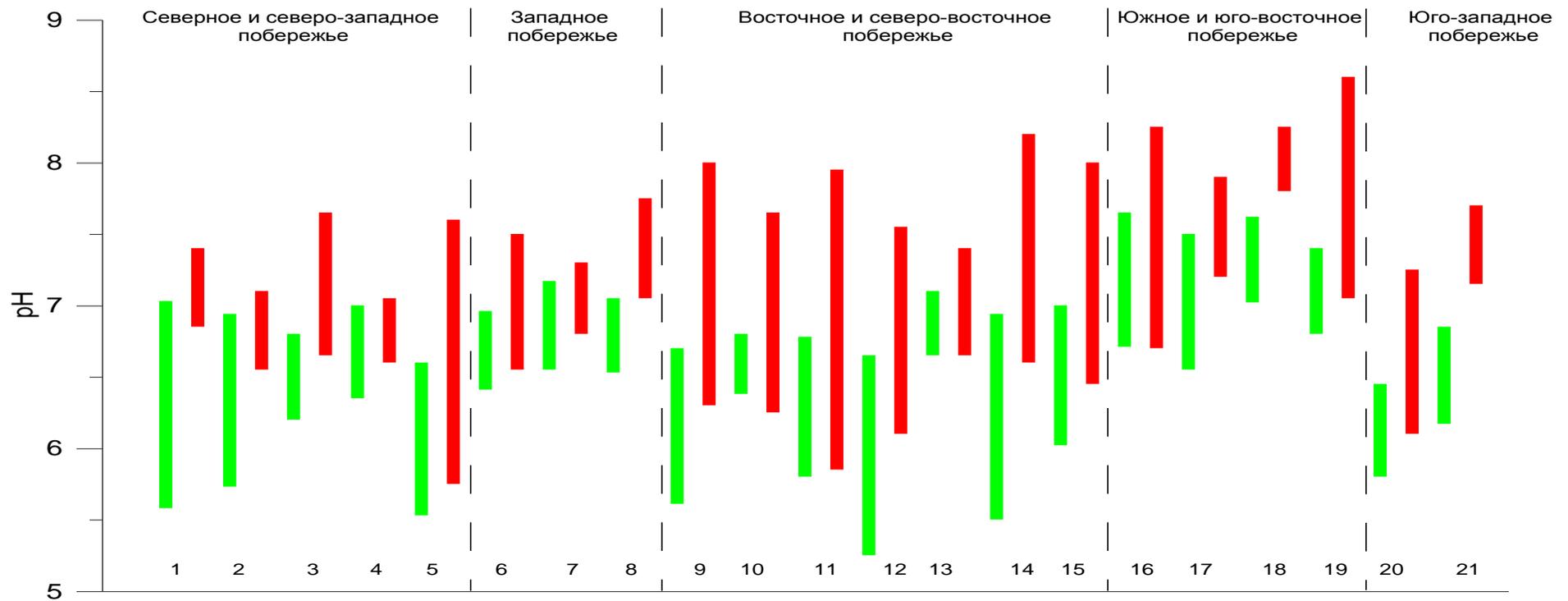
Весной в теплоинертной области относительное содержание кислорода по всему столбу воды составляет от 92 до 99% насыщения. Значительное пересыщение поверхностных слоев воды (114–132%), отмеченное весной 2009 г. практически на всех станциях отбора проб, объясняется явлением гистерезиса при быстром прогреве воды. При этом значение рН в поверхностном горизонте в основном не превышало 7,8–7,9, а абсолютное содержание кислорода находилось в тех же пределах, что и в предыдущие годы (2007 и 2008 гг.).

Летом, несмотря на достаточно активную фотосинтетическую деятельность фитопланктона (судя по значениям рН 7,90–8,10), относительное содержание кислорода в поверхностных слоях воды находится в пределах 79–110%, в гипolimнионе оно составляет 76–105%. Отчетливо выражено повышение абсолютного содержания кислорода по вертикали от поверхностных слоев воды к придонным.

Осенью, при установлении гомотермии, примерно до глубины 50 м содержание кислорода выравнивается и составляет 82–103% насыщения. В придонных слоях относительное содержание кислорода продолжает снижаться и в самой глубоководной части озера, на глубинах 150–200 м, составляет 79–100% насыщения.

В мелководных районах озера в течение всего периода наблюдений относительное содержание кислорода чаще всего однородно по вертикали. Пониженное содержание кислорода (75–94%) постоянно отмечается на участке вблизи устья реки Волхов, что обусловлено повышенным расходом кислорода на деструкцию органического вещества разного генезиса, в значительном количестве поступающего сюда с речными водами.

Водородный показатель (рН). Гидрохимические исследования, выполненные на реках ладожского водосбора в 2000–2005 гг., показали, что водородный показатель вод большинства притоков озера, в основном, находится в интервале значений, характерных для нейтральных вод (рис. 5.2.1).



1. Иийоки
2. Мийнола
3. Тохмайоки
4. Янисйоки
5. Уксунйоки

6. Бурная
7. Вуокса
8. Хиитолан

9. Тулема
10. Видлица
11. Тулокса
12. Олонка
13. Свирь
14. Оять
15. Паша

16. Сясь
17. Волхов
18. Лава
19. Назия

20. Морье
21. Авлога

Зеленые линии — амплитуды значений pH в 1959–1962 гг.

Красные линии — амплитуды значений pH в 2000–2005 гг.

Рис. 5.2.1. Амплитуды значений pH в периоды 1959–1962 гг. и 2000–2005 гг.

Река Свирь — один из главных притоков озера, типичная озерная река, и основные черты ее гидрохимического режима определяются режимом олиготрофного Онежского озера. Значение рН воды реки близко к нейтральному и изменяется от 6,55 до 7,40. Второй по водности и самой зарегулированной рекой ладожского водосбора является река Вуокса (Бурная). Она делится на два рукава — основной южный, в нижнем течении называемый рекой Бурная, и северный, впадающий в Ладожское озеро в районе г. Приозерск. Значение рН воды близко к значениям, отмеченным для реки Свирь, наибольшие значения (7,5) связаны с фотосинтетической деятельностью фитопланктона в озеро-речной системе. Воды реки Волхов по химическому составу отличаются от вод двух других главных притоков озера более высокой минерализацией и широкой амплитудой ее колебания. Значение рН в течение года меняется от 7,2 до 7,9 при отсутствии отчетливого сезонного хода. Водам малых западных, северо-западных и северных притоков (Хиитолан, Иийоки, Мийнола, Тохмайоки, Янисйоки, Уксунйоки) свойственна нейтральная реакция среды. Верхний предел значения рН для большинства рек не превышает 7,5. Во время паводков, особенно весеннего, значение рН снижается: в реках с преобладанием озерного питания — до 6,5–6,6, а в реках с заболоченными бассейнами и слабозарегулированным стоком — до 5,7. Малые притоки восточной части бассейна Ладожского озера (реки Тулема, Видлица, Тулокса, Олонка) также характеризуются нейтральной реакцией (в среднем), несмотря на сильную заболоченность их водосборов. В межень рН воды может существенно возрастать, достигая 7,6–8,1, во время паводков в реках Олонка и Видлица рН снижается до 6,1–6,2, а в Тулоксе до 5,8. Водосборы восточных и юго-восточных притоков (реки Паша, Оять, Сясь) характеризуются низкой озерностью, слабой зарегулированностью стока, высокой заболоченностью. Несмотря на то, что вода притоков отличается высокими значениями минерализации и гидрокарбонатности (особенно во время межени), значения рН достаточно низкие (в среднем 7,5), но в период межени рН может повышаться до 8,0 и выше. Малые притоки южного побережья (реки Лава, Назия) также характеризуются высокой минерализацией, что обуславливает слабощелочную реакцию их вод и высокие значения рН в межень.

На диаграммах, построенных на основе результатов гидрохимических исследований, проведенных в 1960-х и в 2000–2005 гг. (Соловьева, 1967, Расплетина и др., 2006) (рис. 5.2.1), хорошо видны изменения как в абсолютных величинах, так и в амплитудах значений рН, произошедшие за последние 50 лет. Процесс эвтрофирования характерен для всех притоков, что видно по увеличившимся минимальным, средним и максимальным значениям рН. Наименьшие изменения в значениях рН отмечены в реках Янисйоки, Вуокса, Бурная, Свирь, что объяснимо их зарегулированностью системой озер и плотин и высокими расходами воды. Кроме того, водосбор Янисйоки характеризуется незначительной освоенностью. Водам

северных малых притоков от Хиитолан до Олонки в 1960-е гг. была свойственна слабокислая реакция, верхние пределы значений рН практически не превышали 7,0. В настоящее время значения рН вод большинства малых притоков сильно возросли, что позволяет классифицировать их воды как нейтральные.

Наибольшие изменения произошли в реках восточного и северо-восточного побережья (реки Тулема, Тулокса, Олонка, Оять, Паша), в малых реках северного и северо-западного (Иийоки и Уксунйоки), южного и юго-западного побережий (реки Лава, Назия, Морье и Авлога), что является следствием высокой антропогенной нагрузки на их водосборы. Процесс антропогенного эвтрофирования наиболее заметен на малых реках вследствие их большей уязвимости.

Значения рН воды Ладожского озера близки наблюдаемым в других крупных олиготрофных озерах, имеющих значительные глубины, и могут считаться характерными для этого типа озер. Так, например, в озере Байкал рН в поверхностных слоях воды находится в пределах 7,4–8,1, в придонных слоях — 7,0–7,1, в озере Телецкое рН изменяется от 7,3 до 7,6 (Расплетина и др., 1967).

В течение 2005–2009 гг. значение рН воды Ладожского озера изменялась в пределах 6,7–9,0, при преимущественных значениях 7,30–7,60. Если в 1980-х гг. значения рН в период развития фитопланктона в трофогенном слое часто достигали 8,5 и более, при нижней границе 7,3–7,4, то в 2006–2008 гг. даже в период интенсивного развития фитопланктона рН редко превышало 8,0. Только в конце июля 2005 г. на отдельных участках озера значение рН в поверхностных слоях воды достигало 8,4, при 7,3–7,8 в остальной водной массе. В 2006 г. в ходе полевых исследований в летний период значение рН, превышающее 8,0, встретилось 6 раз, (максимальное значение 8,6), а в 2007–2008 гг. — 5 раз, при этом максимальное значение рН не превышало 8,1. Такое снижение максимальных значений рН в летний период связано с пониженными величинами средней биомассы фитопланктона в 2007 и 2008 гг. по сравнению с 2006 г. Так, величина биомассы фитопланктона в 2006 г. была примерно в 1,5 раза больше, чем в 2008 г. В феврале 2009 г. значение рН воды было наиболее низким и изменялась от 6,7 до 7,0, в начале мая рН увеличилось до 7,4–7,5. В июне рН изменялось от 6,95 до 9,0 при преимущественных значениях 7,2–7,4. Максимальные значения рН отмечались преимущественно в озерной части южного района (Волховская губа) и в центральном районе в поверхностных слоях воды в летний период, что связано, вероятно, с интенсивным развитием фитопланктона. Наибольшие значения рН наблюдались на участках, подверженных влиянию рек Бурная и Вуокса. В осенний период значения рН были практически постоянными от поверхности до дна и находились в пределах 7,1–7,4. В целом, значения рН укладываются в

пределы, характерные для различных сезонов для крупного глубоководного низкопродуктивного озера.

5.3. Биогенные элементы

Гидрохимические исследования Ладожского озера и его притоков, включающие изучение режима биогенных элементов, проводились Институтом озероведения РАН в 1959–1961 гг. и с 1976 г. по настоящее время, и их результаты были подробно изложены в ряде публикаций (Соловьева, 1967; Расплетина и др., 1967, 1987, 2002, 2006; Антропогенное эвтрофирование..., 1982; Современное состояние..., 1987; Ладожское озеро..., 1992; Расплетина, Сусарева, 2002; Расплетина, 2004). Исследования на реках северной части водосбора озера выполнялись также Институтом водных проблем Севера КарНЦ РАН (Харкевич, 1964; Курапцева, 1980; Лозовик, 1998, 2006). С начала 1990-х гг. и по настоящее время наблюдения на реках выполнялись недостаточно регулярно и не охватывали все гидрологические сезоны, поэтому оценку выноса биогенных элементов с речным стоком в эти годы можно рассматривать только как ориентировочную. При расчете поступления веществ в озеро с речным притоком использовались данные Росгидромета о расходах воды. В последние годы в связи с недостаточным количеством наблюдений на реках рассчитать величину поступления биогенных элементов в озеро не представляется возможным.

Соединения фосфора. Фосфор – важнейший биогенный элемент, формирующий уровень первичной продукции в водоеме. Содержание фосфора в воде озера зависит от поступления его с водосбора и протекающих в озере внутриводоемных процессов.

Концентрации форм фосфора в воде определялись в соответствии с методиками, разработанными Союзом стандартизации Финляндии (SFS): неорганический фосфор (IP) — спектрофотометрическим модифицированным молибдатным методом Мерфи и Райли с использованием аскорбиновой кислоты в качестве окислителя (SFS 3025); общий фосфор (TP) — окислением органических соединений фосфора персульфатом калия в присутствии серной кислоты с последующим определением фосфатов (SFS 3026).

Поверхностные воды бассейна в их естественном состоянии содержат мало фосфора, так как коренные породы, рыхлые отложения и подзолистые почвы, слагающие ладожский водосбор, бедны его соединениями. Особенно малы концентрации фосфора в области развития кристаллических пород. Однако хозяйственная деятельность на территории водосбора озера привела к росту содержания фосфора в воде рек. Данные о содержании общего фосфора в воде рек в 2001–2011 гг. приведены в табл. 5.3.1.

Таблица 5.3.1

Пределы концентраций общего фосфора (мкг Р л^{-1}) в воде основных притоков Ладожского озера и в истоке реки Нева в 2001–2011 гг.

Река	2001–2003	2004	2005	2006	2007	2008	2011
Волхов	28–122	116–123	135–334	95–380	75–76	58–75	57–83
Бурная	14–31	14–19	13–17	15–23	15–17	13–15	17–50
Свирь	18–28	21–32	14–22	14–28	18–60	16–28	24–36
Паша	28–40	46–79	29–34	16–33	37–38	41–45	28–63
Оять	21–63	58–82	48–50	19–40	52–54	51–60	46–57
Сясь	22–46	67–101	40–60	19–47	55–64	48–65	55–59
Янисйоки	14–22	20–31	15–16	15	12–21	17–29	42–52
Олонка	54–140	82–117	97–116	100	101–124	110–144	109–360
Тулокса	38–125	94–142	92–116	—	83–107	—	91–118
Видлица	38–72	49–63	37–40	—	35–97	—	30–53
Тулемайоки	14–30	17–29	17–19	—	16–31	—	20–43
Нева	14–25	19–22	12–14	10–18	12–14	12–13	17–23

Притоки Ладожского озера можно разделить на три группы, отличающиеся по содержанию фосфора в их воде (Расплетина и др., 2006). К первой группе относятся реки, концентрация общего фосфора в воде которых, как правило, не превышает $50\text{--}60 \text{ мкг Р л}^{-1}$, а чаще бывает ниже $30\text{--}40 \text{ мкг Р л}^{-1}$. Это реки Свирь, Бурная, Янисйоки, Тулемайоки, Видлица. Вторая группа включает реки с содержанием общего фосфора в воде, преимущественно, в диапазоне $80\text{--}140 \text{ мкг Р л}^{-1}$, причем минимальная концентрация может составлять $15\text{--}40 \text{ мкг Р л}^{-1}$. К этой группе относятся реки восточного побережья — Тулокса и Олонка, и притоки юго-восточного побережья — Паша, Оять и Сясь. Повышенные концентрации общего фосфора в воде рек второй группы, очевидно, обусловлены значительной сельскохозяйственной освоенностью территории, особенно бассейнов Олонки и Тулоксы. Фосфор в воду этих рек поступает в основном от рассеянных антропогенных источников.

Наибольший антропогенный пресс испытывают малые реки южного и юго-западного побережья — Назия, Морье и особенно Авлога. Содержание общего фосфора в воде реки Морье в 2001–2005 гг. изменялось от 90 до 275 мкг Р л^{-1} , реки Авлога — от 335 до крайне высоких

значений — 3250 мкг Р л⁻¹, максимальные концентрации отмечались в 2001 г. В 2007 г. концентрации общего фосфора в воде рек Морье и Авлога снизились до 80–100 мкг Р л⁻¹ и 380–484 мкг Р л⁻¹, соответственно. В 2011 г. концентрация общего фосфора в реке Морье осталась на уровне 2007 г. (78–144 мкг Р л⁻¹), в реке Авлога снизилась до 258–347 мкг Р л⁻¹, в реке Назия она составляла 91–121 мкг Р л⁻¹.

Вода реки Волхов всегда отличалась повышенным содержанием фосфора и была главным источником его поступления в озеро с водосбора. Это обусловлено как особенностями природных условий бассейна, так и наиболее развитым хозяйством в южной части Ладожского водосбора. Наиболее высокие концентрации общего фосфора наблюдались в воде Волхова в конце 70-х – середине 80-х годов XX в. Со второй половины 1980-х гг. содержание фосфора в реке снизилось и в 2000–2004 гг. составляло 45–160 мкг Р л⁻¹. В 2005 г. активизировалась деятельность ОАО «Волховский алюминий», что привело к повышению содержания общего фосфора в воде Волхова осенью 2005 г. и летом 2006 г. до 334–380 мкг Р л⁻¹. С декабря 2006 г. содержание общего фосфора в сточных водах ОАО «Волховский алюминий» существенно снизилось и составило в конце 2006 и в 2007 г. 10–30 мкг Р л⁻¹ против 400–500 мкг Р л⁻¹ в 2005–2006 гг. В результате содержание общего фосфора в воде Волхова уменьшилось до значений 2000–2004 гг. и в 2007–2011 гг. изменялось в пределах 57–83 мкг Р л⁻¹.

Анализ многолетнего ряда наблюдений на притоках Ладожского озера показал, что в содержании фосфора в воде рек, а, следовательно, поступлении его в озеро, произошли существенные изменения, связанные с антропогенным воздействием на его водосбор. В начале 1960-х гг., когда антропогенное воздействие на водосбор было небольшим, вынос фосфора в озеро с водой притоков был близок 1,8 тыс. т Р год⁻¹. Интенсификация хозяйственной деятельности на водосборе привела к резкому увеличению поступления фосфора в озеро с водой рек. В результате, в конце 1970-х – начале 1980-х гг. оно составляло 6–7 тыс. т Р год⁻¹ и приблизилось к расчетному «критическому» уровню для Ладожского озера (Расплетина, Гусаков, 1982; Гусаков, 1987). Проведение водоохраных мероприятий на водосборе Ладожского озера в 1980-х гг. и снижение антропогенного пресса на территорию в 1990-х гг. способствовало тому, что, начиная с 1992 г. происходило снижение поступления фосфора и с 1996 по 2003 г. оно составляло 2,4–3,9 тыс. т Р год⁻¹. В 2004–2005 гг. его поступление снова выросло до почти 5 тыс. т Р год⁻¹ и приблизилось к значениям начала 1990-х гг. С 2006 г. поступление фосфора вновь снижается и колеблется в пределах 2,5–3 тыс. т Р год⁻¹ (рис. 5.3.1).

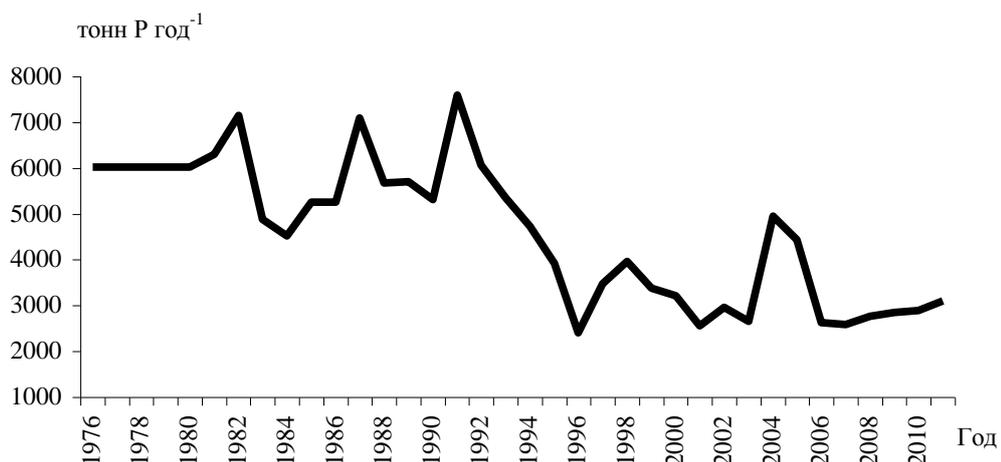


Рис. 5.3.1. Поступление общего фосфора в Ладожское озеро с речным стоком.

На поступление общего фосфора в озеро с речным притоком оказывает влияние водность года (рис. 5.3.2). Вынос фосфора был наименьшим в 1996 г. Этот год характеризовался не только крайне низкой водностью, но и минимальным водным стоком реки Волхов (Расплетина и др., 2002). В многоводные 2004 и 2005 гг., напротив, поступление общего фосфора с водой рек приближалось к значениям начала 1990-х гг. Однако это обусловлено не только высокой водностью года, но и повышенными концентрациями фосфора в воде Волхова и ряда рек собственного водосбора (табл. 5.3.1). Основной вклад в бюджет фосфора Ладоги вносят реки Волхов (40–64%), Свирь (10–26%) и Бурная (7–23%), чему способствует их значительная роль в объеме речного притока. Остальные реки водосбора дают около 13–19% фосфора (рис. 5.3.2). С водами Невы из озера выносятся около 40% фосфора, поступающего с речным стоком.

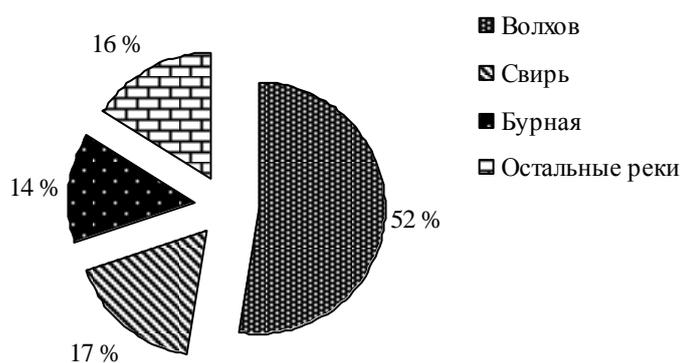


Рис. 5.3.2 Вклад притоков в общее поступление фосфора в Ладожское озеро с речным стоком (средний % за период 1976–2005 гг.).

Внешняя фосфорная нагрузка на Ладожское озеро складывается из поступления фосфора с речным стоком, с атмосферными осадками, со сточными водами предприятий,

сбрасываемыми непосредственно в озеро, и из рассеянных источников. Доля речного стока в общем выносе фосфора в озеро составляет 85–95% и определяет величину внешней фосфорной нагрузки. В 60-х годах XX в. внешняя фосфорная нагрузка составляла $0,14 \text{ г Р м}^{-2} \text{ год}^{-1}$ (Расплетина и др., 1967), в конце 1970-х – начале 1980-х гг. она выросла до $0,38\text{--}0,45 \text{ г Р м}^{-2} \text{ год}^{-1}$, что приближалось к «критической» величине для Ладожского озера — $0,42 \text{ г Р м}^{-2} \text{ год}^{-1}$ (Расплетина, Гусаков, 1982). В дальнейшем фосфорная нагрузка на озеро снижалась. В 1996–2003 гг. она составляла $0,16\text{--}0,23 \text{ г Р м}^{-2} \text{ год}^{-1}$, что соответствует допустимому уровню нагрузки, свойственной мезотрофным водоемам. В многоводные 2004–2005 гг. величина фосфорной нагрузки опять возросла до значения $0,25\text{--}0,29 \text{ г Р м}^{-2} \text{ год}^{-1}$. К настоящему времени она приближается к уровню 1960-х гг. (рис. 5.3.3).

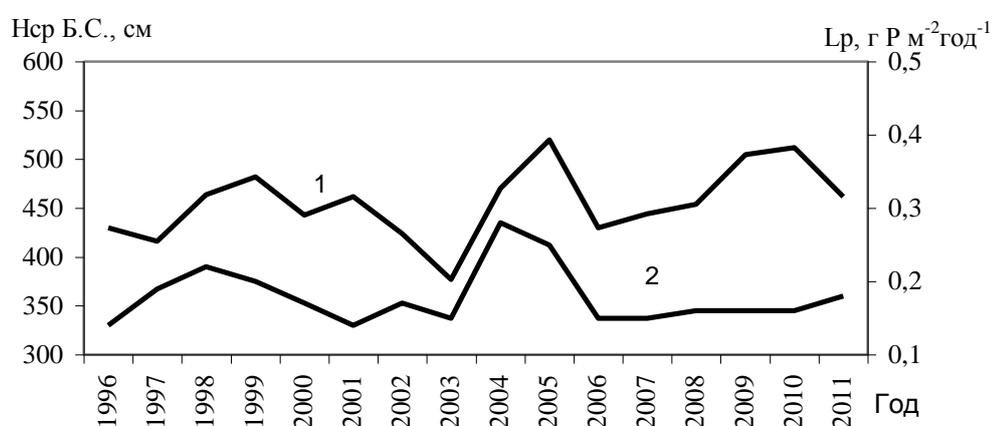


Рис. 5.3.3. Внешняя фосфорная нагрузка (Lp) на Ладожское озеро и среднегодовой уровень воды (Нср) в озере: 1 — среднегодовой уровень воды, 2 — внешняя фосфорная нагрузка.

Доля неорганического фосфора от его общего содержания изменяется в водах рек в широких пределах от 10–20% до 70–80% и более. Минимальные концентрации неорганического фосфора отмечаются в реках озерного питания — Свири, Бурной, Янисйоки, а также в истоке реки Нева (табл. 5.3.2).

Таблица 5.3.2

Пределы концентраций неорганического фосфора (мкг Р л^{-1}) в воде основных притоков Ладожского озера и в истоке реки Нева в 2000–2011 гг.

Река	2000–2005	2007	2008	2011	2012
Волхов	8–300	57–60	44–60	36–42	40–76
Бурная	1–20	4–5	3–8	4–6	7–10
Свирь	2–55	5–6	11–17	4–21	6–8
Паша	2–46	18	24–26	16–41	20–31
Оять	1–51	30–36	38–41	28–33	31–40

Сясь	1–60	35–41	29–41	29–34	47–52
Янисйоки	1–15	5–6	6–16	5–13	7–12
Олонка	30–85	72–100	86–140	64–79	66–79
Тулокса	20–92	51–74	—	40–81	59–87
Видлица	1–37	14–43	—	15–27	21–22
Тулемайоки	3–8	5–12	—	7–9	21–22
Нева	< 0,5–12	4–5	1–4	0,3–6	5–7

В начале 60-х гг. прошлого века Ладожское озеро было олиготрофным водоемом, низкое содержание фосфора в котором лимитировало развитие фитопланктона. Концентрация неорганического фосфора в воде озера изменялась от 1 до 25 мкг Р л⁻¹ при среднегодовом содержании 3 мкг Р л⁻¹, среднее содержание общего фосфора составляло 10 мкг л⁻¹ (Расплетина и др., 1967; Расплетина, Гусаков, 1982). Избыточное поступление фосфора в Ладожское озеро с конца 1960-х гг. от антропогенных источников привело к резкому увеличению его содержания в воде и перестройке озерной экосистемы. Максимальные концентрации ТР в воде озера наблюдались в 70-х гг. прошлого века. В дальнейшем, в результате снижения поступления фосфора, уменьшилась и концентрация его в воде водоема. Если в среднем за 1976–1980 гг. содержание общего фосфора в воде озера было равно 26 мкг Р л⁻¹, то уже с начала 1980-х гг. было отчетливо выражено снижение его концентраций.

В первой половине 1980-х годов средняя концентрация общего фосфора была на уровне 23–24 мкг Р л⁻¹, в 1988–1992 гг. — 20–21 мкг Р л⁻¹, затем происходит дальнейшее снижение до 16–18 мкг Р л⁻¹. Исключением стали 1999–2000 гг., когда повышенные концентрации фосфора наблюдались практически по всей акватории в летний период (Расплетина, Сусарева, 2002). В 2001–2006 гг. средняя за период открытой воды концентрация общего фосфора в озере составляла 14 мкг Р л⁻¹. Наибольшее среднее значение (17 мкг Р л⁻¹) отмечалось в 2001 г., далее средняя концентрация ТР в весенне-летний период составляла 13–14 мкг Р л⁻¹. С начала 2005 г. резко возросла концентрация общего фосфора в воде реки Волхов (до 350 мкг Р л⁻¹), следствием чего явилось небольшое повышение его концентрации в воде озера в 2005–2006 гг. К осени 2006 г. концентрация ТР в воде Волхова снизилась до значений 2003 г., результатом этого явилось снижение среднего содержания ТР в озере. В 2007 и 2009 гг. среднее значение концентрации ТР опустилось до 11 мкг Р л⁻¹, что остается минимальным для всего периода наблюдений с 1976 г. (рис. 5.3.4).

Одновременно с общей тенденцией снижения содержания фосфора в воде озера сузились и пределы изменения его концентраций. Если в 1976–1980 гг. минимальные концентрации

отличались от максимальных почти в 20 раз (Расплетина, Сусарева, 2002), то в 2001–2005 гг. разница между ними сократилась до 2–4 раз. По данным 2007–2010 гг., в воде глубоководных зон разница между максимальными и минимальными значениями ТР обычно составляет 5–8 мкг Р л⁻¹ и менее.

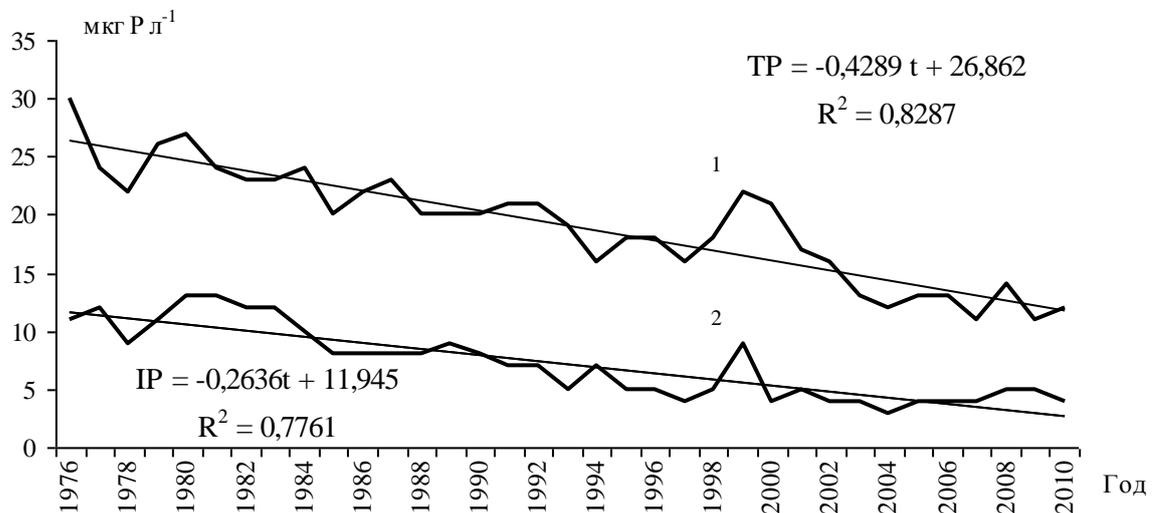


Рис. 5.3.4. Тенденции изменения средних за период открытой воды концентраций общего (ТР) и неорганического (IP) фосфора в воде Ладожского озера: 1 — концентрация общего фосфора, 2 — концентрация неорганического фосфора; t — год.

Изменение концентрации общего фосфора по акватории определяется как неоднородностью его поступления с водосбора, так и гидротермодинамическими условиями в озере. Средние за период открытой воды концентрации общего фосфора в воде различных лимнических зон озера за последние годы представлены на рис. 5.3.5.

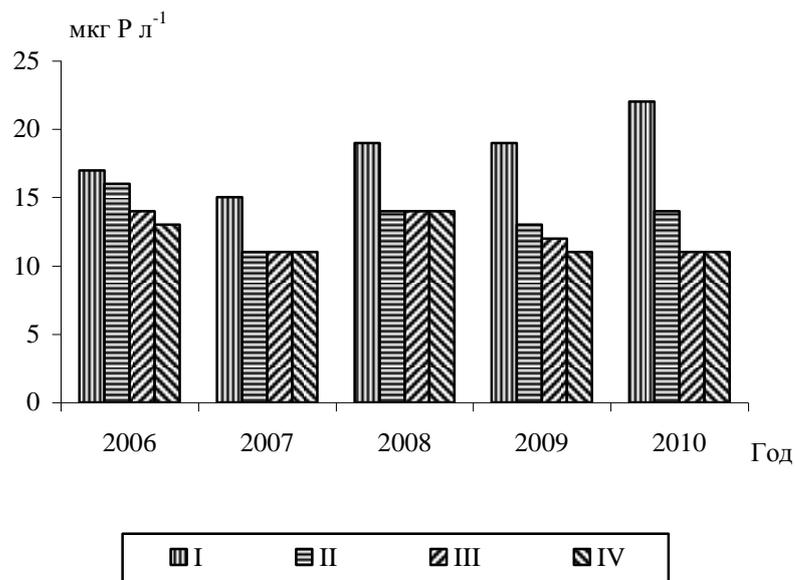
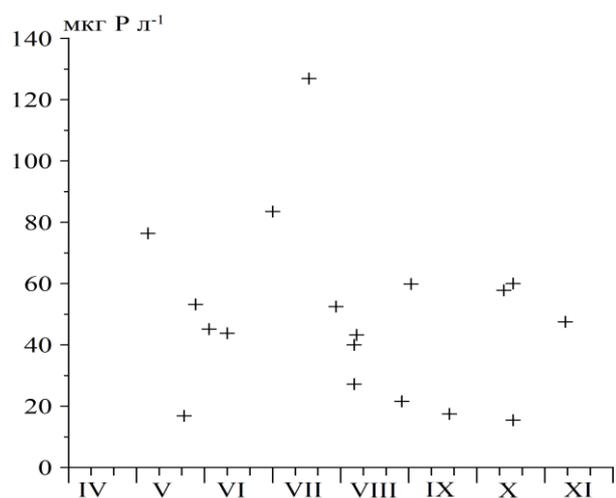


Рис. 5.3.5. Средние за период открытой воды концентрации общего фосфора в воде различных лимнических зон озера: I — прибрежная зона, II — деклинальная зона, III — профундальная зона, IV — ультрапрофундальная зона.

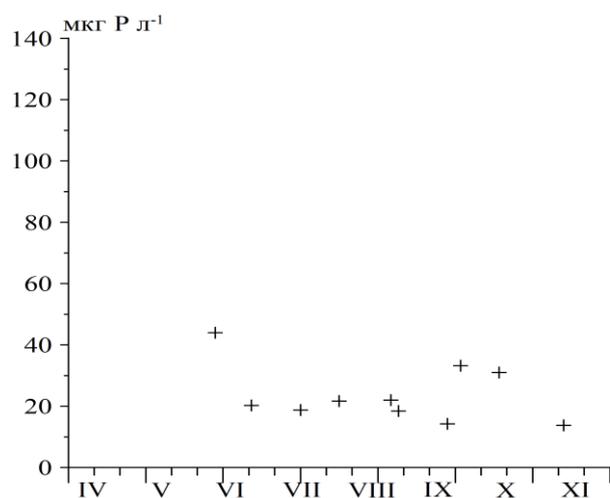
Наибольшие концентрации фосфора отмечаются в воде прибрежной зоны, находящейся под прямым влиянием притоков. Максимальные значения свойственны Волховской губе, куда поступают обогащенные фосфором воды рек Волхов и Сясь (рис. 5.3.6, а), и отдельным участкам деклинальной зоны. В 70-х гг. прошлого века максимальные концентрации ТР в Волховской губе достигали 180–260 мкг Р л⁻¹, затем они снизились до 100–150 мкг Р л⁻¹. В течение последнего десятилетия максимальная концентрация фосфора в Волховской губе (137 мкг Р л⁻¹) наблюдалась в начале июля 2005 г. в связи со значительным повышением содержания фосфора в воде реки Волхов, по данным 2006–2010 гг. содержание фосфора здесь не превышает 60–80 мкг Р л⁻¹.

Величина концентрации фосфора в Волховской губе определяется сезонными факторами: весной — положением термического бара, и во все сезоны — гидросиноптической обстановкой в озере. При ветрах северного направления Волховская губа заполняется водами глубоководной части озера, и концентрации фосфора мало отличаются от среднеозерных, при ветрах южных направлений концентрации зависят от влияния вод притоков, в первую очередь, Волхова. В 2007 г., в период ранней гидрологической весны, когда термический бар находился в непосредственной близости от устья реки Волхов, здесь наблюдалась высокая концентрация общего фосфора, равная 80 мкг Р л⁻¹. В Свирской губе также часто отмечаются повышенные концентрации общего фосфора, диапазон которых достаточно широк (рис. 5.3.6, б). На станциях

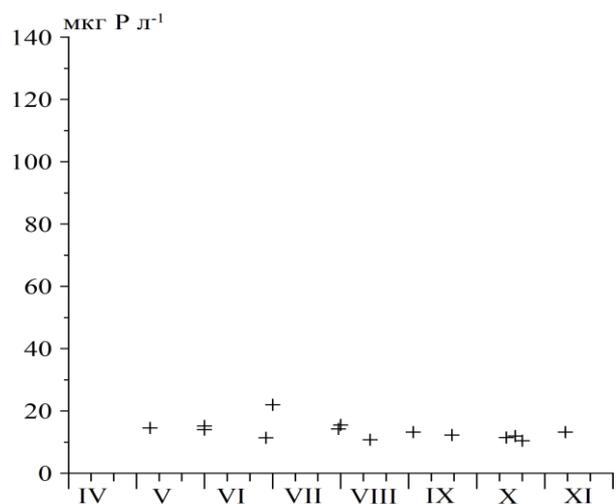
прибрежной зоны вдоль западного берега концентрации общего фосфора ниже, и их пространственно-временная изменчивость невелика (рис. 5.3.6, в). Среднее содержание общего фосфора в деklinальной зоне ниже, чем в прибрежной, но в 1,1–1,3 раза превышает его концентрации в глубоководных зонах, при этом диапазон концентраций сужается (рис. 3.5.6, г). Иногда наблюдается распространение вод реки Волхов с повышенным содержанием фосфора в поверхностном слое воды деklinальной и частично профундальной зон на обширных участках южной и центральной частей озера, на юго-западе почти до бухты Петрокрепость (Расплетина и др., 2002). Профундальная и ультрапрофундальная зоны составляют около 80% объема озера, поэтому, естественно, средняя концентрация фосфора в воде этих зон определяет среднее содержание в воде озера в целом. Диапазон концентраций TP отличается здесь наименьшей изменчивостью, средние за период открытой воды значения в 1980-х гг. находились в пределах 18–24 мкг P л⁻¹, в 1990-х — 15–21 мкг P л⁻¹, после 2000 г. — 11–15 мкг P л⁻¹ (рис. 5.3.6, д, е).



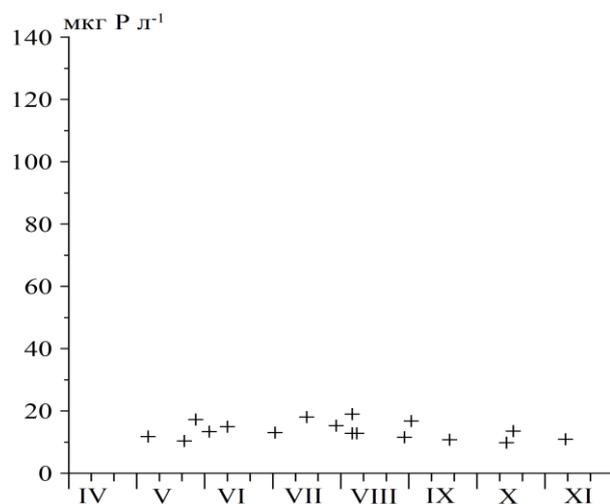
а)



б)



в)



г)

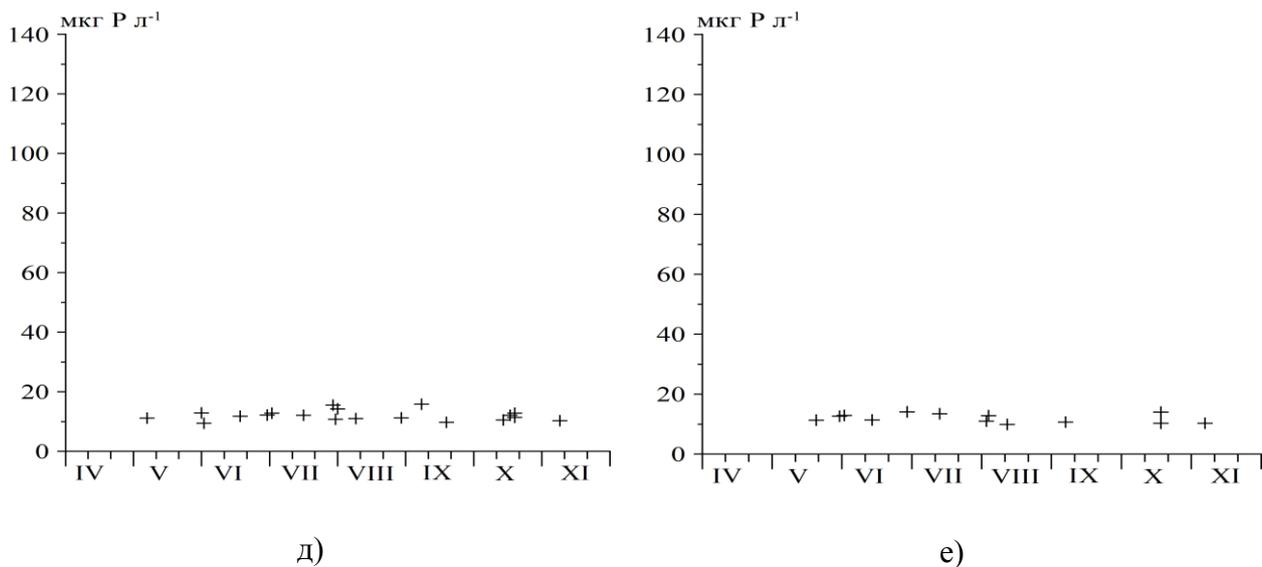


Рис. 5.3.6. Средние концентрации общего фосфора на станциях в различных частях озера с мая по ноябрь (данные за 2005–2011 гг.): а — Волховская губа, б — Свирская губа, в — вблизи устья реки Бурная (западный берег), г — южная часть деклинальной зоны, д — центральная глубоководная часть озера (профундальная зона), е — северная глубоководная часть озера (ультрапрофундальная зона).

Содержание общего фосфора по сезонам изменяется мало (рис. 5.3.6). В последние годы можно отметить незначительное снижение средних концентраций в воде глубоководных зон в осенний период, когда в результате интенсивного горизонтального перемешивания водных масс и активной вертикальной конвекции распределение TP по акватории выравнивается, сужаются пределы колебаний, концентрации фосфора в воде прибрежной зоны приближаются к таковым для основной водной массы. Распределение общего фосфора по вертикали во все сезоны также достаточно однородно.

Средняя концентрация неорганического фосфора в воде озера в 1976–1989 гг. составляла 11 мкг Р л⁻¹, что в 3,7 раза выше, чем в 1959–1962 гг. К 1998 г. произошло плавное снижение концентрации IP с 9 до 5 мкг Р л⁻¹ (Расплетина, Сусарева, 2002). В дальнейшем, с 2000 по 2010 г. средние за период открытой воды концентрации IP не превышают 5 мкг Р л⁻¹ (рис. 5.3.4). Пространственное распределение неорганического фосфора по акватории более однородно, чем распределение общего фосфора (рис. 5.3.7). В последние годы средние для сезона концентрации IP в разных зонах озера обычно отличаются не более чем на 2–3 мкг Р л⁻¹. Средние значения в прибрежной зоне в 2009 и 2010 гг. оказались выше благодаря более высоким значениям, наблюдавшимся весной 2009 г. и осенью 2010 г.

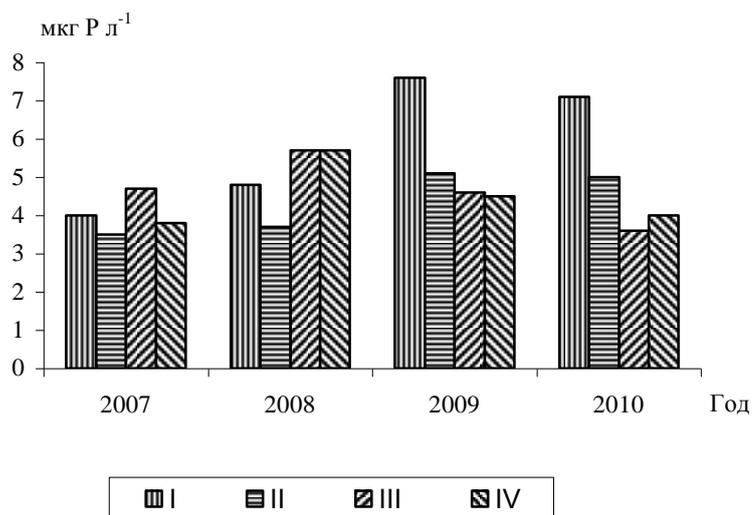


Рис. 5.3.7. Средние за период открытой воды концентрации неорганического фосфора в воде различных лимнических зон озера: I — прибрежная зона, II — деклинальная зона, III — профундальная зона, IV — ультрапрофундальная зона.

В режиме неорганического фосфора отмечена как сезонная (рис. 5.3.8), так и вертикальная изменчивость, основные черты которой сохраняются на протяжении всего периода исследования. Весной в теплоактивной области (прибрежная зона) содержание IP за счет потребления часто снижается почти до аналитического нуля, хотя на отдельных участках (Волховская губа) сохраняются высокие концентрации. Так, в конце 1990-х гг. они достигали здесь 50 мкг Р л^{-1} , после 2006 г. — 40 мкг Р л^{-1} . Летом в трофогенном слое (0–10 м) потребление неорганического фосфора также приводит к снижению концентраций до крайне малых величин при сохранении более высоких значений в гипolimнионе. В прибрежной зоне в некоторых случаях летом неорганический фосфор полностью потребляется. Осенью содержание IP остается на уровне средних летних значений или немного возрастает и выравнивается по вертикали. Однако осенняя вспышка развития фитопланктона может привести к почти полному потреблению фосфатов в трофогенном слое на значительных участках озера.

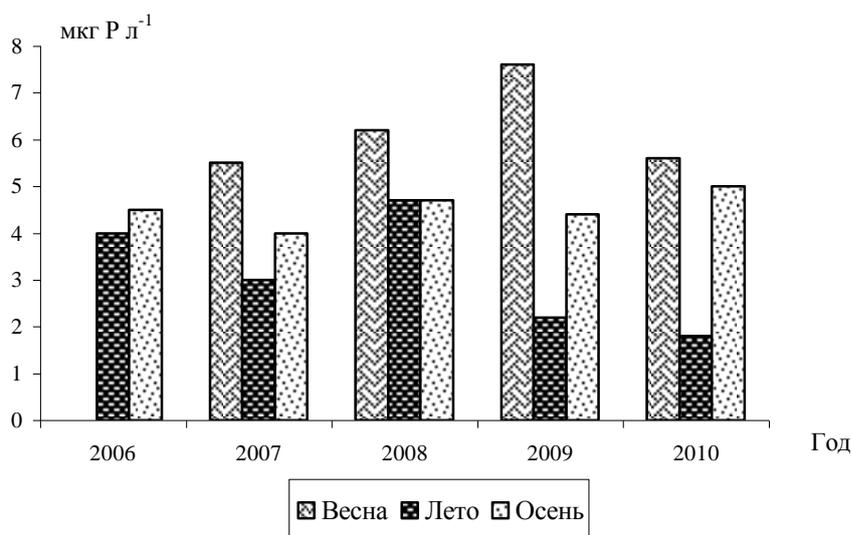


Рис. 5.3.8. Сезонные изменения средних концентраций неорганического фосфора в воде озера.

В то же время в режиме неорганического фосфора можно выделить некоторые особенности, характерные для отдельных периодов наблюдения. В конце 1970-х гг. в летний период в трофогенном слое глубоководных зон содержание IP снижалось до 1 мкг Р л⁻¹ и менее, затем до конца 1980-х гг. концентрации в слое эпилимниона этих зон не опускались ниже 4–8 мкг Р л⁻¹, что свидетельствовало об уменьшении интенсивности вовлечения его в биотический круговорот. С конца 1980-х гг. содержание фосфатов в эпилимнионе глубоководных зон снова снижается до 1–2 мкг Р л⁻¹, в слое гипolimниона отмечено постепенное снижение IP с 10–15 мкг Р л⁻¹ в начале 1980-х гг. до 6–7 мкг Р л⁻¹ в конце (Расплетина и др., 2002). В последние годы, начиная с конца 1990-х гг., содержание неорганического фосфора почти по всей акватории озера, кроме прибрежной зоны, периодически снижается не только в эпилимнионе (до 0,5 мкг Р л⁻¹), но и в гипolimнионе глубоководных зон, что может свидетельствовать о предельной интенсивности биотического круговорота. Особенно сильно это было выражено летом 2010 г., когда неорганический фосфор оказался потребленным практически по всему столбу воды на нескольких глубоководных станциях в северной и центральной частях озера.

Соединения азота. Вторым важным биогенным элементом в водоемах является азот. На протяжении периода наблюдений за содержанием соединений азота в воде озера и его притоков определяется: содержание общего азота (TN) — окислением персульфатом калия в щелочной среде с последующим определением с реактивом Грисса; содержание нитритов — фотоколориметрическим методом с реактивом Грисса; содержание нитратов — восстановлением NO₃⁻ до NO₂⁻ с помощью кадмиевого редулятора с последующим определением

с реактивом Грисса; содержание аммонийного азота — в соответствии с методикой, разработанной Союзом стандартизации Финляндии (SFS), спектрофотометрически с гипохлоритом и фенолом (SFS 3032).

Концентрация общего азота в воде притоков в 10–15 раз и более превышает содержание общего фосфора. Преобладающие концентрации TN находятся в пределах 500–800 мкг N л⁻¹. Повышенное содержание общего азота характерно для реки Волхов, в воде которой концентрации TN в 1,7–2 раза превышают концентрации в других реках, и для вод южных притоков Лава, Назия, Морье и Авлога. Максимальные концентрации общего азота, достигающие 2530–3400 мкг N л⁻¹, как и общего фосфора, зафиксированы в реке Авлога. Наряду с этим диапазон концентраций азота по водосбору значительно уже, чем для фосфора, максимальное содержание TN в водах основных притоков превышает минимальное примерно в 2 раза (и в 8 раз с учетом малых притоков) (табл. 5.3.3). Межгодовые и сезонные изменения содержания общего азота невелики, концентрация его в воде зарегулированных рек мало отличается от значений в воде большинства притоков. Содержание общего азота в истоке реки Нева отражает концентрации, характерные для основной водной массы Ладожского озера (табл. 5.3.3).

Таблица 5.3.3

Пределы концентраций общего азота в воде основных притоков Ладожского озера и в истоке реки Нева в разные годы (мкг N л⁻¹)

Река	2001–2005	2007	2008	2011
Волхов	980–1640	860–890	840–1220	930–1190
Бурная	570–750	590–670	550–610	570–690
Свирь	560–840	630–740	600–650	610–760
Паша	590–740	710–770	630–690	650–770
Оять	610–670	630–690	620–650	590–640
Сясь	740–890	770–810	690–810	730–830
Янисйоки	640–820	670–740	610–730	730–810
Олонка	630–710	760–820	790–930	760–870
Тулокса	610–720	—	—	710–850
Видлица	610–750	—	—	730–840
Тулемайоки	510–600	—	—	640–730
Нева	500–730	510–530	510–580	520–610

В
воде рек
большая
часть
азота
входит в
состав
органиче
ских

соединений, доля органического азота составляет 70–80% от общего его содержания. Из неорганических форм преобладающей является нитратная. По данным 2001–2005 гг. концентрации нитратов составляют от 5 до 22% от общего содержания, в основном 10–15%. Доля аммонийного азота в эти годы составляет в основном 2–5% TN.

Поступление соединений азота в Ладожское озеро с водосборного бассейна в 10–20 раз превышает сток фосфора. Годовой вынос азота с водой рек за период с 1976 по 2003 г. изменялся от 41,5 тыс. тонн до 66,8 тыс. тонн. Средняя за год концентрация общего азота в воде

рек составляет 650–850 мкг N л⁻¹. В отличие от фосфора, тренд в направлении снижения выноса азота в озеро прослеживается слабо. Максимальное поступление было отмечено в первой половине 1980-х гг., в 1992–1995 гг. и в 1998 г. (табл. 5.3.4; рис. 5.3.9).

Таблица 5.3.4

Поступление общего азота в озеро с речным стоком (тонн N год⁻¹)

Река	1976–1987	1992–1995	1997	1998	2000	2001	2002	2003
Волхов	22160	26540	18780	28760	15350	18590	13300	20280
Вуокса	12780	17680	8600	10600	11800	13380	10500	8800
Свирь	14330	14820	10800	10300	13650	14140	10250	9290
Остальные реки	9350	7800	7530	9720	7200	8000	7500	7000
Всего	58620	66840	45710	59380	48000	54110	41550	46370

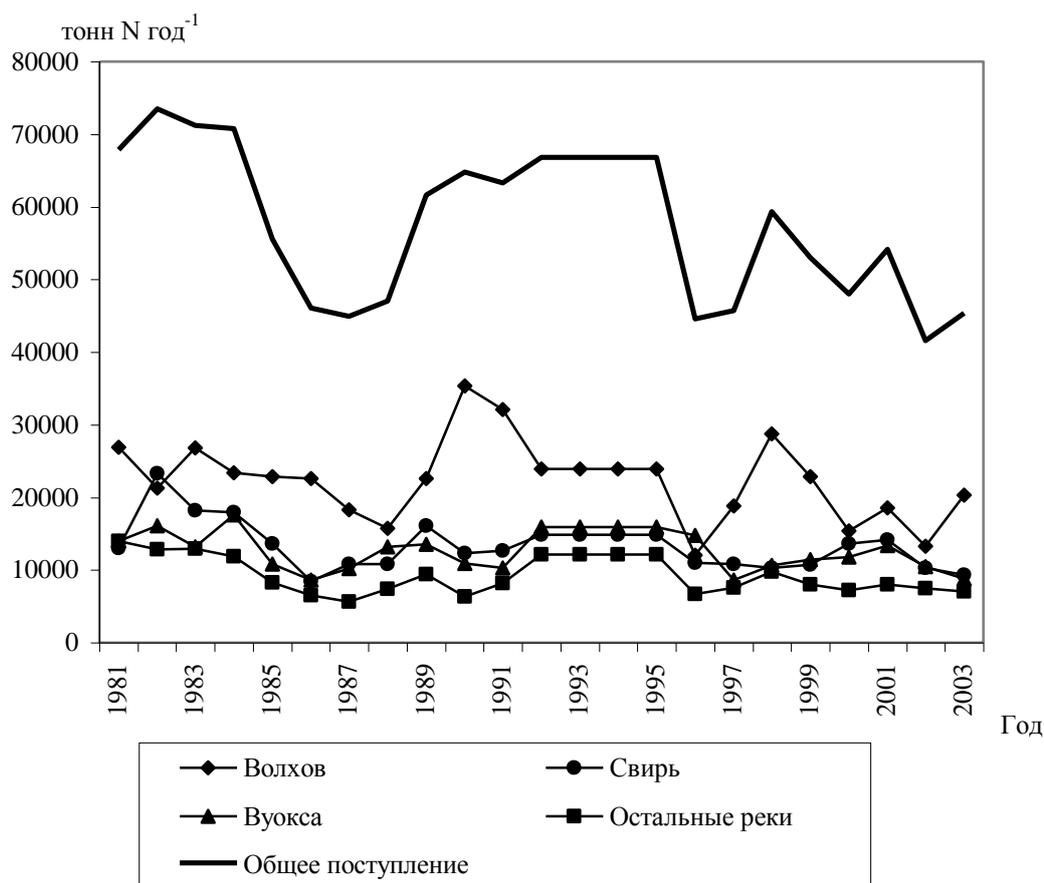


Рис. 5.3.9. Поступление общего азота (TN) в озеро с речным стоком (тонн N год⁻¹).

Доля участия Волхова в выносе азота в озеро меньше, чем в снабжении его фосфором, и составляет 29–49%, Свирь вносит 18–33%, Вуокса — 17–25% от общего речного поступления азота. Осредненный за период 1981–2003 гг. вклад притоков в поступление общего азота в озеро представлен на рис. 5.3.10.

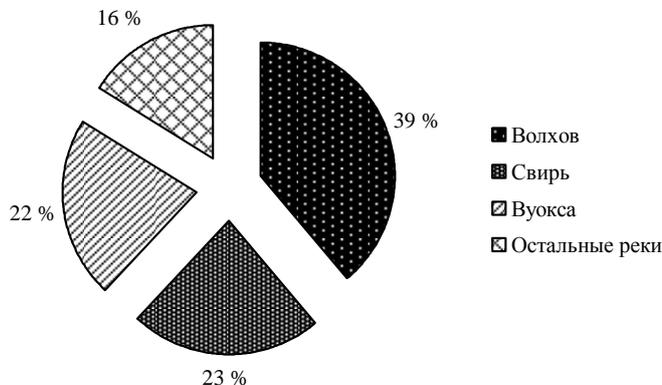


Рис. 5.3.10. Вклад притоков в общее поступление азота в Ладожское озеро с речным стоком (средний % за период 1981–2003 гг.).

Внешняя азотная нагрузка (L_N) на Ладожское озеро за период с 1976 по 2003 г. изменялась от $2,9 \text{ г N м}^{-2} \text{ год}^{-1}$ (2002 г.) до $4,3 \text{ г N м}^{-2} \text{ год}^{-1}$ (1992–1995 гг.). Так же, как и в отношении фосфора, преобладающая роль в поступлении азота в озеро принадлежит речному стоку (81–86% от общего поступления).

Среднее содержание общего азота в воде Ладожского озера за период 1976–2010 гг. составляло приблизительно 640 мкг N л^{-1} . Наибольшие для периода открытой воды средние концентрации наблюдались в начале 80-х и в конце 90-х гг. прошлого века и составляли $700\text{--}760 \text{ мкг N л}^{-1}$, а наименьшие ($540\text{--}580 \text{ мкг N л}^{-1}$) отмечены в конце 1980-х и в середине 1990-х гг. (Расплетина, Сусарева, 2002). В 2001–2005 гг. средняя за период открытой воды концентрация общего азота изменялась от 600 до 660 мкг N л^{-1} , в 2009–2010 гг. она составляла 570 мкг N л^{-1} (рис. 5.3.11).

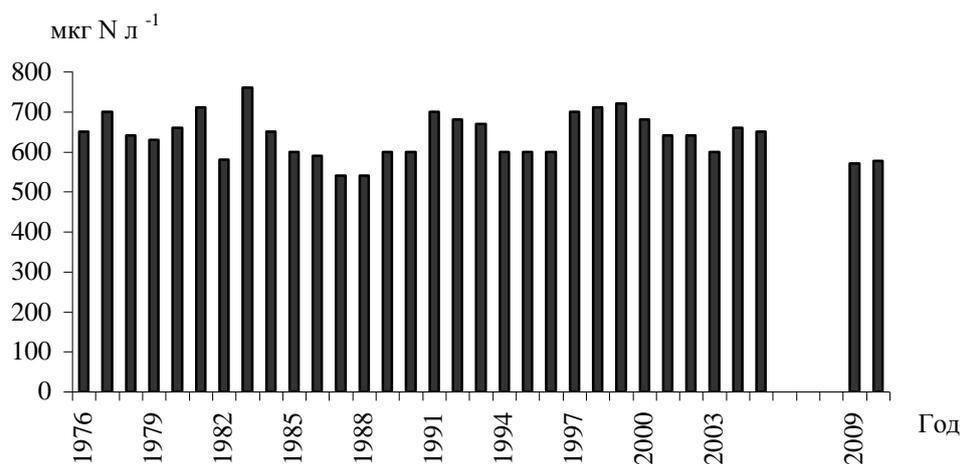


Рис. 5.3.11. Средняя концентрация общего азота в воде Ладожского озера (мкг N л^{-1}).

В пространственном распределении азота, как и фосфора, максимальные значения приурочены к прибрежной зоне озера, хотя диапазон концентраций по акватории гораздо уже, максимальные значения превышают минимальные примерно в 1,4–1,6 раза. Средние за период открытой воды концентрации общего азота в воде различных лимнических зон озера представлены на графике (рис. 5.3.12). Чаще всего повышенным содержанием азота выделяется Волховская губа. На станции в Волховской губе содержание TN в 2010 г. составило весной 730 мкг N л^{-1} , летом — 790 мкг N л^{-1} , осенью — 810 мкг N л^{-1} , весной 2011 г. — 720 мкг N л^{-1} , летом 2012 г. — $710\text{--}730 \text{ мкг N л}^{-1}$. На остальной части акватории пространственное распределение азота в эти же годы было достаточно равномерным, и концентрация его оставалась в пределах $450\text{--}690 \text{ мкг N л}^{-1}$ весной, $470\text{--}670 \text{ мкг N л}^{-1}$ — летом и $510\text{--}710 \text{ мкг N л}^{-1}$ — осенью. Вертикальное распределение общего азота также достаточно равномерно. Как видно из таблицы 5.3.5, по сравнению с 2006–2008 гг. в последние годы несколько сузился диапазон концентраций TN, в основном за счет снижения верхней границы; также снизились концентрации в воде Волховской губы, особенно по сравнению с 2008 г. Обычно сезонные изменения в содержании общего азота отчетливо не выражены и концентрации его остаются достаточно постоянными в течение всего периода открытой воды (табл. 5.3.5).

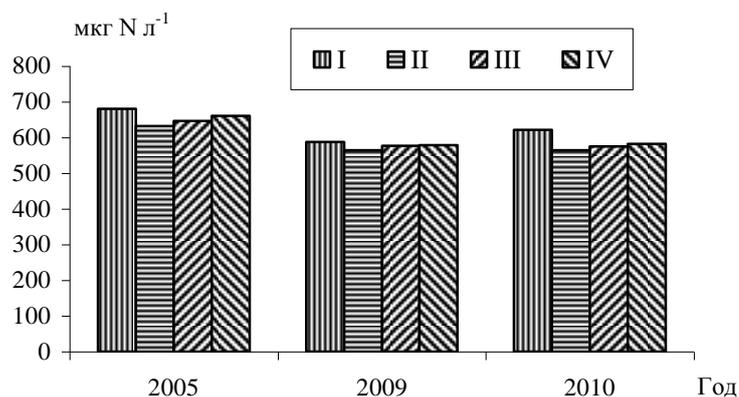


Рис. 5.3.12. Средние за период открытой воды концентрации общего азота в воде различных лимнических зон озера: I — прибрежная зона, II — деклинальная зона, III — профундальная зона, IV — ультрапрофундальная зона.

Таблица 5.3.5

Среднее содержание и пределы концентраций общего (TN) и нитратного (NO_3^- -N) азота в воде Ладожского озера в 2006–2012 гг. (мкг N л^{-1})

Год	Сезон	TN	NO_3^- -N
2006	Поздняя весна	560–780	80–170
	Лето	540–660	70–110
	Осень	640–870	120–330
2007	Весна	680–790 (870)	240–370 (450)
	Лето	490–730 (810)	50–270
	Осень	580–830	250–310
2008	Весна	610–890 (1230)	130–290
	Лето	510–810 (920)	80–190
	Осень	580–850 (920)	120–280
2009	Весна	<u>530</u> 450–610	90–258
	Лето	<u>550</u> 460–630 (690)	112–282
	Осень	<u>633</u> 530–710 (740)	165–252
2010	Весна	<u>600</u> 540–690 (730)	157–315

	Лето	<u>530</u> 470–630 (790)	60–296 (311)
	Осень	<u>600</u> 510–670 (810)	208–303
2011	Весна	<u>599</u> 490–680 (740)	<u>277</u> 100–361
2012	Лето	<u>575</u> 460–670 (730)	<u>206</u> 85–290

Примечание: в скобках — концентрации в Волховской губе, над чертой — средневзвешенные концентрации.

Неорганический азот находится в воде озера преимущественно в окисленной форме (NO_3^-). Азот нитратов поступает в озеро с речным стоком и атмосферными выпадениями и образуется в озере результате бактериальной трансформации соединений азота при деструкции и минерализации автохтонного и аллохтонного органического вещества. С начала 60-х до конца 70-х гг. прошлого века средняя концентрация нитратного азота в воде озера увеличилась со 150 до 230 мкг N л^{-1} (Расплетина, Сусарева, 2002). В настоящее время она остается на уровне 160–210 мкг N л^{-1} , что составляет в среднем около 30% от общего содержания азота. Пределы колебания концентрации NO_3^- в воде озера в разные сезоны представлены в табл. 5.3.5.

В содержании азота нитратов наблюдаются сезонные изменения. Весной в основной водной массе (профундальная и ультрапрофундальная зоны) нитраты распределяются равномерно по акватории и глубине, их содержание изменялось в 2009–2012 гг. от 166 до 300 мкг N л^{-1} . Поздней весной в деклинальной зоне и на некоторых участках профундальной зоны, расположенных вблизи побережья, где поверхностный слой воды уже прогрелся, в нем может наблюдаться снижение концентрации NO_3^- до 90 мкг N л^{-1} , связанное с его потреблением биотой. В летний период отчетливо выражена вертикальная неоднородность в содержании нитратов — в трофогенном слое оно снижается до 50–80 мкг N л^{-1} при сохранении достаточно высоких значений в слое гипolimниона. Осенью в глубоководной части озера содержание нитратов выравнивается по вертикали.

В воде Волховской губы часто наблюдаются высокие концентрации нитратов, так как воды Волхова обычно богаты соединениями азота. Так, в 2010 и 2011 гг. содержание NO_3^- в течение всего периода наблюдений достигало 300–361 мкг N л^{-1} . В 2009 и 2012 гг., напротив, концентрации азота нитратов здесь оказались невысокими (123–139 мкг N л^{-1}), что могло быть

результатом как потребления, так низкого его содержания в воде Волхова. Минимальные концентрации в воде прибрежной зоны (96–130 мкг N л⁻¹) часто отмечаются в Свирской губе.

К началу 80-х гг. прошлого века азот нитритов в воде озера обнаруживался в незначительных количествах — до 9 мкг N л⁻¹ только летом, в период наиболее интенсивно протекающих продукционно-деструкционных процессов. Как показали наблюдения последних лет (2005–2008 гг.), NO₂⁻ в воде озера практически не обнаруживается.

Содержание аммонийного азота в воде озера в начале 1980-х гг. изменялось в основном от 0 до 7 мкг N л⁻¹ и редко превышало 10 мкг N л⁻¹. В 2005–2008 гг. его концентрации преимущественно составляли 10–25 мкг N л⁻¹, в отдельных случаях достигая 50–80 мкг N л⁻¹, что свидетельствует об увеличении интенсивности процессов деструкции в течение данного периода. Доля аммонийного азота составляет, как правило, не более 5% от общего содержания азота в воде озера.

Минеральный растворенный кремний. Из всех биогенных элементов наибольших концентраций в воде рек Ладожского бассейна достигает растворенный минеральный кремний. Содержание его в природных водах определяется ландшафтными условиями водосбора и не зависит от хозяйственного освоения территории. Концентрации кремния в воде изменяются по сезонам, минимальные его количества приходится на летний период. По данным 2001–2005 гг. его концентрации в воде рек изменяются в диапазоне от 0,30 до 7,10 мг Si л⁻¹. Наиболее высокие концентрации свойственны рекам северо-восточного и восточного побережья: Тулемайоки, Тулокса, Видлица и Олонка (Расплетина и др., 2006). Содержание растворенного кремния в воде притоков, а, следовательно, и вынос его с речным стоком в озеро сохранились на уровне 1960-х гг., при этом средняя его концентрация в озере понизилась с 0,90 мг Si л⁻¹ в начале 1960-х гг. до 0,44 мг Si л⁻¹ в 1981–1987 гг. (Расплетина, Сусарева, 2002). Очевидно, что это следствие его интенсивного потребления диатомовыми водорослями: запас кремния в озере не успевает пополняться за счет речного поступления.

К 2000 г. основные черты режима растворенного минерального кремния выглядели следующим образом. Весной в теплоинертной области минеральный кремний распределяется равномерно по глубине и составляет 0,40–0,50 мг Si л⁻¹. В теплоактивной области (бухта Петрокрепость, Волховская губа) в период развития диатомовых водорослей его концентрации снижаются до 0,10 мг Si л⁻¹. В период летней стагнации содержание кремния в эпилимнионе устанавливается на уровне 0,15–0,25 мг Si л⁻¹, а в гипolimнионе достигает 0,30–0,45 мг Si л⁻¹. Осенью в условиях перемешивания концентрации выравниваются по глубине (Расплетина, Сусарева, 2002). В последние годы основные черты режима кремния в озере сохранились. В поверхностном слое концентрации составляют 0,10–0,25 мг Si л⁻¹, а в 2005 г. была отмечена

минимальная концентрация — $0,05 \text{ мг Si л}^{-1}$. Таким образом, вследствие интенсификации биологических процессов в водоеме, концентрации кремния могут снижаться до значений, ограничивающих развитие диатомовых водорослей. В слое гиполимниона концентрация кремния остается на уровне $0,40\text{--}0,50 \text{ мг Si л}^{-1}$, в 2008 г. в ультрапрофундальной зоне на глубине 50 м она составляла $0,80 \text{ мг Si л}^{-1}$.

5.4. Органическое вещество

Специфика геохимических и климатических условий на водосборе Ладожского озера — преобладание лесных ландшафтов, заболоченность, недостаток тепла и связанная с этим замедленная минерализация органических веществ, обуславливают высокое содержание в воде притоков, озера и реки Нева органического вещества природного происхождения.

Для характеристики содержания органического вещества в воде рек Ладожского бассейна используются такие показатели, как цветность воды, определяемая с помощью колориметрического титрования с имитационным стандартом, и концентрация общего органического углерода (*TOC* — *total organic carbon*). Содержание органического вещества в воде озера оценивается по следующим характеристикам: общий органический углерод, углерод органической взвеси (*POC* — *particulate organic carbon*), лабильный органический углерод (*LOC* — *labile organic carbon*), углерод высокомолекулярной фракции органического вещества — водное гуминовое вещество (*AHS* — *aquatic humic substance*) с молекулярной массой более 12000 Д. Концентрация общего органического углерода определялась двумя методами — ампульно-персульфатным с ИК-регистрацией концентрации CO_2 и методом бихроматной окисляемости; углерод органической взвеси — гравиметрическим методом (Витюк, 1970) при допущении, что на долю углерода приходится 50% от величины органической составляющей взвеси; лабильный органический углерод — по величине полного биохимического потребления кислорода, на основе предположения, что 1 г кислорода эквивалентен $0,375 \text{ г}$ углерода.

Растворы водного гуминового вещества выделяли последовательным фильтрованием природной воды через мембранные фильтры с диаметром пор $0,85 \text{ мкм}$ и ядерные фильтры с диаметром пор $0,11 \text{ мкм}$ при разряжении не более $0,25 \text{ атм.}$ с последующим удалением из фильтрата ионов неорганических и низкомолекулярных органических соединений путем диализа через пленку MWCO 12000–14000 в дистиллированную воду. В полученных растворах методом бихроматной окисляемости определялось содержание органического углерода.

Количество углерода низкомолекулярной фракции органического вещества в воде озера определялось по разности между концентрацией *TOC* и *AHS*. Поскольку, согласно опубликованным (Юдин, 1992) и архивным данным, а также данным, полученным в 2003–2007

гг., средняя концентрация *POC* относительно невысока и не превышает 0,2–0,4 мг С л⁻¹, содержание *TOC* отражает, в основном, концентрацию растворенного органического углерода.

Органическое вещество в воде притоков Ладожского озера. Изучение органического вещества притоков проводилось в 60-е гг. прошлого века (Соловьева, 1967) и в период с 1981 г. по настоящее время (Расплетина и др., 1987, 2002, 2006).

Цветность воды рек изменяется в очень широких пределах. В последние годы (2001–2011 гг.) диапазон колебания цветности составляет 25–45 град. в межень и до 340–400 град. во время дождевых паводков. Вода реки Волхов имеет высокую цветность, обусловленную значительной заболоченностью водосбора, что приводит к повышенному содержанию окрашенных органических веществ и широкому диапазону изменения значений (от 40 до 240 градусов цветности). Минимальными значениями цветности характеризуются воды рек с высокой озерностью водосборов — Свири, Бурной, Вуоксы (30–50 градусов); к этой группе также можно отнести реки Янисйоки и Хиитолан. Диапазон колебаний значений цветности в них невелик, максимальные значения обычно превышают минимальные не более чем в 2 раза. В воде слабо зарегулированных рек цветность может изменяться от 80 до 240 градусов в реках северной части бассейна и от 130 до 380 градусов в реках южной части водосбора.

Минимальные концентрации органического углерода (6–17 мг С л⁻¹), как и цветности воды, наблюдаются в реках с высокой озерностью водосбора — Свири и Бурной. Отдельные повышения концентрации *TOC* и цветности здесь крайне редки. На том же уровне (до 20 мг С л⁻¹) находится содержание *TOC* в воде рек северной части бассейна (Янисйоки, Хиитолан, Уксунйоки, Ййоки, Тохма). В реках восточной и юго-восточной части водосбора содержание *TOC* составляет 10–30 мг С л⁻¹ (Расплетина и др., 2006). В малых реках южной части водосбора (Лава, Назия, Морье) содержание органического углерода может достигать 35–40 мг С л⁻¹.

Особенности водосбора реки Волхов обуславливают повышенное содержание органических веществ в воде. Из трех главных притоков в воде Волхова наблюдаются максимальные концентрации *TOC* за период наблюдения с 2000 до 2011 г. Крайне высокое содержание *TOC* (44 мг С л⁻¹), отмеченное в июле 2001 г., вероятно, объясняется попаданием в реку сточных вод, тем более, что высокое значение *TOC* не было связано со значительным повышением цветности воды (Расплетина и др., 2006).

Наиболее низкие концентрации общего органического углерода характерны для периода летней межени или, иногда, весеннего половодья, максимальные — приурочены к дождевым паводкам. Так, летом 2006 г. в воде незарегулированных рек, перешедших на глубокое подземное питание, содержание *TOC* было в 1,3–1,7 раза ниже минимальных значений, зафиксированных в 2000–2005 гг., и в 3 и более раза ниже, чем в 2007–2011 гг. В 2007 и в 2008

гг. наблюдения в летний период пришлось на интенсивные дождевые паводки. В воде зарегулированных рек (Свирь и Бурная) диапазон колебаний ТОС значительно уже и концентрации близки между собой. Данные о содержании ТОС в воде основных притоков в последние годы представлены в табл. 5.4.1.

Таблица 5.4.1

Содержание общего органического углерода (мг С л⁻¹) в воде основных притоков Ладожского озера и реке Нева в летне-осенний период

Река	2000–2005 гг.		2006 г.		2007 г.		2008 г.		2011 г.	
	Л	О	Л	О	Л	О	Л	О	Л	О
Волхов	15,8–44,0	14,4–24,4	13,4	22,3	15,6	14,8	15,1	23,3	16,0–24,1	21,6
Бурная	7,3–10,5	6,0–15,0	6,2	6,3	7,0	7,6	6,6	7,3	8,0–8,7	9,4
Свирь	7,3–11,2	6,0–17,4	6,0	9,7	7,0	7,9	6,6	12,8	7,1–9,1	34,1
Паша	9,1–29,5	7,4–21,9	4,7	23,0	15,1	22,5	16,9	27,6	11,9–13,7	41,2
Оять	10,3–23,6	7,4–18,8	4,4	21,1	15,6	21,0	14,5	23,9	12,5–16,0	21,6
Сясь	14,6–28,9	7,4–30,1	5,6	24,7	16,2	21,9	15,7	28,8	17,2	25,9
Янисей оки	9,2–14,9	8,8–14,4	8,0	—	9,4	10,4	6,6	12,2	10,3–10,7	9,4
Олонка	10,9–24,3	12,5–25,6	8,6	—	13,1	28,0	6,6	26,9	12,1–13,7	18,8
Нева	—	—	6,0	7,5	6,4	7,1	6,6	7,9	9,1–9,7	11,8

Примечание: Л — лето, О — осень.

Ряд данных о среднемесячных концентрациях ТОС в воде основных притоков и их водном стоке позволил оценить величину общего поступления органического углерода в озеро и вклад каждого притока в эту величину (Расплетина и др., 1987, 2002). Доля реки Волхов достаточно постоянна и составляет 35–37%, доля Свири с притоками Пашой и Оятью — примерно 25%, доля реки Бурная — 17–18%. Анализ многолетних данных показал, что межгодовые колебания концентраций ТОС невелики, несмотря на довольно высокие внутригодовые колебания. Вынос органического углерода составляет около 1 млн т в год. Поскольку сведений о содержании общего органического углерода в воде Волхова за 1992–2002 гг. больше, чем для других рек, была выполнена ориентировочная оценка суммарного поступления органического углерода с речным стоком на основании сведений о реке Волхов. Расчет показал, что, как и в прежние годы, оно оказалось близким 1 млн т и составило в 2000–2001 гг. 945 тыс. т, а в 2001–2002 гг. — 906 тыс. т (Расплетина и др., 2002).

Система органического углерода воды Ладожского озера. В системе материкового стока озера являются накапливающими элементами ландшафта. Наиболее сложный компонент озерного накопления, отражающий особенности энергетического баланса экосистемы — накопление органического вещества. Соотношение темпов накопления органического вещества,

его трансформации в многочисленных циклах озерных процессов и минерализации определяют скорость эволюции озерной системы (Россолимо, 1964, 1977).

Характерной чертой эвтрофирующихся озер является значительная величина положительного баланса органического вещества, связанная, особенно на первом этапе, с увеличением скорости новообразования органического вещества в процессе фотосинтеза фитопланктоном и высшей водной растительностью. В качестве показателя интенсивности эвтрофирования водоема часто используют соотношение скорости новообразования органического вещества в процессе фотосинтеза и скорости деструкции. Однако большая часть органического углерода в природных водах существует в виде консервативных высокомолекулярных органических комплексов, сформированных в почвенных процессах на водосборе и преобладающих в воде притоков. Сравнительно медленно минерализуется и детрит — останки отмерших озерных организмов. Относительно низкая скорость минерализации растворенного органического вещества (*DOC* — *dissolved organic carbon*) притоков и детрита (*POC*) является регулятором стабильности экосистем водоемов. В период недостаточного поступления органического вещества извне консервативный запас может использоваться как источник минеральных форм биогенных веществ. Очевидно, что в устойчивой, сбалансированной системе концентрация растворенного органического вещества изменяться не должна. В случае же изменения скорости разложения консервативного резерва должны наблюдаться значительные межгодовые колебания содержания *DOC*, свидетельствующие о несбалансированности системы, о ее нестабильном состоянии (Трегубова, 1982; Трегубова и др., 1983, 1987; Трегубова, Кулиш, 1982, 1992; Currie, Kalff, 1984; Gao, Heath, 2005; Jonsson, 2003; Jonsson et al., 2001; *Limnologie generale*, 1995).

Изучение процессов формирования и трансформации органического вещества в экосистеме Ладоги проводится в составе комплексных исследований Института озероведения РАН с начала 60-х гг. прошлого века до настоящего времени. Наблюдения за содержанием органического вещества Ладожского озера в периоды 1959–1962 гг. (Расплетина и др., 1967), 1976–1979 гг. (Расплетина, 1982а) и с 1981 по 2011 г. (Трегубова, 1982; Трегубова и др., 1983, 1987; Трегубова, Кулиш, 1982, 1992; Коркишко и др., 1995, 2000, 2000а, 2002; Расплетина, Сусарева, 2002; Петрова и др., 2005, 2010) позволяют проанализировать особенности режима органического углерода в озере в период интенсивного антропогенного эвтрофирования и после снижения поступления фосфора в озеро до уровня расчетной «допустимой» нагрузки. В последнее десятилетие особое внимание было уделено исследованию процессов трансформации водного гуминового вещества.

На первом этапе развития процесса эвтрофирования Ладожского озера изменения в процессах, определяющих темп накопления и трансформации озерного органического вещества,

были следующими. Уже в 1970 г. в фитопланктоне реки Невы, достоверно отражающем уровень развития водорослей в южной части акватории Ладоги, было отмечено значительное увеличение численности массовых видов, преимущественно диатомовых — доминантов олиготрофного периода. С 1972 г. стало очевидным общее увеличение группы массовых водорослей за счет видов, обычных для богатых биогенными элементами эвтрофных озер (Петрова, 1990; Петрова и др., 1992; Gutelmacher, Petrova, 1982). В 1976 г. первичная продукция фитопланктона за вегетационный период с площади озера составила 259 тыс. т С, а к 1978 г. достигла 1568 тыс. т С, впервые превысив годовое поступление аллохтонного органического вещества притоков — 1044 тыс. т С. В 1981 г. бактериальная деструкция органического вещества за вегетационный период превысила сумму первичной продукции и годового поступления аллохтонного органического вещества (Петрова и др., 2005).

Причиной такой кардинальной перестройки озерных процессов послужило усложнение видового разнообразия сообществ: как продуцентов, так и деструкторов, — стимулированное резко возросшей обеспеченностью фосфором. В фитопланктоне основную роль по всей акватории стали играть высокопродуктивные виды, обычные в эвтрофных озерах, требующие, однако, вдвое больше фосфора на единицу ассимилированного углерода, чем виды олиготрофных водоемов (Gutelmacher, Petrova, 1982). Потребление фосфора фитопланктоном за вегетационный период 1982 г. составило 231 тыс. т. Оборачиваемость фосфора в озере за счет потребления фитопланктоном выросла на порядок по сравнению с олиготрофным периодом (с 25 до 2,5 суток). Еще более активно фосфор потреблялся бактериями (780 тыс. т). По-видимому, это способствовало формированию «внутреннего дефицита» фосфора в экосистеме. Одновременно было впервые отмечено массовое развитие в озере новой группы организмов, участвующих в минерализации органического вещества — водных грибов (Иофина, 1987; Капустина, Иофина, 1988). Экспериментальные данные показали, что интенсивность деструкции у водных грибов близка к бактериальной (Иофина, 1987; Капустина, 1992; Капустина, Иофина, 1988; Трегубова и др., 1987). В 1983–1984 гг. резко снизились скорости биохимического потребления кислорода с изменением вида кинетических кривых процесса (Трегубова и др., 1987, Трегубова, Кулиш, 1992; Хайлов, 1974). По существующим в литературе представлениям, кинетика потребления, возникшая в этот период, типична для деструкции органического вещества не только бактериями, но и более сложным составом организмов (Хайлов, 1974). Увеличилась степень минерализации органического вещества.

После максимального по уровню годовой первичной продукции 1985 г. начался следующий этап сукцессии фитопланктона — постепенное возвращение роли доминантов традиционным ладожским видам, менее продуктивным, но вдвое более экономным в потреблении фосфора и, к тому же, лучше приспособленным к условиям северного

холодноводного водоема. Вторичная смена доминантов не привела к существенному снижению уровня первичной продукции. Активность минерализации органического вещества возросла благодаря массовому развитию как в эпилимнионе, так и в гиполимнионе не только бактерий, но и водных грибов, способных к более глубокой трансформации наиболее консервативных его компонентов (*Limnologie generale*, 1995). Прижизненные выделения водорослей и других гидробионтов создавали значительный общий запас органического вещества, не только легко минерализуемого, но и обладающего набором ферментов, способных воздействовать на биохимические процессы в озере (Коркишко и др., 1995; Крылова, 1999).

Содержание органического вещества в водной массе озера оставалось довольно постоянным (7536 тыс. т С) с периода 1956–1963 гг. до 1981 года. Средняя концентрация по сезонам колебалась в 1976–1979 гг. в пределах 8,1–13,7 мг С л⁻¹ в мелководных зонах и 8,2–10,4 мг С л⁻¹ в глубоководных, однако, в среднем для озера оставалась постоянной — 8,3 мг С л⁻¹.

Изменение интенсивности и соотношения экосистемных процессов, формирующих общий запас органического вещества, впервые проявилось в резком снижении содержания органического вещества в озере весной 1981 г., когда концентрация ТОС в двух глубоководных зонах составила 4,4 мг С л⁻¹. Благодаря огромному объему водной массы этих зон, общее количество органического углерода в озере снизилось до 5811 тыс. т. Как говорилось выше, это был год отчетливо выраженного преобладания процессов деструкции органического вещества в экосистеме Ладоги, связанного, очевидно, с активностью водных грибов, особенно в зимний период. В последующие годы как сезонные колебания ТОС во всех зонах озера, так и изменения общего запаса органического углерода стали постоянными. К 1983–1985 гг. общий запас органического вещества в озере значительно вырос (8626 тыс. т), что, вероятно, можно объяснить максимальной активностью фитопланктона. Концентрация ТОС в мелководных зонах колебалась в пределах 8,0–24,0 мг С л⁻¹, а в глубоководных — 7,6–15,8 мг С л⁻¹, средняя концентрация в воде озера была в пределах 9,1–9,5 мг С л⁻¹. Следующий, более длительный период пониженного содержания органического углерода в озерной водной массе сформировался к 1988 г. Минимальное для этого периода среднее значение было отмечено в 1991 г. и составило 6,8 мг С л⁻¹ (запас в объеме озера — 6174 тыс. т). Для этого периода были характерны минимальные нижние пределы амплитуды сезонных колебаний ТОС не только в глубоководных (3,4–11,8 мг С л⁻¹), но и в мелководных зонах (5,5–18,8 мг С л⁻¹). Этот цикл закончился только к 2000 г., сменившись короткой фазой (2001–2003 гг.) интенсивного накопления органического вещества. В 2003 г. концентрации ТОС в мелководных зонах изменялись в пределах 8,5–30,4 мг С л⁻¹, а в глубоководных 8,5–30,0 мг С л⁻¹, средняя концентрация в озере составляла 10,0 мг С л⁻¹, содержание ТОС в объеме озера было максимальным за период наблюдений — 9080 тыс. т. Затем последовало новое снижение, и в

2004 г. средняя за период открытой воды концентрация ТОС составила $8,4 \text{ мг С л}^{-1}$, а с 2005 по 2010 г. она колебалась около значения $7,0 \text{ мг С л}^{-1}$ ($6,6\text{--}7,3 \text{ мг С л}^{-1}$), что соответствует запасу органического углерода в объеме озера от 6468 тыс. т до 7154 тыс. т (рис. 5.4.1).

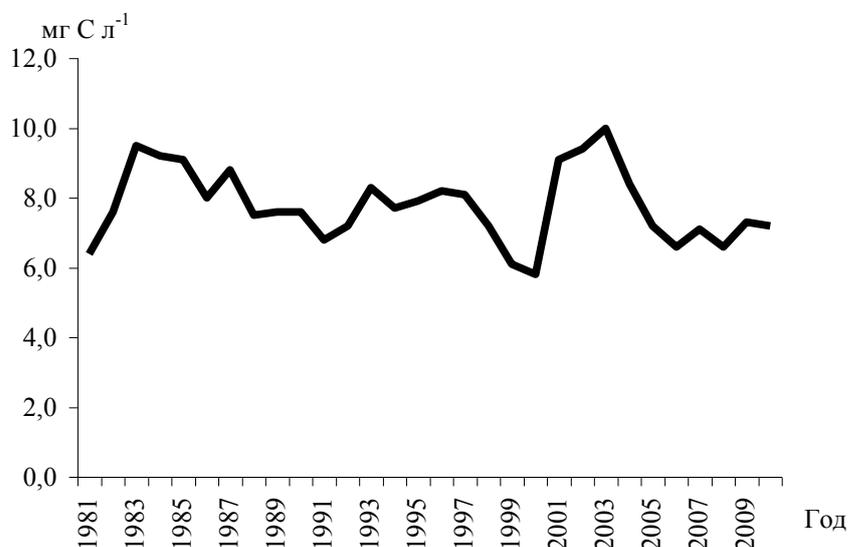


Рис. 5.4.1. Изменение среднегодовой концентрации общего органического углерода в воде Ладожского озера.

Сравнение с межгодовыми изменениями количества фосфора в водной массе (рис. 5.3.3) свидетельствует о том, что дисбаланс формирования общего запаса углерода начался раньше существенного снижения содержания фосфора в озере и далеко не всегда был прямо пропорционален уменьшению запаса этого элемента в воде.

Лабильный органический углерод позволяет оценить ту часть общего органического углерода, которую достаточно быстро путем биохимического окисления могут использовать водные микроорганизмы. В пелагиали озера он представлен в основном клетками фито- и зоопланктона, продуктами их неполной деструкции и растворенными метаболитами, поступающими в воду в процессе жизнедеятельности гидробионтов. Средняя концентрация ЛОС за вегетационный период является равновесным показателем, характеризующим соотношение протекающих в озере продукционных и деструкционных процессов. При сохранении равновесия в продукционно-деструкционных процессах среднегодовое содержание ЛОС должно оставаться достаточно постоянным. При этом сезонные колебания концентрации ЛОС естественны, так как периоды максимальной интенсивности процессов продукции и деструкции в озере не совпадают по времени.

На начальном этапе исследований процесса антропогенного эвтрофирования озера (1976–1979 гг.) средняя концентрация лабильного органического углерода достигала значения 1,8 мг С л⁻¹ (Трегубова, Кулиш, 1982), в дальнейшем она снизилась примерно до 0,5 мг С л⁻¹ и сохранялась на этом уровне до 2004 г. В 2005 и 2006 гг. среднегодовая концентрация ЛОС увеличилась до 0,6–0,7 мг С л⁻¹, в 2007 г. она достигла величины 1,0 мг С л⁻¹. В 2008–2010 гг. средняя за период весна – осень концентрация лабильного углерода для озера составила 0,9 мг С л⁻¹.

Начиная с осени 2006 г. наблюдается тенденция увеличения концентрации лабильного углерода и его доли от общего углерода во всех зонах озера. Максимальные значения ЛОС обычно составляют 2,0–2,5 мг С л⁻¹, а осенью 2008 г. они достигали 3,4 мг С л⁻¹. При этом если в весенне-летний период повышенные концентрации наблюдаются в основном в прибрежной и деklinальной зонах, то осенью высокие концентрации отмечаются в глубоководной зоне озера. Весной и летом доля лабильного углерода от общего обычно составляет 10–16%, а осенью возрастает до 20–30%, в отдельных случаях до 40%. Летом 2010 г. доля лабильного углерода выросла до 20–30%, а в одном случае, в глубоководной зоне — до 40%. Очевидно, что приведенные материалы свидетельствуют о значительном и усиливающемся дисбалансе накопления и минерализации органического вещества в экосистеме.

Проводившиеся с середины 1990-х гг. подробные исследования высокомолекулярной гуминовой фракции органического вещества Ладожского озера, свидетельствуют о существенных изменениях в характере его накопления и трансформации (Коркишко и др., 1995, 2000, 2000а, 2002). Водное гуминовое вещество глубоководной части Ладожского озера представляет собой единый высокомолекулярный комплекс, в котором обнаружено основное количество соединений биогенных элементов, присутствующих в озерной воде. В 1990-е гг. на гуминовую фракцию приходилось 85–95% ТОС. Разность между общим количеством органического углерода и его гуминовой составляющей не превышала 2 мг С л⁻¹. После 2003 г. эта разность во многих случаях (в основном, летом и осенью) составляет 3,0–6,0 мг С л⁻¹.

Как показали исследования, водное гуминовое вещество, поступающее в озеро с водами притоков, находится в максимально восстановленной форме, и степень его окисленности не превышает 3–10%. Однако весной в теплоинертной и малопродуктивной глубоководной части озера степень его окисленности может составлять 60–70%, а летом и в начале осени — 25–75%, что свидетельствует о процессе окисления этого вещества в озере.

Сравнительное изучение элементного состава водного гуминового вещества, полученного из воды реки Волхов, и гуминового вещества из воды глубоководных зон озера, позволило установить снижение относительного содержания углерода и водорода в веществе

глубоководных зон. Это связано с окислением углеводородных фрагментов за счет реакции замещения водорода на кислород.

Полученное атомное отношение углерода к фосфору показало, что в гуминовом веществе из реки Волхов на 1 атом углерода приходится примерно в 2–3 раза больше атомов фосфора, чем в гуминовом веществе из воды глубоководной зоны озера.

В результате проведенных исследований высокомолекулярного гуминового комплекса, поступающего с водами реки Волхов, и гуминового комплекса, выделенного из воды глубоководной зоны озера, было показано, что в процессе биохимического окисления аллохтонного органического вещества водное гуминовое вещество существенно трансформируется. Происходит разрыв химических связей с образованием высокомолекулярного гуминового вещества с меньшей молекулярной массой и низкомолекулярных соединений (Коркишко и др., 2002). В результате многоступенчатой трансформации в озерных круговоротах из состава гуминового вещества могут выделяться биогенные элементы и соединения металлов. В воде глубоководных зон содержится уже частично трансформированное гуминовое вещество, которое практически не подвержено биохимическому окислению. Можно предположить, что дальнейшее его окисление происходит по биокаталитическому механизму с участием различных веществ, в том числе выделяемых представителями биоты (Коркишко и др. 1995, 2000а, 2002; Крылова, 1999). При этом содержащиеся в нем углерод и фосфор становятся доступными для фито- и бактериопланктона, уменьшая «внутренний дефицит» этих элементов в экосистеме. Полученные данные свидетельствуют о том, что гуминовая составляющая растворенного органического вещества Ладожского озера в настоящее время достаточно интенсивно вовлечена во внутриводоемные процессы.

Сопоставление данных, полученных в 2003 г., при особенно большом диапазоне межсезонных и пространственных колебаний ТОС, позволило отметить ряд важных особенностей процесса вовлечения гуминовых комплексов в озерные круговороты, которые сохранялись и в следующие годы.

Весной содержание гуминового вещества в пределах теплоинертной области глубоководных зон (ультрапрофундальной и профундальной) является довольно однородным по всей водной толще. Количество низкомолекулярной фракции, определяемое по разнице между количеством ТОС и АНС, невелико и отражает итоги деструкционных процессов зимнего периода в основной озерной водной массе. Летом здесь преобладает накопление автохтонного органического вещества в эпилимнионе. К осени в ультрапрофундальной зоне возникает существенный дисбаланс процессов, приводящий к резким контрастам вертикального распределения как концентрации ТОС, так и степени его трансформированности (Петрова и др.,

2005). Максимум низкомолекулярной фракции в отличие от летнего периода часто отмечается не в поверхностном слое воды, а в гипolimнионе.

В прибрежной зоне весной преобладает поступление аллохтонного органического вещества с водосбора, и степень его трансформированности невелика, но летом, в период наибольшего прогрева и максимальной активности биологических процессов как фототрофных, так и гетеротрофных сообществ, и осенью в низкомолекулярную фракцию может переходить около половины гуминового вещества озерной воды.

Как показали проведенные исследования, в 1995–1999 гг. относительное содержание водного гуминового вещества — буферного звена экосистемы Ладожского озера, было достаточно стабильным и сохраняясь в пределах 85–95% ТОС. К 2003 г. амплитуда пространственно-временных колебаний увеличилась до 36–97% (табл. 5.4.2). Следовательно, в виде низкомолекулярной фракции в озерные круговороты вовлекалось в прибрежной зоне в разные сезоны до 64% от ТОС, в профундальной зоне до 51%, в ультрапрофундальной зоне до 44% растворенного органического вещества.

Таблица 5.4.2

Доля АНС от общего органического углерода (%) в воде Ладожского озера в разные сезоны

Лимническая зона озера	Весна 2003 г.	Весна 2010 г.	Лето 2003 г.	Лето 2010 г.	Осень 2003 г.	Осень 2010 г.
Ультрапрофундальная	77–80	69–72	56–68	67–91	73–97	71–90
Профундальная	70–89	59–91	54–75	64–84	49–90	67–76
Прибрежная	63–68	77–99	36–73	67–86	59–97	68–74

Примерный расчет величин содержания низкомолекулярной фракции органического вещества по разности между ТОС и АНС, основанный на изменении концентрации гуминового вещества в воде Ладожского озера в разные периоды наблюдений, позволяет судить о масштабах процессов, происходящих в последние годы (табл. 5.4.3).

Таблица 5.4.3

Количество низкомолекулярной фракции органического вещества, сформировавшегося в разные сезоны в Ладожском озере в период 2003–2007 гг. (тонн С в объеме озера)

Год	Весна (май)	Лето (июль-август)	Осень (сентябрь-октябрь)
2003	1777	4470	3343
2004	—	—	2720
2005	2927	3180	4136
2006	—	—	1232
2007	548	3174	—

Экспериментально полученные пределы величин атомного соотношения С : Р в аллохтонном гуминовом веществе реки Волхов составляют 10–15, а в трансформированном

AHS из глубоководных зон озера — 3–9) (Коркишко и др., 2002). Также были рассчитаны отношения концентраций С : Р в разных компонентах (ТОС и AHS) органического вещества озерной водной массы и вод рек Волхов и Нева (табл. 5.4.4). Это дало возможность приблизительно оценить размеры пополнения бюджета биологически доступного фосфора за счет включения низкомолекулярной фракции гуминового вещества в озерный круговорот (табл. 5.4.5, табл. 5.4.6).

Таблица 5.4.4

Сезонные изменения отношения С : Р в органическом веществе (ТОС) и его высокомолекулярной гуминовой фракции (AHS) в воде рек Волхов и Нева и в Ладожском озере

Объект	Год	Сезон	ТОС	AHS
Р. Волхов	1995, 1998	Июль	615	380
Ладожское озеро	1995	Июль	538	500
	1998	Август	—	700
	1998	Сентябрь	—	750
Р. Нева	1994, 1997	Март	557	540
	1994, 1997	Апрель	440	394
	1997, 1998	Июнь	418	449
	1997	Июль	917	860

Таблица 5.4.5

Расчетное количество фосфора низкомолекулярной фракции гуминового вещества), поступающего в озерный круговорот (тонн Р за сезон в объеме озера)

Год	Весна	Лето	Осень
1995	—	4,3	—
1998	—	1,2	—
2003	3,55	8,94	6,68
2004	—	—	5,40
2005	5,85	6,56	8,27
2006	—	—	2,46
2007	1,96	6,34	—

Таблица 5.4.6

Роль глубоководных зон в процессе вовлечения фосфора низкомолекулярной фракции органического вещества в озерный круговорот (тонн Р за сезон в объеме зоны)

Год	Профундальная зона		Ультрапрофундальная зона	
	Лето	Осень	Лето	Осень
1995	4,3	—	—	—
1998	—	—	1,2	—
2003	2,3	2,9	4,3	2,6
2004	—	2,5	—	2,1
2005	2,1	2,1	3,3	3,3
2006	—	2,1	—	—
2007	1,0	—	4,0	—

Полученные величины свидетельствуют о существенной роли гуминовой составляющей аллохтонного органического вещества в озерных процессах на современном этапе эволюции Ладожского озера и объясняют отсутствие заметного снижения продуктивности биоты при уменьшении поступления фосфора от антропогенных источников до уровня «допустимой» нагрузки. Более полная трансформация органического вещества приводит не к накоплению гуминовой фракции, а к вовлечению все большей ее части в озерный круговорот. В результате длительного периода «критической» фосфорной нагрузки на экосистему озера, активизировавшей биохимические и биокаталитические процессы трансформации аллохтонного органического вещества, пополнение квоты биологически доступного фосфора может происходить в настоящее время за счет мобилизации из ранее консервативных запасов гуминовых комплексов.

5.5. Взвешенные вещества

Взвешенные твердые вещества, присутствующие в природных водах, состоят из частиц глины, песка, ила, суспендированных органических и неорганических веществ, планктона, различных микроорганизмов. Взвешенные частицы влияют на прозрачность воды и на проникновение в нее света, на температуру, состав растворенных компонентов озерной воды, адсорбцию токсичных веществ, а также на состав и распределение донных отложений и на скорость осадконакопления.

Определение количества взвеси в пробах воды проводилось по океанологической методике с помощью мембранного фильтрования (Лисицын, 1956). Применялись фильтры с диаметром пор 0,85 мкм, объем отфильтрованной воды менялся от 0,2 до 1,0 литра в зависимости от концентрации взвеси. Помимо общего количества взвеси (суммарная или общая взвесь) в пробах воды определялась их органическая составляющая (органическая взвесь). Для ее оценки использовался метод прокаливания мембранных фильтров при $t^{\circ} = 500^{\circ} \text{C}$ (Витюк, 1970).

Формирование взвеси в озерной воде происходит двумя путями: аллохтонным (приносимые реками и ветром частицы терригенного происхождения) и автохтонным (продукция фито- и зоопланктона, остатки высшей водной растительности). Характерные для Ладожского озера резкие контрасты в распределении взвеси объясняются сезонными факторами и природой их формирования. Образование взвеси в центральном и северном глубоководных районах озера происходит, в основном, летом за счет продуктов жизнедеятельности фито- и зоопланктона. Доля взвеси такого происхождения здесь часто достигает 90%. В прибрежной

мелководной зоне в формировании пула взвешенных веществ большую роль также играют воды притоков, поверхностно-склоновый сток и взмучивание донных отложений во время штормов в свободный ото льда период. Наибольшие для озера концентрации взвеси, наблюдаемые в южной мелководной части озера, приурочены к районам, находящимся под влиянием вод главных притоков (реки Волхов, Свирь, Бурная), которые являются основными источниками поступления взвешенных веществ с водосбора. Особенно сильно их влияние сказывается в прибрежном районе весной в период существования термического бара, который препятствует распространению речных вод от берега в сторону больших глубин.

В 2003–2008 гг. проводились наблюдения за содержанием взвешенных веществ в воде 11 основных притоков Ладожского озера. Наблюдения показали, что содержание суммарной взвеси в воде рек может изменяться в очень широком диапазоне (0,3–70,8 г м⁻³) без отчетливых межгодовых и сезонных закономерностей и зависит, в основном, от конкретных условий (летняя межень, дождевые паводки, количество фито- и зоопланктона, растительных остатков в воде и т. д.), предшествующих моменту отбора проб (табл. 5.5.1). Все же наибольшее количество взвеси в воде притоков в 2003–2005 гг. наблюдалось летом, особенно высокие ее концентрации отмечались в 2003 и 2004 гг. В 2005–2008 гг. содержание взвешенных веществ в воде рек несколько снизилось по сравнению с 2003–2005 гг. В 2007 г. ее концентрации в воде практически всех притоков оказались минимальными для всего периода наблюдений (0,3–2,7 г м⁻³), поскольку пробы отбирались в начале дождевых паводков, когда реки еще не перешли с подземного на поверхностное питание.

Таблица 5.5.1

Пределы содержания суммарной взвеси (г м⁻³) в воде притоков Ладожского озера

Река	Год					
	2003	2004	2005	2006	2007	2008
Свирь	9,2–11,2	6,7–9,0	4,6–9,7	1,1–5,8	0,6–0,8	1,7–4,1
Бурная	4,8–6,0	1,7–4,0	1,8–3,7	2,7–4,2	2,1–2,7	1,8–2,1
Волхов	5,5–70,8	14,7	4,6–7,8	6,4–9,0	0,6–1,3	4,8–6,1
Янисйоки	4,6–12,3	1,8–3,5	2,3–3,1	4,9	0,3–1,0	1,4–1,6
Тулема	9,3	1,9–3,5	1,5–2,4	—	0,9–17,9	—
Видлица	15,0	2,6–4,6	2,9–3,9	—	—	—
Тулокса	10,2	4,2–5,2	3,0–7,1	—	0,3–0,6	—
Олонка	6,9–9,8	8,1–8,9	2,9–3,2	3,3	1,3–1,5	8,0–33,5
Оять	8,7–15,6	4,0–15,2	4,8–6,6	2,0–6,3	0,5–0,6	1,1–16,5
Паша	4,3–11,7	6,2–16,1	4,7–5,0	1,5–1,9	0,4–1,0	3,3–4,7
Сясь	7,0–18,1	9,4–20,1	3,9–4,0	2,0–2,1	1,0–1,8	3,4–3,5

Из трех главных притоков Ладожского озера наибольшие концентрации взвешенных веществ и диапазон их изменения наблюдаются в воде реки Волхов (0,6–70,8 г м⁻³), наименьшие

— в воде реке Бурная ($1,7\text{--}5,4 \text{ г м}^{-3}$), вероятно, в результате высокой зарегулированности ее стока.

Весной и летом 2003 г. в составе взвеси в воде всех рек преобладала органическая составляющая (50–84% и 73–90% от общей взвеси, соответственно). В сентябре количество органической взвеси изменялось от 14 до 64%. В 2004–2005 гг. процентное содержание органической взвеси в воде рек в целом снизилось и изменялось в более широких пределах (8–90%) в течение лета и осени.

Работы по изучению количества взвешенных веществ в воде Ладожского озера вошли в программу комплексных исследований, проводимых Институтом озероведения РАН с 1979 г. До этого единичные измерения на нескольких станциях продольного разреза озера были произведены В.Б. Румянцевым (Егоров и др., 1982) и Б.М. Петровым в 1962 г. (Петров, 1964). С 1979 по 1997 г. сотрудником Института озероведения РАН Е.А. Юдиным (Егоров и др., 1982; Юдин, 1987; 1992) проводились систематические наблюдения за взвесью в Ладожском озере. На этом этапе наблюдений сведения о пространственном распределении взвеси были получены на стандартном продольном разрезе, пересекающем озеро с юго-востока на северо-запад от Волховской губы до Якимварского залива. На разрезе пробы отбирались на 7 станциях на стандартных горизонтах от поверхности до дна, что дало возможность исследовать вертикальное распределение взвеси в водной толще. Кроме того, данные о распределении взвеси в поверхностном слое воды были получены в ходе комплексных съемок озера по стандартной схеме станций, охватывающих всю акваторию. Наблюдения в основном проводились в период открытой воды с мая по октябрь. Начиная с осени 2002 г. исследование режима взвешенных веществ в озере было возобновлено. Использование той же схемы станций отбора проб и методики их обработки позволяет сопоставлять данные последних лет с архивными данными и продлить многолетний ряд наблюдений.

Имеющийся многолетний ряд данных позволяет проследить изменение средних за период открытой воды значений суммарной и органической взвеси в воде Ладожского озера (рис. 5.5.1) за периоды с 1979 по 1993 г. и с 2003 по 2010 г. Средние значения суммарной взвеси за весь период наблюдений изменялись в диапазоне от $0,4 \text{ г м}^{-3}$ в 2007 г. до $2,0 \text{ г м}^{-3}$ в 2003 г. Межгодовые колебания средних концентраций взвешенных веществ зависят от изменения величины как минеральной, так и органической составляющей взвеси. Среднее за сезон содержание органической взвеси колебалось от 45 до 91% от общего содержания взвешенных веществ. В 1988–1990 гг. ее доля была особенно велика (87–91%). В 2003–2007 гг. доля органической взвеси составляла 50–70% от общего количества. Поскольку основная масса органической взвеси в озере формируется за счет продукции фитопланктона, колебание ее среднегодового содержания зависит от баланса продукционно-деструкционных процессов. В

связи с увеличением поступления фосфора в Ладожское озеро к концу 1970-х гг. выросла концентрация этого элемента в воде и резко возросла первичная продукция фитопланктона, что привело к увеличению концентрации органической взвеси. Затем, благодаря обилию пищи, численность бактерий и других организмов-деструкторов возросла, и в результате интенсивной деструкции снизилась величина органической составляющей взвеси. Поскольку минерализация органического вещества приводит к потреблению его конечных продуктов фитопланктоном, через некоторое время количество его снова растет и ситуация повторяется. Такой цикл наблюдался в 80-х – 90-х гг. прошлого века; в настоящее время отмечается падение концентрации органической взвеси после наиболее богатого 2003 г. к 2007 г., когда количество органической взвеси было наименьшим за весь период наблюдений. Возможно, что с увеличением дисбаланса продукционно-деструкционных соотношений диапазон колебаний концентрации органической взвеси будет увеличиваться.

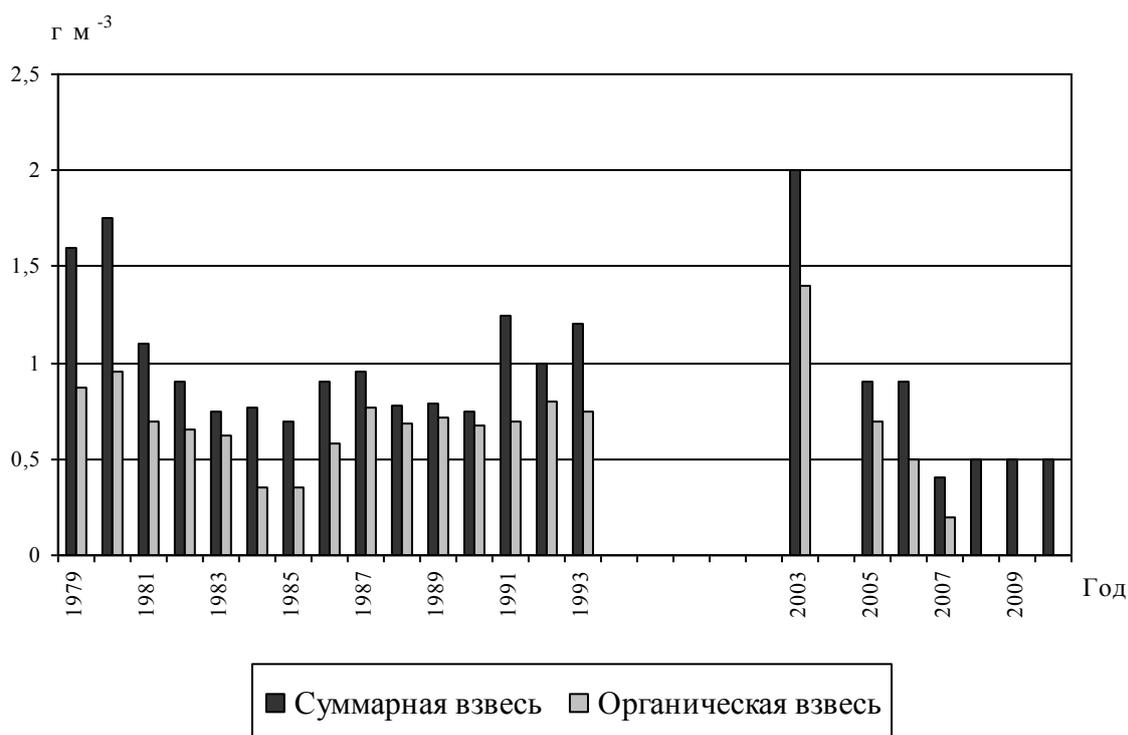


Рис.

5.5.1. Средняя за период открытой воды концентрация взвешенных веществ в воде Ладожского озера.

Содержание минеральной взвеси наиболее велико в прибрежном районе. Здесь ее количество может достигать 50–70% от общей взвеси. Основное поступление минеральной взвеси осуществляется с водой притоков. На рисунке 5.5.2 представлен график связи между

водностью года, выраженной в среднегодовом уровне Ладожского озера, и среднегодовой концентрацией минеральной взвеси. Из графика видно, что колебания среднегодовых концентраций минеральной составляющей в достаточно большой степени связаны с водностью года и изменяются со сменой фаз увлажненности.

В целом для Ладожского озера характерны следующие особенности пространственно-временного распределения взвеси. В весенний период распределение и количество взвеси во многом зависит от величины прогрева воды и местонахождения термического бара. Весенние наблюдения последних лет (2003–2009 гг.) охватили все фазы весеннего периода. В период ранней гидрологической весны (начало мая – начало июня), термический бар начинает формироваться в прибрежной зоне и находится вблизи берегов, постепенно перемещаясь в сторону увеличения глубин. В начале мая некоторый прогрев воды происходит в бухтах южного побережья озера (Волховская и Свирская губы, бухта Петрокрепость). Расположенный близко к берегу термобар препятствует распространению богатых взвешенным веществом вод притоков в глубину, также здесь

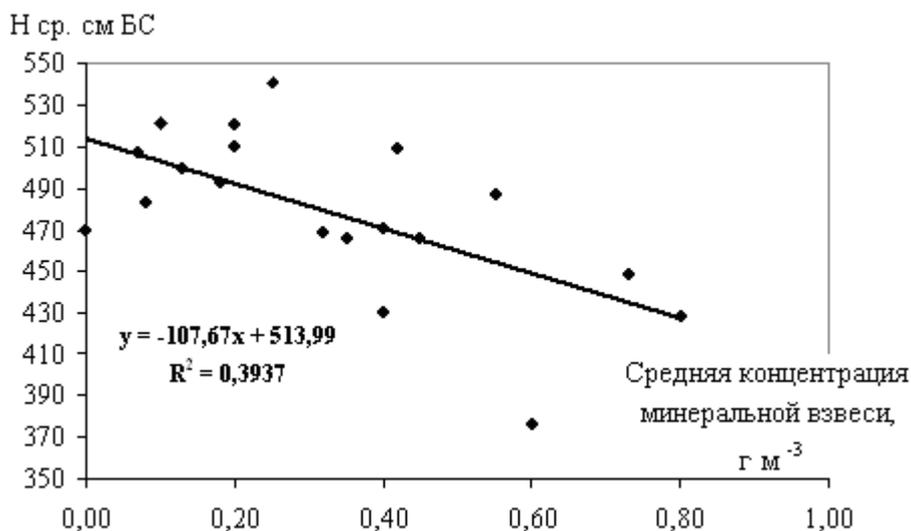
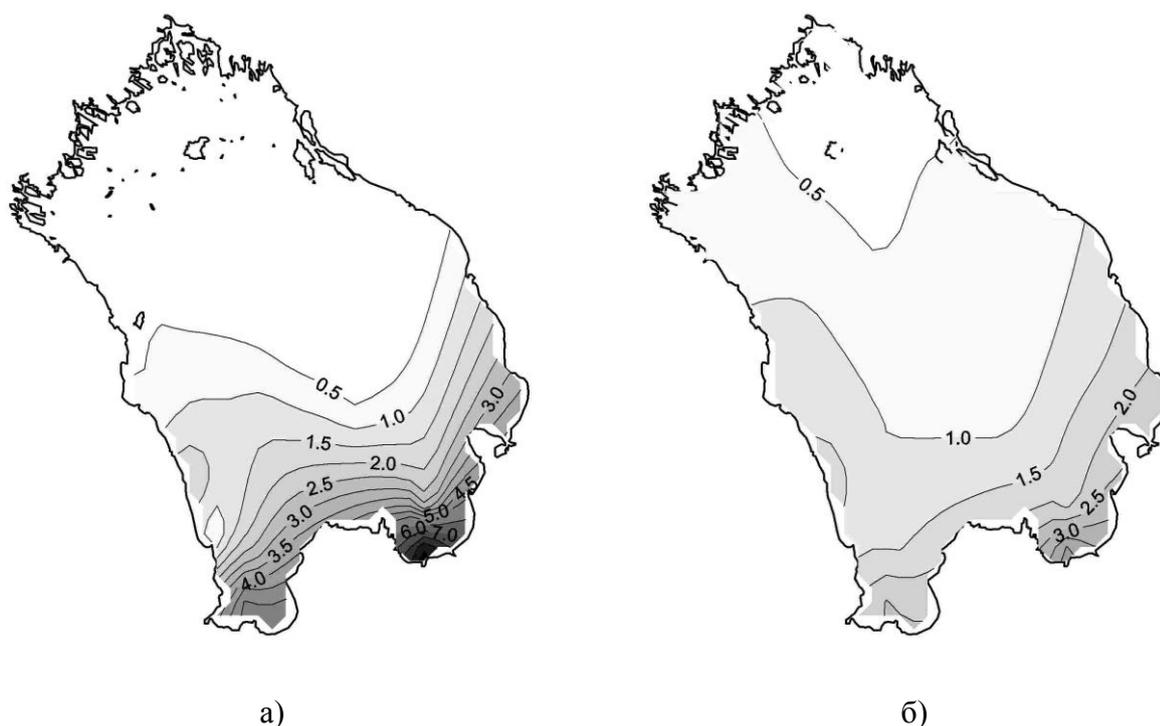


Рис. 5.5.2. Зависимость среднегодовых концентраций минеральной взвеси от водности года, выраженной в среднегодовом уровне Ладожского озера.

уже может происходить достаточно бурное развитие диатомовых водорослей. Благодаря этому ранней весной в мелководной прибрежной зоне формируется область с наибольшим количеством взвешенных веществ. Концентрации взвеси могут изменяться от 0,4 до 5,0–10,0 г м⁻³, а в мае 2003 г. в Волховской губе наблюдалась максимальная за последние годы концентрация — 37,8 г м⁻³. Вдоль западного берега эта область распространяется южнее реки Бурная, вдоль восточного берега повышенные концентрации отмечаются до острова Мантсинсаари. В первом случае перенос взвеси происходит со стоком реки Бурная, во втором

— с водами реки Свири. На большей части озера (деклинальная и глубоководные зоны) в этот период в связи с низкой температурой воды жизнедеятельность биоты также низка, поэтому количество взвеси очень мало. С возникновением вертикальных перемещений воды от поверхности до дна, вызванных свободной конвекцией, взвесь распределяется равномерно от поверхности до дна. Концентрация взвеси изменяется в глубоководной зоне от 0,1 до 0,2 г м⁻³ в поверхностном слое и от 0,2 до 0,5 г м⁻³ в придонном горизонте, в деклинальной зоне от 0,3 до 0,6 г м⁻³ на поверхности и от 0,3 до 0,8 г м⁻³ у дна.

В конце мая – июне термобар почти полностью проходит деклинальную зону, наступает период отчетливого деления всего озера на теплоактивную и теплоинертную области. В результате развития фитопланктона и поступления, вслед за продвижением термобара, богатых взвесью прибрежных вод, концентрация взвеси в деклинальной зоне увеличивается до 0,7–2,3 г м⁻³. В то же время концентрация взвеси в прибрежной зоне уменьшается и составляет 0,3–4,0 г м⁻³, только в Волховской губе она остается достаточно высокой 6,2–7,1 г м⁻³ (рис. 5.5.3, а, б).



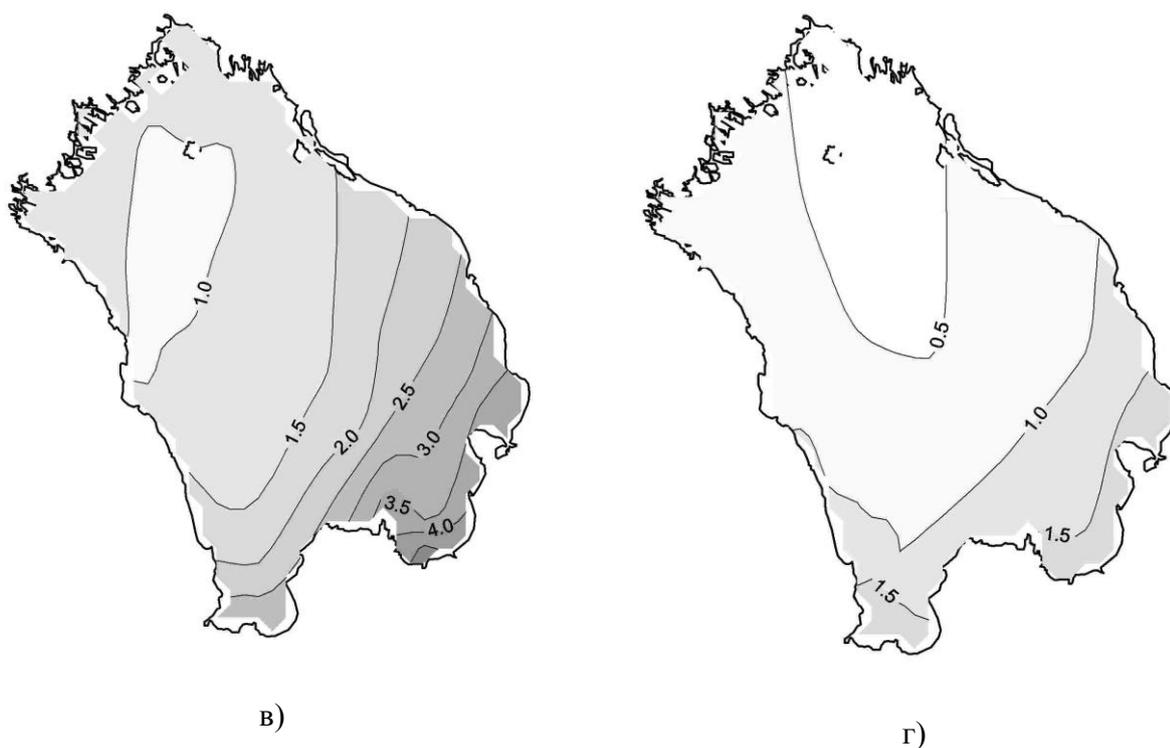


Рис. 5.5.3. Среднее распределение взвешенных веществ в поверхностном слое воды Ладожского озера, характерное для разных сезонов (а — ранняя весна, б — поздняя весна, в — лето, г — осень) (2003–2009 гг.).

Летом концентрация взвешенных веществ в прибрежной зоне остается на уровне поздневесенних значений. В воде деклинальной и глубоководных зон максимальные концентрации, связанные с развитием биоты, приурочены к слою 0–10 м и составляют в последние годы $0,7\text{--}4,3\text{ г м}^{-3}$ и $0,2\text{--}1,7\text{ г м}^{-3}$ соответственно. В слое 10–50 м концентрация взвеси не превышает $1,0\text{ г м}^{-3}$, глубже 50 м количество взвеси составляет $0,1\text{--}0,8\text{ г м}^{-3}$, при этом в последние годы (2007–2009 гг.) оно часто бывало ниже аналитического нуля (рис. 5.5.3, в). Осенью на большей части акватории (глубоководные и деклинальная зоны) количество взвеси сильно уменьшается и в условиях гомотермии распределяется равномерно от поверхности до дна, не превышая обычно $0,6\text{--}0,9\text{ г м}^{-3}$. Только в прибрежной зоне, где образование ее в большой степени зависит от влияния притоков, склонового стока и взмучивания донных отложений осенние концентрации незначительно отличаются от летних и достигают $2\text{--}6\text{ г м}^{-3}$ (рис. 5.5.3, г).

За последний период наблюдений (2003–2010 гг.) можно выделить несколько лет с аномальными концентрациями взвешенных веществ в воде озера. В мае 2003 г. наблюдалось

аномально высокое содержание взвеси в поверхностном слое основной водной массы озера (рис. 5.5.4, а). Концентрация суммарной взвеси достигала $3,3\text{--}3,8\text{ г м}^{-3}$, а органической $2,8\text{--}3,1\text{ г м}^{-3}$, что значительно превышает средние весенние значения ($0,5\text{--}0,8\text{ г м}^{-3}$). К августу количество взвешенных веществ снизилось, приблизившись к среднему, и составляло $2,1\text{--}2,3\text{ г м}^{-3}$.

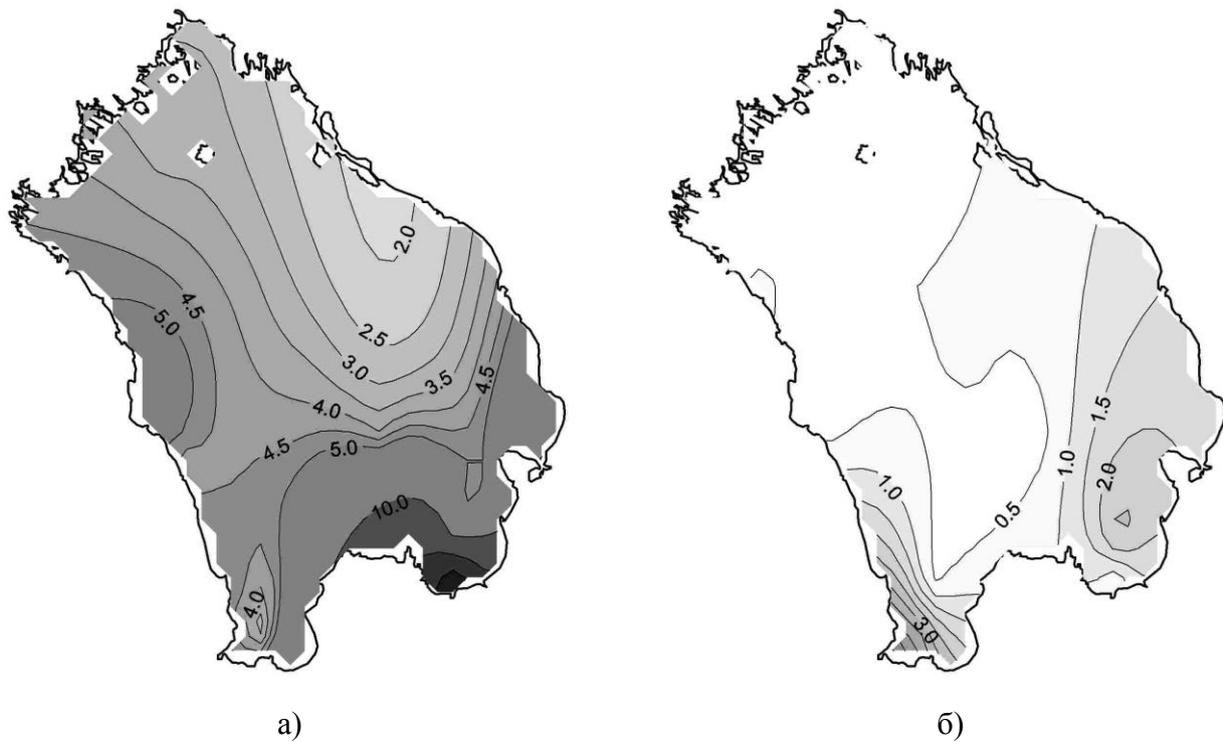


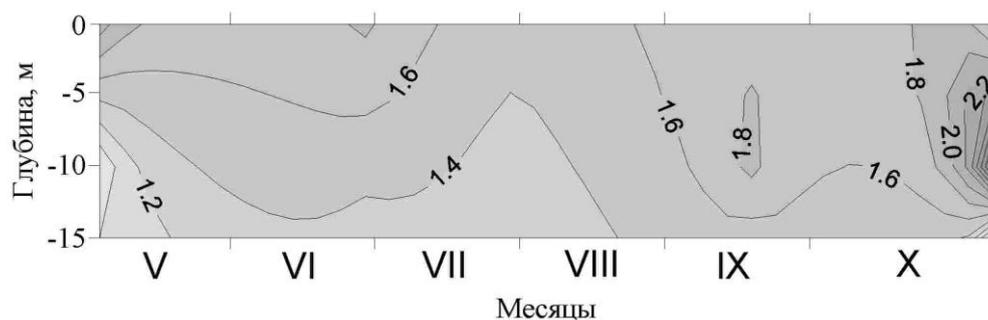
Рис. 5.5.4. Распределение взвеси в поверхностном слое воды Ладожского озера (а — май 2003 г., б — июль 2007 г.).

В июле 2007 г. (рис. 5.5.4, б) и в июле 2008 г. концентрации взвешенных веществ в воде глубоководной зоны были, напротив, значительно ниже средней многолетней величины и не превышали на поверхности $0,6\text{ г м}^{-3}$. Таким образом, не наблюдалось обычного для летнего периода повышения концентрации взвеси в поверхностном слое воды, связанного с интенсивным развитием биоты. Летом 2007 г. такое же низкое, как в глубоководной части озера, содержание взвешенных веществ от поверхности до дна наблюдалось и в дефициальной зоне ($0,2\text{--}0,6\text{ г м}^{-3}$). Снижение количества взвеси в воде озера летом 2007 и 2008 гг. можно объяснить снижением в эти года биомассы фитопланктона. По данным гидробиологических наблюдений средняя биомасса фитопланктона по продольному разрезу озера уменьшилась в 2007–2008 гг. по сравнению с 2006 г. примерно в 1,5 раза. Косвенным показателем уменьшения количества фитопланктона также могут служить более низкие значения рН в поверхностном слое воды летом в 2007 и 2008 гг. по сравнению с 2006 г. В предшествующие годы в

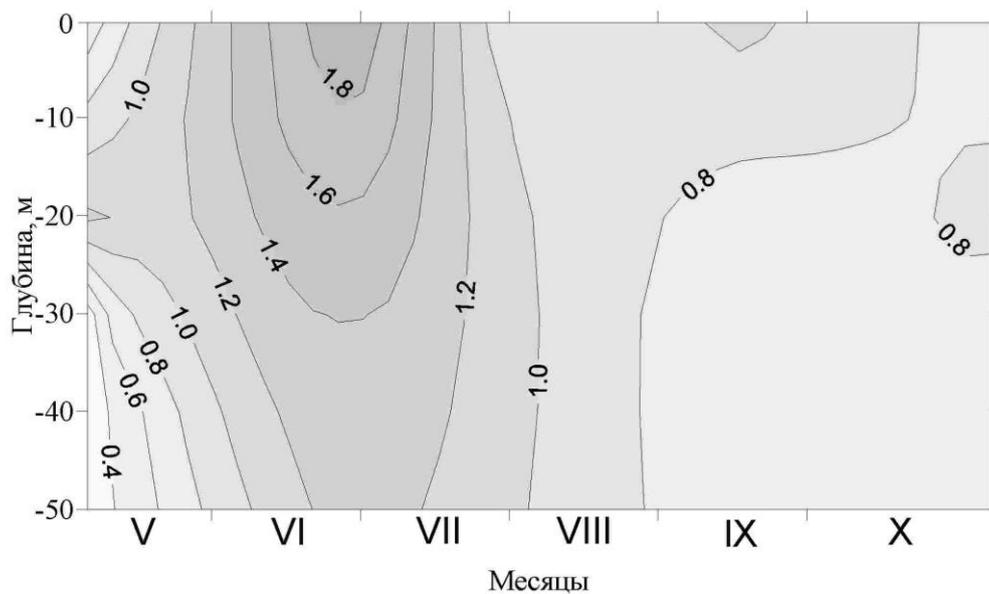
глубоководной зоне, где концентрации взвеси всегда наиболее низкие, летом они не бывали ниже $0,9-1,5 \text{ г м}^{-3}$. Осенью 2007 и 2008 гг., после очень низких летних концентраций, количество взвеси в воде основной водной массы не превышало $0,2-0,5 \text{ г м}^{-3}$ и часто оказывалось ниже аналитического нуля. Даже в воде прибрежного района, обычно богатой взвесью в течение всего периода открытой воды, средняя концентрация в эти годы составляла $1,0 \text{ г м}^{-3}$. Как уже было отмечено ранее, такое аномальное количество взвеси может быть связано с дисбалансом продукционно-деструкционных процессов в озере.

Вертикальное распределение взвешенных веществ от поверхности воды до дна имеет ряд особенностей, связанных как с сезонным ходом, так и с глубиной. На рис. 5.5.5 представлены сезонные изменения вертикального распределения взвеси в воде разных зон озера на примере 2006–2007 гг.

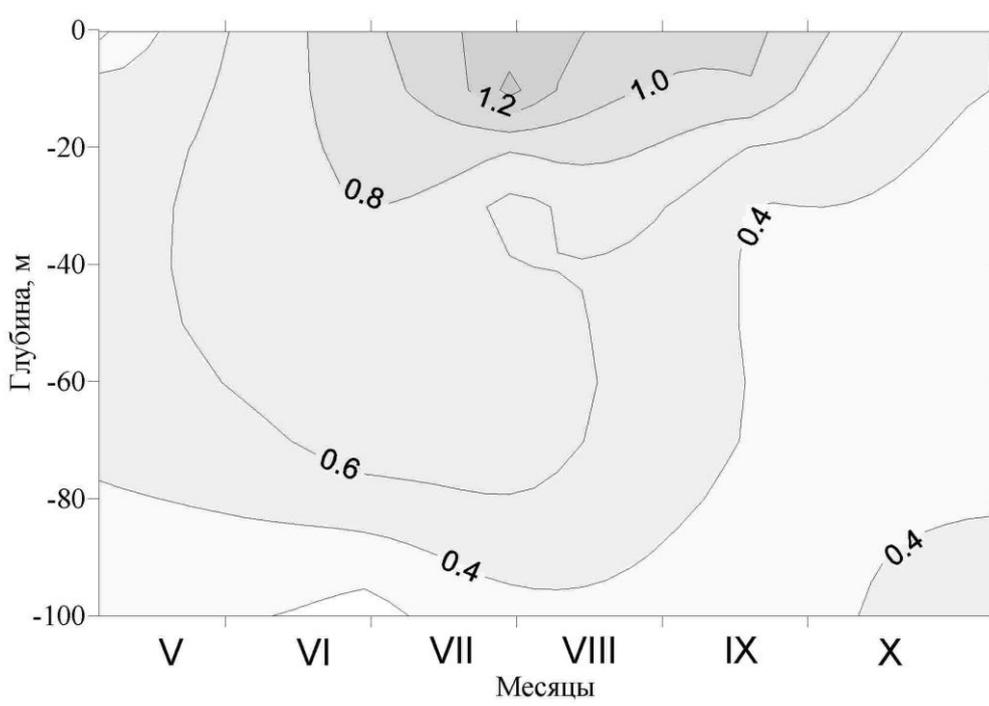
В воде мелководной прибрежной зоны взвесь обычно распределяется равномерно от поверхности до дна в течение всего года. Ее концентрации несколько возрастают осенью в период осенних штормов и взмучивания донных отложений при сильных ветрах. На процесс формирования взвеси здесь оказывают большое влияние воды притоков, значительную роль играет поверхностно-склоновый сток, особенно во время половодья и дождевых паводков. Хороший прогрев воды в весенне-летний период приводит к развитию большого количества фитопланктона практически по всему столбу воды. Примерно до второй половины мая термический бар не дает взвеси распространяться из прибрежной зоны в сторону глубоководной части озера.



а)



б)



в)

Рис. 5.5.5. Сезонное вертикальное распределение взвешенных веществ в воде озера (июнь 2006 г. – май 2007 г.) а — прибрежная зона, б — деklinальная зона, в — глубоководная зона.

Для деklinальной зоны характерно существование устойчивого, ярко выраженного в весенний период фронта термического бара. При его прохождении за счет нисходящих движений воды происходит вовлечение с поверхности в придонные горизонты взвешенных веществ аллохтонного и автохтонного происхождения, поэтому в июне – начале июля наблюдается равномерное повышенное содержание взвешенных веществ от поверхности до дна, и в придонном горизонте деklinальной зоны в июне взвеси почти столько же, сколько на

поверхности ($1,3\text{--}1,5 \text{ г м}^{-3}$). В сентябре содержание взвешенных веществ у дна заметно снижается по сравнению с июнем ($0,6\text{--}0,7 \text{ г м}^{-3}$), хотя на поверхности концентрации остаются в пределах $1,1\text{--}1,3 \text{ г м}^{-3}$.

Таким образом, повышение концентрации взвешенных веществ в придонном горизонте, возможное в начале лета, в конце лета уже полностью исчезает. После исчезновения термобара и формирования слоя температурного скачка образующаяся в поверхностном слое воды в результате продукционной деятельности фито- и зоопланктона взвесь не может опуститься на дно. Осенью и ранней весной в связи с низкой продуктивностью биоты количество взвешенных веществ заметно уменьшается и в условиях гомотермии распределяется равномерно по всему водному столбу. В глубоководной зоне характер сезонного распределения взвешенных веществ по вертикали аналогичен ее распределению в деklinальной зоне. Разница заключается в том, что концентрация взвеси, вовлекаемой в начале лета в нижние горизонты воды при прохождении термобара, ниже, т. к. влияние берега здесь практически не сказывается. Основное количество взвеси в течение летнего периода сосредоточено на поверхности в слое воды $0\text{--}10 \text{ м}$, часть взвеси может опускаться примерно до глубины 25 м (средняя глубина слоя скачка).

На рис. 5.5.6 представлен сезонный ход вертикального распределения взвешенных веществ в воде глубоководной центральной части озера, построенный с использованием данных за многолетний период наблюдений с 1979 по 1997 г. и с 2002 по 2007 г.

Таким образом, наблюдения за содержанием взвешенных веществ в воде Ладожского озера показывают, что наибольшие ее концентрации в течение всего года характерны для мелководной прибрежной зоны, особенно для ее южной части — Волховской и Свирской губ и залива Петрокрепость. В воде глубоководной зоны озера количество взвешенных веществ очень мало, за исключением короткого летнего периода, когда концентрация взвеси в слое воды $0\text{--}10 \text{ м}$ растет благодаря интенсивному развитию фитопланктона. Однако, в последние годы (2007–2009 гг.) необычно низкое содержание взвеси в воде основной водной массы (включая поверхностный слой) в летний период привело к тому, что средние за период открытой воды концентрации оказались наиболее низкими для всего периода наблюдений начиная с 1979 г.

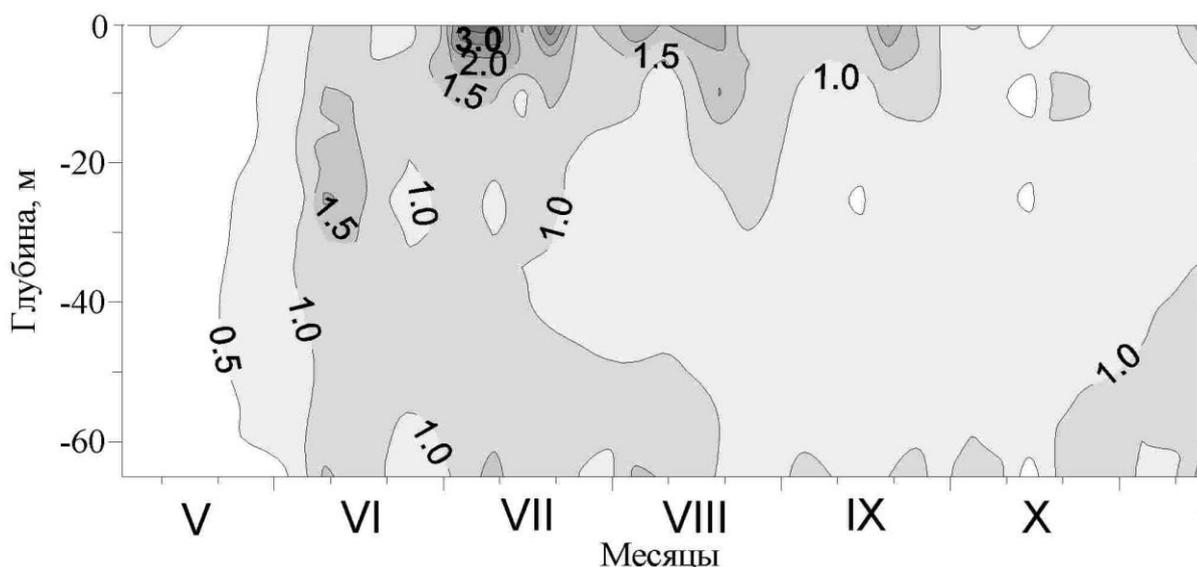


Рис. 5.5.6. Среднее сезонное вертикальное распределение взвеси в воде центральной части Ладожского озера за многолетний период (1979–1997 гг. и 2002–2007 гг.).

Важное значение для исследования процессов переноса и накопления загрязнений в донных отложениях имеет информация о гранулометрическом составе мельчайших фракций донных отложений и взвешенных веществ размером много менее одного микрометра (Поздняков, 2011). С уменьшением размера твердых частиц их сорбционная способность по отношению к различным химическим соединениям, в том числе загрязняющим, существенно возрастает. В этой связи безусловный интерес представляют результаты анализа гранулометрического состава озерных взвесей в пробах воды, отобранных из придонного горизонта в 2010–2011 гг. В качестве примера, на рис. 5.5.7 приведен гранулометрический состав озерных взвесей на станциях 51 и 73, расположенных в восточном районе акватории озера. Для гистограмм распределения гранулометрического состава взвешенных частиц в воде Ладожского озера характерна одномодальность. Двумодальное распределение по крупности встречается менее чем в 10% всех проанализированных проб воды.

Размеры взвешенных частиц в подавляющем большинстве проанализированных проб придонной воды Ладожского озера составляют от 70 до 950 нм, при этом основной диапазон значений заключен в интервале 250–450 нм. В соответствии с «Методическими рекомендациями по выявлению наноматериалов, представляющих потенциальную опасность для здоровья человека (МР 1.2.2522-09)», частицам данного размера присвоен нулевой балл опасности. Тем не менее, на отдельных станциях обнаружены взвешенные частицы, размеру которых присвоен I балл опасности в соответствии с указанными рекомендациями.

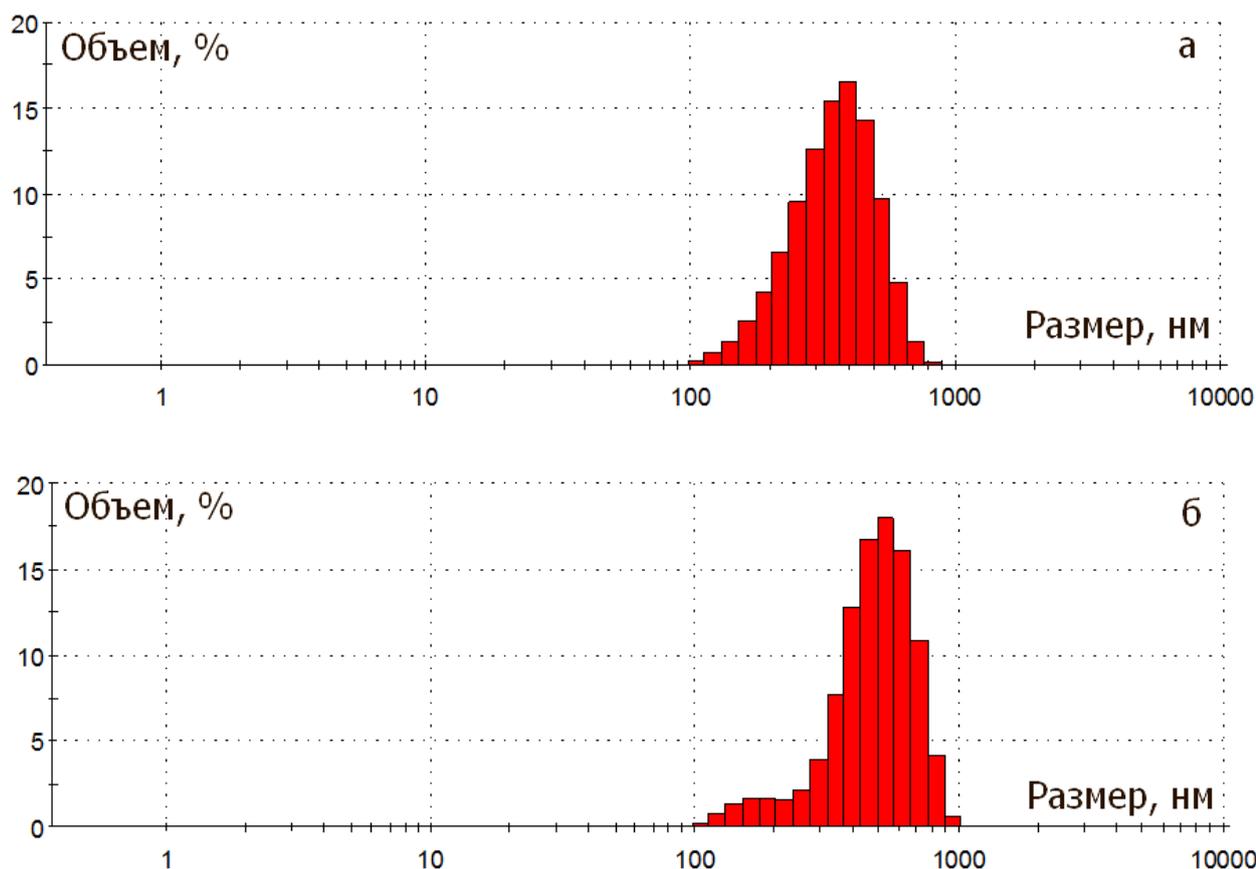


Рис. 5.5.7. Гранулометрический состав взвешенных наносов в пробах воды на станциях 51 (а) и 73 (б).

5.6. Металлы

Металлы относятся к числу наиболее активных компонентов природных вод. Их химическая и биологическая активность, а также степень токсичности определяются не столько валовыми концентрациями, сколько физико-химическим состоянием в водной среде. Обычно в природных водах выделяют следующие формы металлов: взвешенную, растворенную, свободную (ионную), связанную в комплексы. Считается, что свободные ионы металлов наиболее токсичны для гидробионтов, а закомплексованные металлы, особенно связанные с органическими соединениями естественного происхождения (например, гумусовыми кислотами), рассматриваются как нетоксичные или менее токсичные, легко усваиваются организмами и участвуют в биохимических процессах. Различное состояние металлов обусловлено физико-химическими, биологическими и гидродинамическими параметрами водной среды.

Первые единичные сведения о содержании некоторых металлов (Fe, Mn, Cu, Zn, Al, Ni, Ti) в водах главных притоков Ладоги и в воде озера относятся к 1959–1962 гг. Наиболее полно в этот период изучалось соотношение концентраций Fe^{2+} и Fe^{3+} . Было установлено, что в речных водах преобладает Fe^{2+} , в озерных — Fe^{3+} . В те же годы было установлено, что высокая

миграционная способность железа обусловлена образованием комплексов Fe с гумусовыми кислотами, которыми богаты поверхностные воды. Такие комплексы хорошо растворимы в воде, устойчивы к окислению и коагуляции. При смешении речных вод с озерными происходит уменьшение концентрации гумусовых кислот, что влечет за собой разрушение комплексов и выпадение в осадок значительной части растворенного железа. По этой причине концентрация железа в воде озера значительно меньше, чем в водах притоков (Соловьева, 1967; Расплетина и др., 1967).

С 1982 г. в Институте озероведения РАН проводятся систематические наблюдения за содержанием и распределением железа, алюминия, марганца, меди, цинка, свинца в воде притоков Ладожского озера, реки Нева и в воде озера, иногда определяются также кадмий и кобальт. Продолжены работы по изучению особенностей миграции металлов и исследованию форм их нахождения в природных водах (Черных, Петрова, 2002). Содержание металлов определялось в нефилтрованных пробах воды методом атомной абсорбции на оборудовании фирмы Perkin-Elmer (до 2004 г.) и анализаторе Квант-Z.ЭТА (после 2004 г.).

Основным источником металлов в воде озера являются притоки, при этом наибольшую роль в поступлении металлов в озеро играют главные реки бассейна (Волхов, Свирь, Вуокса), которые поставляют Fe — 75%, Al — 86%, Mn — 83%, Cu — 82%, Pb — 86% от общего речного поступления каждого из металлов (Черных, Петрова, 2002). В химическом составе вод притоков преобладающим среди металлов является железо, концентрации алюминия и марганца ниже, наименьшие концентрации у меди, кобальта и свинца. В табл. 5.6.1 представлено содержание Fe, Al, Mn и Pb в воде притоков озера в 2001–2005 гг.

Таблица 5.6.1

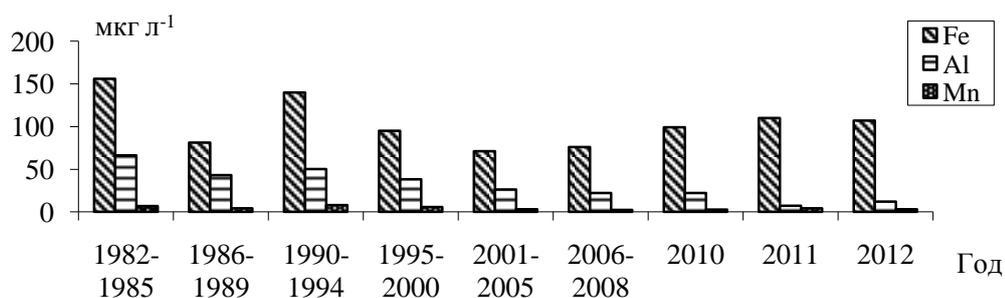
Пределы концентраций металлов (мкг л⁻¹) в воде притоков Ладожского озера в 2001–2005 гг.

Река	Fe	Al	Mn	Pb
Свирь	170–960	52–272	22–87	0,2–1,2
Бурная	101–378	64–237	9–63	0,2–3,2
Волхов	360–1900	56–905	78–400	0,3–3,5
Янисйоки	367–795	20–254	10–82	0,1–2,0
Тулема	518–788	127–338	20–98	0,5–2,0
Видлица	580–860	40–130	49–187	0,6–4,7
Тулокса	1280–1756	36–344	65–187	0,7–3,8
Олонка	753–2209	46–397	64–210	0,2–4,4
Оять	502–2186	18–423	60–295	0,2–1,6
Паша	447–1530	31–410	53–118	0,2–1,8
Сясь	526–1754	43–392	50–167	0,2–5,0

Воды рек Бурная и Свирь, водосборы которых расположены в зоне распространения кристаллических пород, и сток которых зарегулирован, характеризуются более низкими концентрациями металлов. В большей степени обогащены металлами воды реки Волхов и рек частного водосбора восточного и южного побережий (Олонка, Тулокса, Сясь, Паша, Оять), водосборы которых слагаются мощной толщей четвертичных отложений, залегающих на осадочных породах. Кроме того, в бассейнах этих рек имеется довольно большой процент заболоченных территорий, а водосборы Волхова и Сяси подвержены интенсивной хозяйственной деятельности. В воде этих двух рек зафиксированы самые высокие среднегодовые концентрации Al, Cu и Co.

Особенностью сезонных изменений концентраций железа в воде рек бассейна Ладожского озера является наличие двух максимумов его содержания — зимой и летом. У алюминия и марганца максимальные концентрации отмечаются весной, минимальные — летом. Сезонная изменчивость меди и свинца выражена недостаточно четко. Межгодовая изменчивость в содержании металлов обусловлена ландшафтными особенностями их миграции и различной водностью лет (Расплетина и др., 1987).

В химическом составе воды Ладожского озера преобладающим в количественном отношении среди металлов является железо, концентрация алюминия, в среднем, в 2–3 раза ниже, а содержание марганца примерно на порядок ниже, чем алюминия. Содержание этих элементов широко варьирует по акватории озера. Диапазон концентраций меди и свинца более узок. На рис. 5.6.1 представлены значения средних для озера концентраций железа, алюминия, марганца, меди и свинца в течение последних трех десятилетий. Наибольшая межгодовая изменчивость свойственна алюминию, наименьшая — железу, экстремальные значения концентраций этих металлов в тридцатилетнем ряду наблюдений отличаются, соответственно, в 9 и в 2 раза. Среднее содержание остальных металлов варьировало в течение этого периода в 4–5 раз. Межгодовая изменчивость содержания металлов в воде связана в основном с изменениями величин внешнего поступления металлов в озеро.



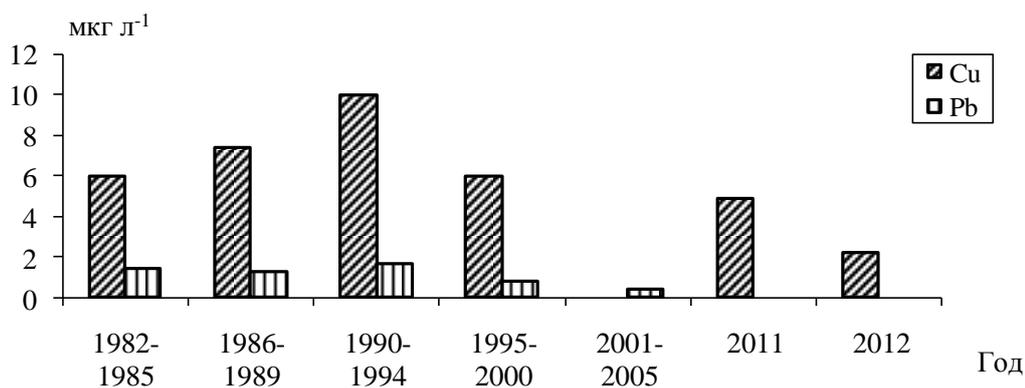


Рис. 5.6.1. Межгодовая изменчивость содержания металлов (Fe, Al, Mn, Cu и Pb) в воде Ладожского озера (средневзвешенные концентрации).

Неравномерность распределения микроэлементов в водной массе озера обусловлена местонахождением источников их поступления и гидродинамическим режимом водоема. Повышенные концентрации этих веществ приурочены, в основном, к районам впадения вод крупных притоков, а также промышленных и хозяйственно-бытовых сточных вод. На рис. 5.6.2 способом ареалов представлено распределение металлов в водной массе Ладожского озера (по материалам исследований Института озероведения РАН и ВНИИОкеангеология). Поскольку концентрации меди и свинца в поверхностном слое воды достаточно однородны, распределение этих металлов представлено по лимническим зонам.

Почти постоянно повышенными концентрациями железа, алюминия и марганца и наибольшей их изменчивостью характеризуются воды прибрежной зоны, находящейся под прямым влиянием вод притоков. Наиболее высокие концентрации металлов отмечаются на участке прибрежной зоны, находящейся под влиянием вод южных притоков озера, в первую очередь, Волхова. Поэтому в зоне, примыкающей к устью Волхова (станции 1 и 4), наблюдаются максимальные концентрации металлов (рис. 5.6.2 и табл. 5.6.2). Влияние притоков сказывается и на деklinальной зоне, где верхние пределы и средние концентрации металлов достаточно высоки. Воды профундальной и ультрапрофундальной зон характеризуются более низкими концентрациями железа, алюминия, марганца и свинца, при этом содержание этих металлов здесь отличается наименьшей изменчивостью (табл. 5.6.2). Как видно из таблицы, наибольшие внутригодовые изменения характерны для содержания железа, особенностью сезонной динамики которого является существенный рост в водах прибрежной и деklinальной зон в весенний период. Отчетливых сезонных различий в содержании остальных изученных металлов не прослеживается.

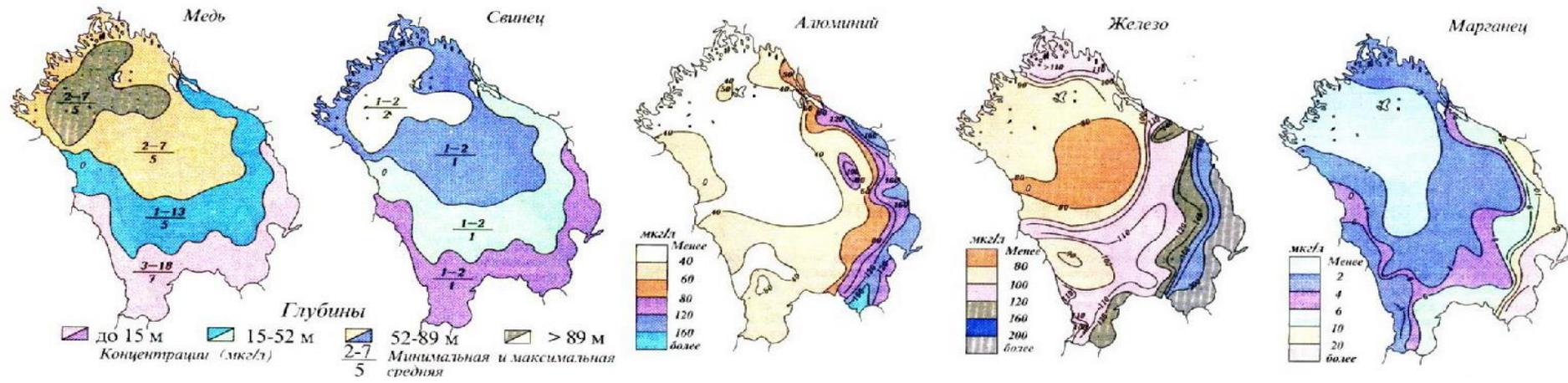
Таблица 5.6.2

Пределы концентраций металлов (мкг л⁻¹) в воде Ладожского озера в 2008 г.

Сезон	Зона озера	Fe	Al	Mn	Cu	Zn
Весна	Прибрежная	107–516 (1180)	44–69	2,1–12,4 (19,6)	2,3–10,4 (16,7)	6,3–12,3
	Деклиналичная	55–329	14–76	1,4–20,1	2,4–7,4	8,5–26,6
	Профундальная + Ультрапрофундальная	56–100	13–26	0,9–2,5	2,0–4,7	3,9–11,4
	Все озеро	55–516	13–76	0,9–20,1	2,0–10,4	6,3–26,6
Лето	Прибрежная	29–128 (316)	24–67	2,0–7,3 (15,1)	4,0–11,4 (25,0)	5,0–12,0 (19,5)
	Деклиналичная	55–151	16–34	2,6–8,8	—	5,6–10,5
	Профундальная + Ультрапрофундальная	56–96	13–23	0,8–3,0	2,7–6,7	5,1–7,6
	Все озеро	29–128	13–67	0,8–8,8	2,7–11,4	5,0–12,0
Осень	Прибрежная	74–182 (798)	20–84 (171)	1,3–20,1 (62,1)	2,0–6,1 (19,5)	2,5–11,6
	Деклиналичная	16–157	19–46	1,0–18,9	1,3–5,5	2,0–24,2
	Профундальная + Ультрапрофундальная	57–116	20–36	1,0–2,7	2,0–5,2	2,6–8,1
	Все озеро	16–182	19–84	1,0–20,1	1,3–6,1	2,0–24,2

Примечание: в скобках указаны концентрации на станции 1 в Волховской губе.

В поверхностном слое воды



В придонном слое воды

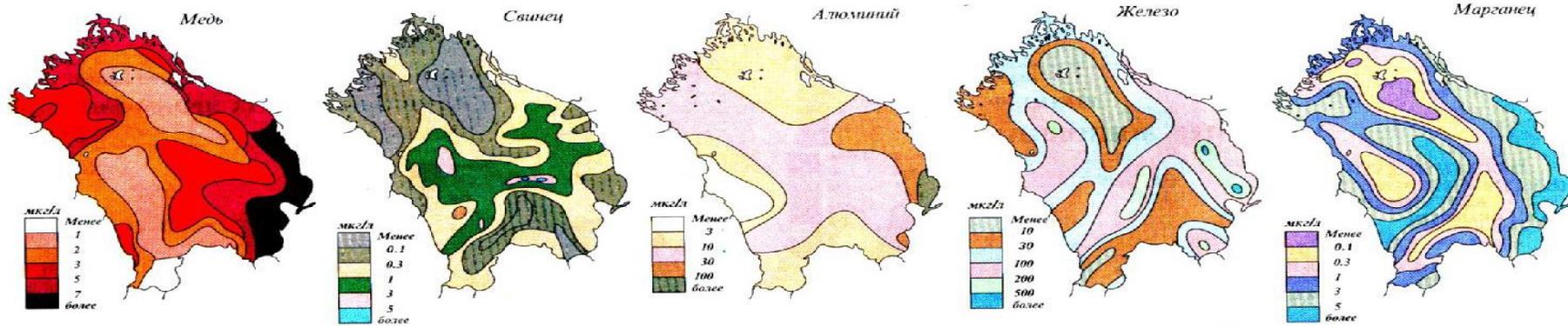


Рис. 5.6.2. Распределение металлов в водной массе Ладожского озера.

Межгодовая изменчивость концентраций металлов по акватории озера определяется как неоднородностью поступления их с водосбора, так и гидродинамическими условиями в озере. Так, 2008 г. выделяется в представленном в табл. 5.6.3 трехлетнем периоде исследований повышенным содержанием железа в воде всех лимнических зон, превышающим в 1,4–1,8 раза значения 2006–2007 гг., а концентрации алюминия и марганца в эти годы были близки между собой. В связи с тем, что на долю профундальной и ультрапрофундальной зон приходится почти 80% объема озера, можно считать наблюдаемые в этих зонах концентрации металлов средними для водоема. Средние концентрации железа, алюминия, марганца, цинка и меди в воде озера в 2008 г. представлены в табл. 5.6.4.

Таблица 5.6.3

Средние концентрации металлов (мкг л^{-1}) в воде Ладожского озера в летний период
в 2006–2008 гг.

Зона озера	Fe			Al			Mn		
	2006	2007	2008	2006	2007	2008	2006	2007	2008
Прибрежная	72	72	119	33	36	36	4,4	7,8	6,0
Деклиналичная	58	41	79	27	23	22	3,8	2,9	2,6
Профундальная + Ультрапрофундальная	43	38	69	24	18	17	1,6	1,7	1,7

Таблица 5.6.4

Средние концентрации металлов (мкг л^{-1}) в воде Ладожского озера в 2008 г.

Зона озера	Fe	Al	Mn	Zn	Cu
Прибрежная	143	38	6,0	8,5	7,2
Деклиналичная	88	27	4,3	7,6	4,2
Профундальная + Ультрапрофундальная	82	21	1,6	5,3	3,5

5.7. Нефтяные углеводороды

Нефть и нефтепродукты представляют собой сложную и непостоянную по составу смесь многих химических соединений, от 70 до 98% суммарной массы которых составляют углеводороды различных классов (алифатические, алициклические, ароматические), и небольшую долю — их производные, содержащие кислород, серу и азот. Понятие «нефтепродукты» условно принято ограничивать углеводородной фракцией (Руководство..., 1977, Савинова, 1990).

Нефтяные углеводороды (НУВ) — органические соединения двойственной природы, значительная часть которых имеет биогенное происхождение и широкое распространение в окружающей среде, но в условиях возрастающего техногенного воздействия их поступление в поверхностные воды из антропогенных источников все время увеличивается таким образом, что уровень загрязнения природных вод НУВ стал сопоставим с их естественным содержанием. Нефтяные углеводороды отнесены к приоритетным видам загрязняющих природных воды веществ, которые способны оказывать разностороннее отрицательное воздействие как на физико-химические и гидрохимические условия водоемов, так и на биоценозы. Наибольшей токсичностью обладают ароматические углеводороды, содержание которых в сырой нефти составляет по сведениям из разных источников 2–40 % (Савинова, 1990) и 16,5–21,9 % (Бандман, 1990). Кроме того, НУВ способны экстрагировать и концентрировать другие загрязняющие вещества (металлы, полициклические ароматические углеводороды (ПАУ) и т. д.), усиливая таким образом их действие и продлевая время их существования в растворенной фазе. В результате биологической и химической деградации НУВ образуются не менее токсичные нафтеновые кислоты, фенолы, эфиры, карбонильные соединения, обладающие высокой растворимостью в воде вследствие своей полярности (Филов и др., 1990).

Нефтяные углеводороды присутствуют в отходах различных отраслей промышленности от нефтехимии, металлургии и органического синтеза до фармацевтической промышленности. Спектр их применения очень широк: газообразные и жидкие НУВ используются в качестве топлива на транспорте, жидкие — в качестве разбавителей и растворителей в резиновой и обувной промышленности, очистителей в текстильном, кожевенном и мебельном производстве; твердые алканы применяются в бумажной, текстильной, полиграфической, кожевенной, лакокрасочной промышленности, а также при производстве поверхностно-активных веществ, кормовых белков, в медицине и т. д. Из литературных источников известно, что кроме различных видов катастрофических сбросов нефти в природные воды, на долю которых приходится 46% поступления НУВ, остальные 54% поступления распределяются следующим

образом: 28% — с речными водами, 11% — с промышленными и бытовыми стоками, 10% — из атмосферы, 5% — с ливневыми стоками с городских территорий. (Савинова, 1990).

В исследованиях ИНОЗ РАН концентрации НУВ определялись методом ИК-спектроскопии в интервале 3,3–3,6 мкм после экстракции углеводов из воды четыреххлористым углеродом и отделения от полярных фракций в хроматографической колонке с окисью алюминия (Руководство..., 1977).

Нефтяные углеводороды в воде притоков озера. Поскольку главная роль в формировании химического состава воды Ладожского озера принадлежит речному стоку, дающему 87% приходной части водного баланса (Расплетина, 1982), речной сток является одним из главных источников поступления НУВ в Ладожское озеро. В притоки озера НУВ поступают с промышленными, хозяйственно-бытовыми стоками, от наземного и водного транспорта, с поверхностно-склоновым стоком в периоды паводков.

Содержание НУВ в воде притоков и последующее поступление их в озеро подвержено сезонной изменчивости и межгодовым изменениям, вызванным колебаниями уровня многолетнего водного стока и антропогенной нагрузки на водосбор (рис. 5.7.1).

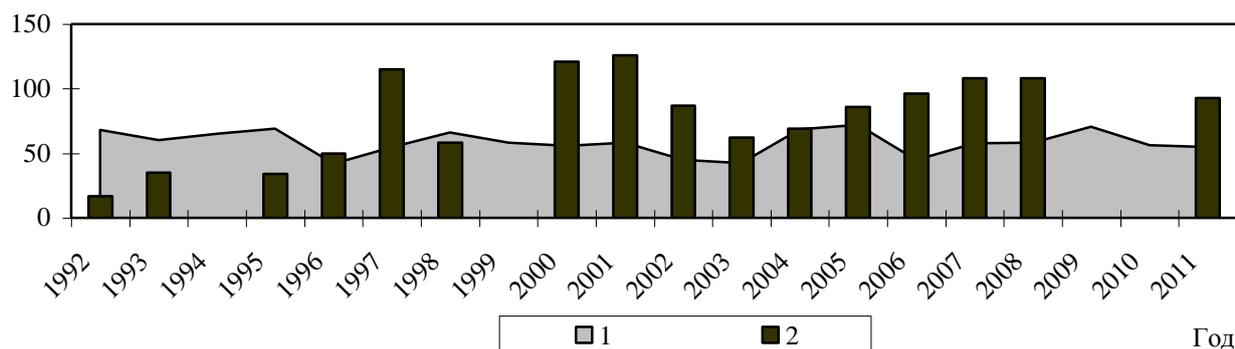


Рис. 5.7.1. Многолетние изменения концентрации НУВ (среднее значение для трех главных притоков озера — рек Волхов, Бурная, Свирь) на фоне колебаний водного стока.

1 — колебания водного стока, км³ год⁻¹; 2 — средняя концентрация НУВ, мкг л⁻¹

По данным наблюдений речной вынос НУВ в озеро в период с 1993 до 2000–2001 гг. увеличился в три раза и превысил 6 тыс. т год⁻¹ к 1997–2000 гг., а в 2001 г. достиг максимальной величины около 8 тыс. т год⁻¹. Так же менялся вынос НУВ из озера, приблизившийся к уровню 10 тыс. т год⁻¹ в 2000 г. (рис. 5.7.2). Последующие изменения выноса НУВ реками в озеро и из озера после 2001 г., согласующиеся с колебаниями водного стока, вызваны в большей мере гидрологическими причинами, чем уменьшением техногенной нагрузки НУВ на водосборе.

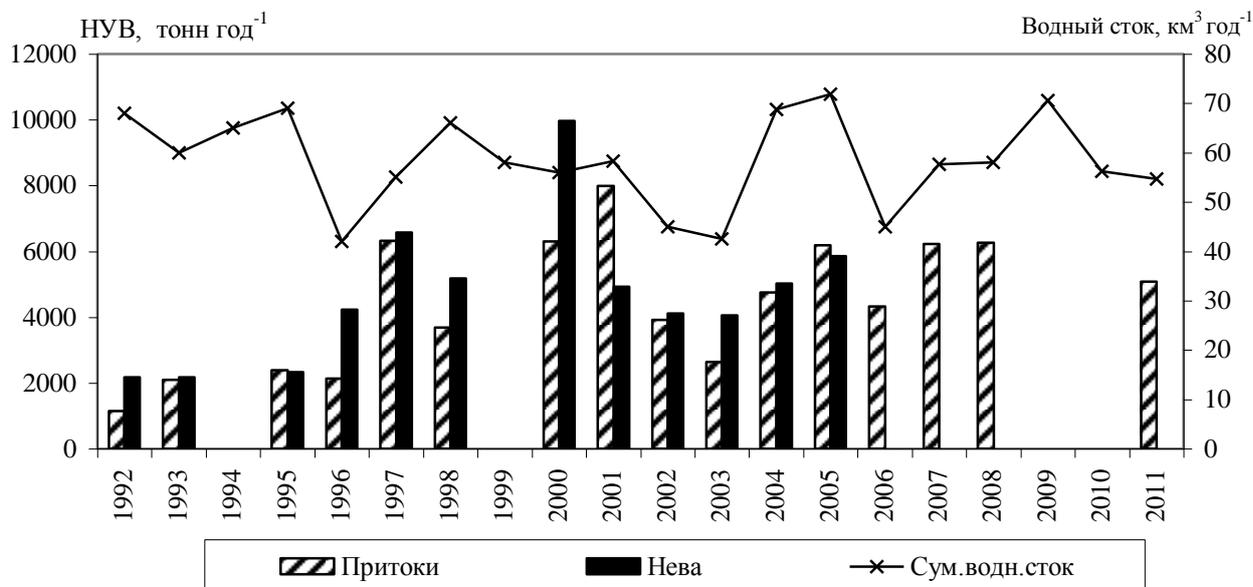


Рис. 5.7.2. Межгодовые изменения поступления/выноса НУВ речными водами на фоне колебаний суммарного водного стока притоков в озеро.

Наиболее высокие уровни НУВ в воде притоков обычно наблюдаются в период весеннего половодья в результате накапливания их на водосборе в холодный период и смыва в водотоки талыми водами. Высокие концентрации в осенне-зимнее время обусловлены как осенними дождевыми паводками, так и высокой вероятностью промышленных сбросов в водотоки и низкой скоростью деградации НУВ в воде в холодный период. Наиболее низкое содержание НУВ в воде притоков бывает чаще всего в период летней межени. Соответственно, поступление НУВ в озеро возрастает до максимума в начале теплого периода года в связи с увеличением выноса НУВ притоками, интенсификацией судоходства и активизацией атмосферного переноса, а минимальное наблюдается, как правило, летом, что обусловлено низкими объемами водного стока и высокими скоростями химического и биохимического разложения НУВ в теплый период. Наиболее высокие объемы выноса НУВ из Ладожского озера рекой Нева отмечены в период весеннего паводка, наиболее низкие — в период зимней межени. Особенности сезонной изменчивости суммарного поступления НУВ с водой притоков в Ладожское озеро и выноса рекой Нева представлены на рис. 5.7.3, где диаграмма 1) построена по данным 1992–1995 гг., а 2) — по данным 2000 г. Сезонные изменения выноса НУВ в озеро главными притоками (1996–1998 гг.) отражены на диаграмме 3).

Из притоков озера основными источниками поступления НУВ являются реки Вуокса (Бурная), Волхов и Свирь, доля выноса НУВ которыми достигает 94% в суммарном речном притоке в озеро. Индивидуальный вклад притоков в процентном выражении в общем речном выносе НУВ в озеро в период 1996–2000 гг. представлен на рис. 5.7.4.

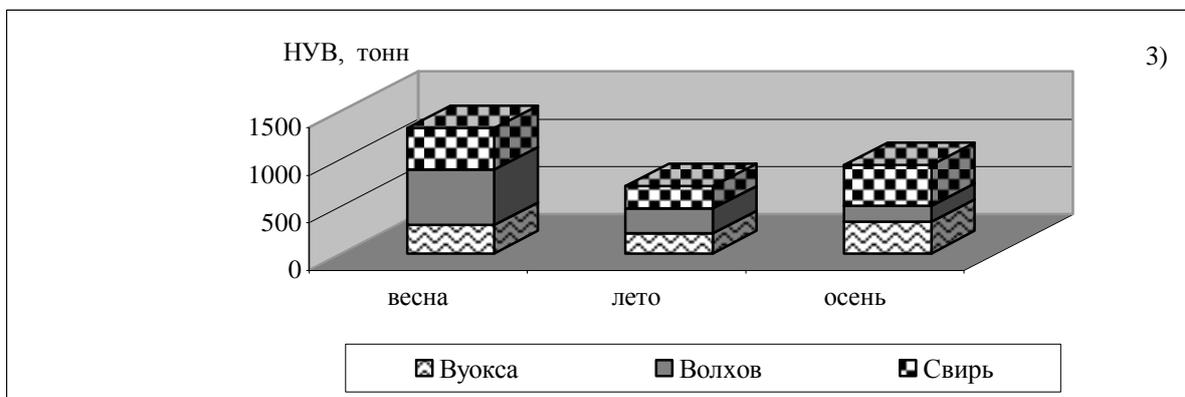
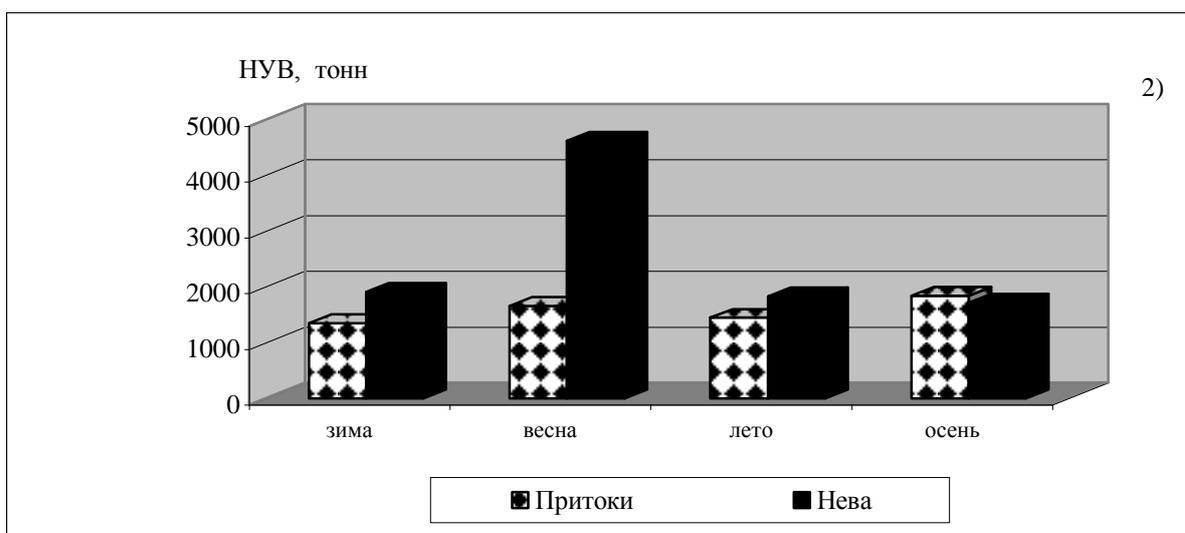
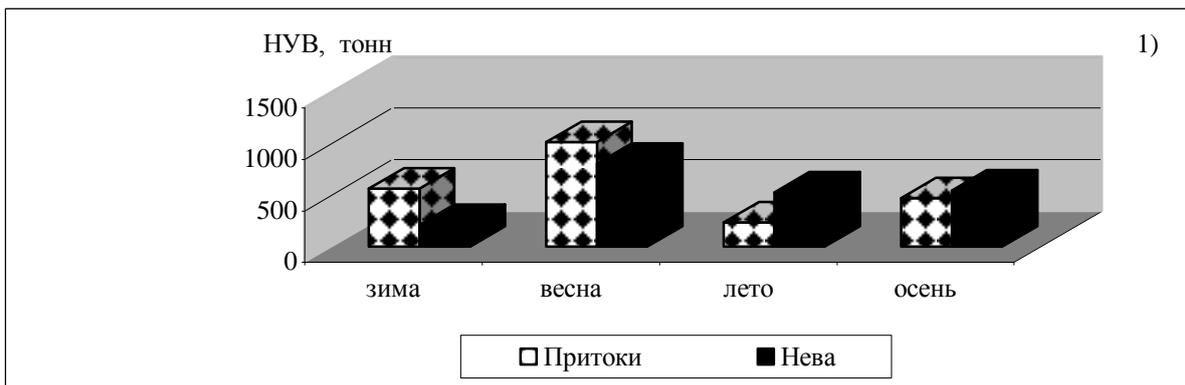


Рис. 5.7.3. Сезонные особенности поступления НУВ в озеро с водой притоков и выноса реки Нева. 1) 1992–1995 гг.; 2) 2000 г.; 3) 1996–1998 гг.

Нефтяные углеводороды в воде Ладожского озера. Как упоминалось выше, в Ладожское озеро НУВ поступают с речными водами, с промышленными и хозяйственно-бытовыми сточными водами, от водного и наземного транспорта, с поверхностно-

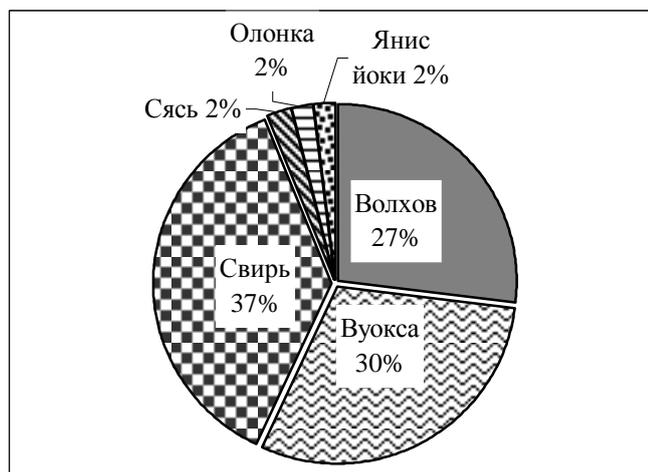


Рис. 5.7.4. Доли отдельных притоков (в %) в суммарном речном выносе НУВ в Ладожское озеро.

склоновым стоком во время паводков и из атмосферы. Многолетний ряд изменения средневзвешенных значений концентрации НУВ в поверхностном слое воды Ладожского озера представлен на рис. 5.7.5.

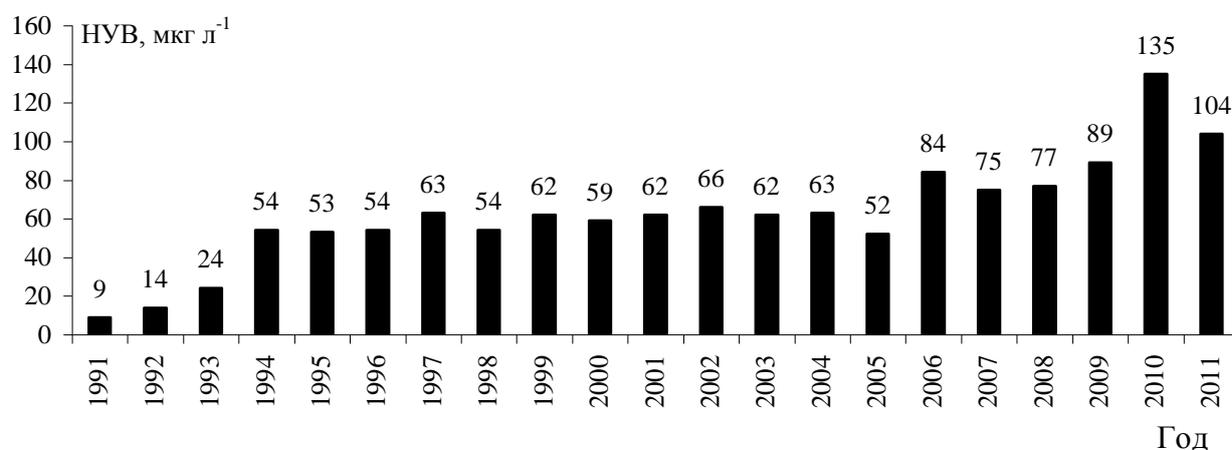


Рис. 5.7.5. Межгодовые изменения средневзвешенной концентрации НУВ в поверхностном слое воды Ладожского озера.

В период с 1991 по 2011 г. наблюдалось увеличение содержания НУВ в поверхностном слое воды озера от 9 мкг л⁻¹ в 1991 г. до 104 мкг л⁻¹ в 2009 г. (с относительным максимумом 135 мкг л⁻¹ в 2010 г.). При этом до 1994 г. значения НУВ в основном не превышали предельно допустимой концентрации для рыбохозяйственных водоемов (50 мкг л⁻¹), а самые высокие концентрации НУВ отмечались эпизодически в прибрежной зоне озера вблизи устьев рек и локальных источников загрязнения. После 1994 г. уровень концентраций НУВ, превышающих ПДК, стал преобладающим для большей части акватории озера, а с 2001 г. превышение ПДК

наблюдается практически постоянно во всех лимнических зонах, включая глубоководные (рис. 5.7.6).

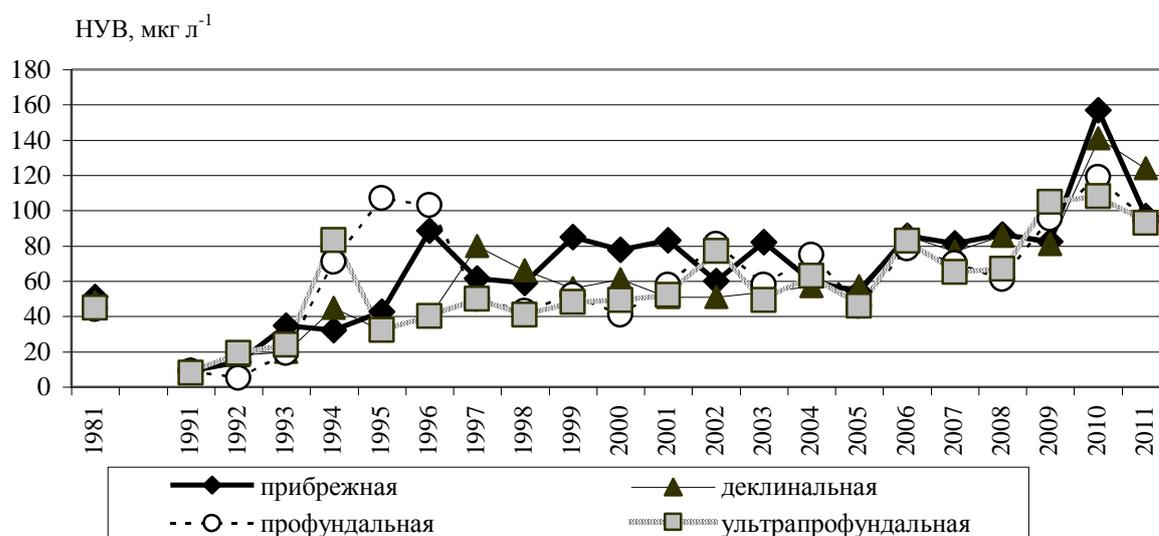


Рис. 5.7.6. Долгопериодные колебания концентрации НУВ в воде лимнических зон озера.

Многолетние ряды полученных значений концентраций НУВ с 1991 по 2008 г. включительно были проанализированы методом Тьюкки. На рис. 5.7.7 представлены статистические параметры анализируемых рядов данных, свидетельствующие в целом об их однородности и репрезентативности. Полученные в ИНОЗ РАН до 1991 г. и привлеченные к анализу данные имеют более высокий уровень значений и разброс, что может быть следствием модификационных различий гидрохимических методов анализа. Рост уровня значений НУВ в воде озера подтверждается ростом их статистических параметров: медиан от 24 мкг л^{-1} в 1993 г. до 81 мкг л^{-1} в 2006 г., С-ширины (диапазон значений, ограниченный рамками 25–75% квантилей) от $13\text{--}35 \text{ мкг л}^{-1}$ в 1993 г. до $67\text{--}98 \text{ мкг л}^{-1}$ в 2006 г., размаха значений от $0\text{--}81 \text{ мкг л}^{-1}$ в 1993 г. до $22\text{--}172 \text{ мкг л}^{-1}$ в 2007 г. и $44\text{--}176 \text{ мкг л}^{-1}$ в 2006 г.

Уровень содержания НУВ и характер их распределения в поверхностном слое воды озера определяется соотношением внешних факторов и внутриводоемных процессов (гидродинамических, гидрохимических, гидробиологических), поэтому в каждый период открытой воды складывается своя характерная картина сезонных изменений в распределении НУВ. Известно, что поступление НУВ в озеро возрастает в теплый период года в связи с увеличением выноса притоками, с интенсификацией судоходства, активизацией атмосферного переноса и т. д., но в то же время в теплый период возрастает скорость деградации НУВ под воздействием физико-химических, гидрологических и биотических факторов. Основные

тенденции сезонных изменений содержания НУВ в поверхностном слое воды озера представлены на осредненном за многолетний период сезонном тренде (рис. 5.7.8).

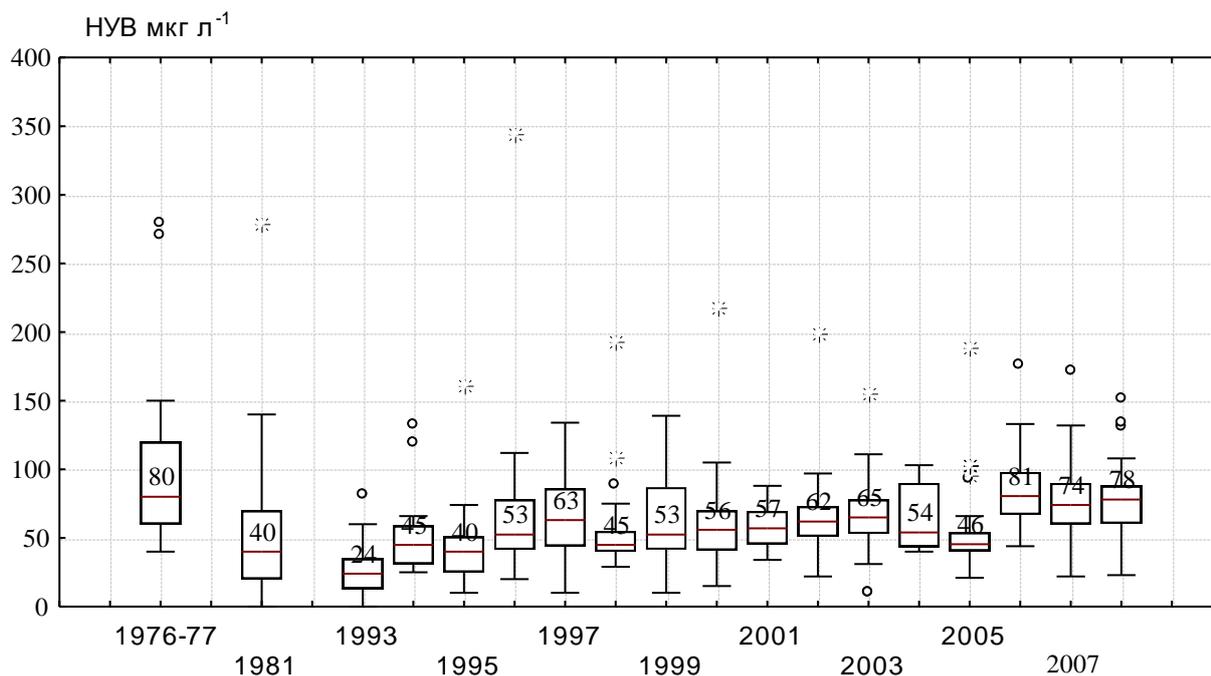


Рисунок 5.7.7. Статистические параметры рядов значений концентраций НУВ.

— медианы; □ — 25–75% квантили; ± — диапазон размаха внутренних значений; * — внешние значения; * — экстремальные (отскакивающие) значения

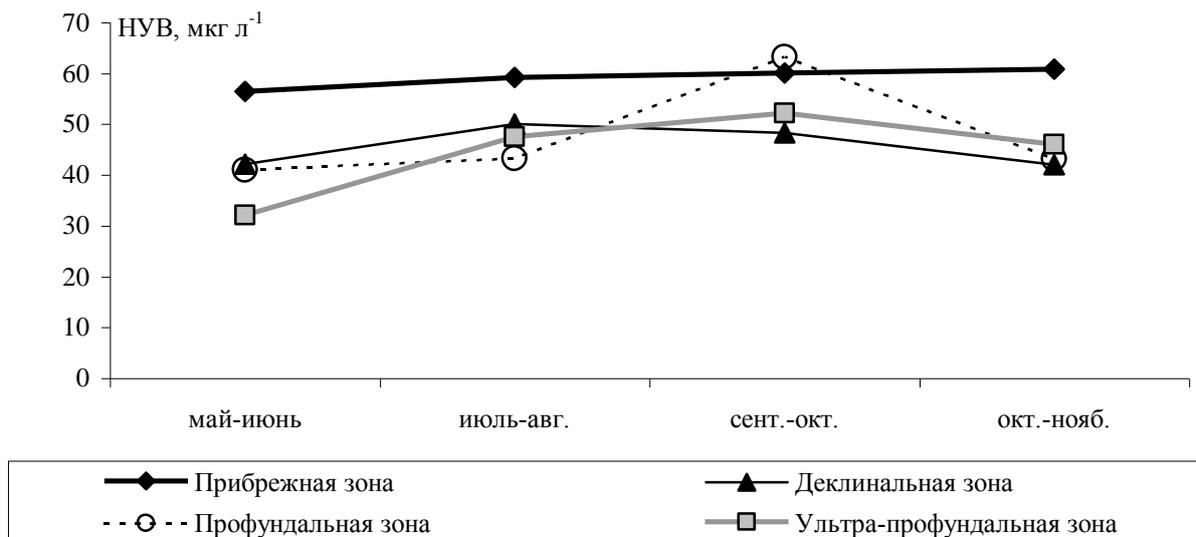


Рис. 5.7.8. Сезонные изменения содержания НУВ в поверхностном слое воды зон озера (осредненный многолетний тренд).

В течение теплого периода происходит увеличение концентрации НУВ во всех зонах озера с максимальными значениями НУВ весной в прибрежной зоне и минимальными в глубоководных зонах. В конце теплого периода концентрации НУВ в глубоководных зонах озера часто достигают наивысшего уровня, что связано с гидродинамическими условиями и более медленной деградацией НУВ в центре озера. С дальнейшим снижением температуры воды, когда уменьшается растворимость и скорость деградации НУВ, происходит их поступление в придонные горизонты и донные отложения.

Примеры пространственного распределения НУВ в поверхностном слое воды озера, его сезонные и долгопериодные изменения представлены также на рис. 5.7.9, где отражены различные экологические ситуации в теплые периоды разных лет: на первом рисунке (5.7.9, а) представлены изменения в распределении НУВ в поверхностном слое воды озера в теплый период 1993 г. (июль, август, октябрь); второй (5.7.9, б) отражает такие же сезонные изменения в распределении НУВ в 2006 г. (июнь, июль – август, октябрь); на третьем (5.7.9, в) представлено пространственное распределение НУВ весной (май – июнь) и осенью (октябрь) 2008 г. Представленные схемы отчетливо демонстрируют пространственные и временные изменения в характере распределения НУВ, а также рост их содержания в поверхностном слое воды озера после 1993 г.

На приведенных схемах озера интенсивность цветовой заливки пропорциональна концентрации НУВ в поверхностном слое воды озера, и за пределами области, ограниченной изолинией 50 мкг л^{-1} (ПДК для рыбохозяйственных водоемов), условно характеризует степень экологического риска. Так, в зоне экологического риска наиболее часто оказываются бухта Петрокрепость и Волховская губа с прилегающей к ним южной частью акватории озера, а также районы Приозерска с устьем Бурной (Вуоксы), Питкяранты и северных шхер. Исследование вертикальных профилей распределения НУВ в воде Ладожского озера показало увеличение концентрации НУВ в придонном слое глубоководных зон осенью (октябрь – ноябрь) на 30–150% от их содержания на поверхности. При этом уровень концентрации НУВ в донных отложениях колебался от 0,02–0,03% (станции продольного разреза) до 0,13% на северо-западе ультрапрофундальной зоны.

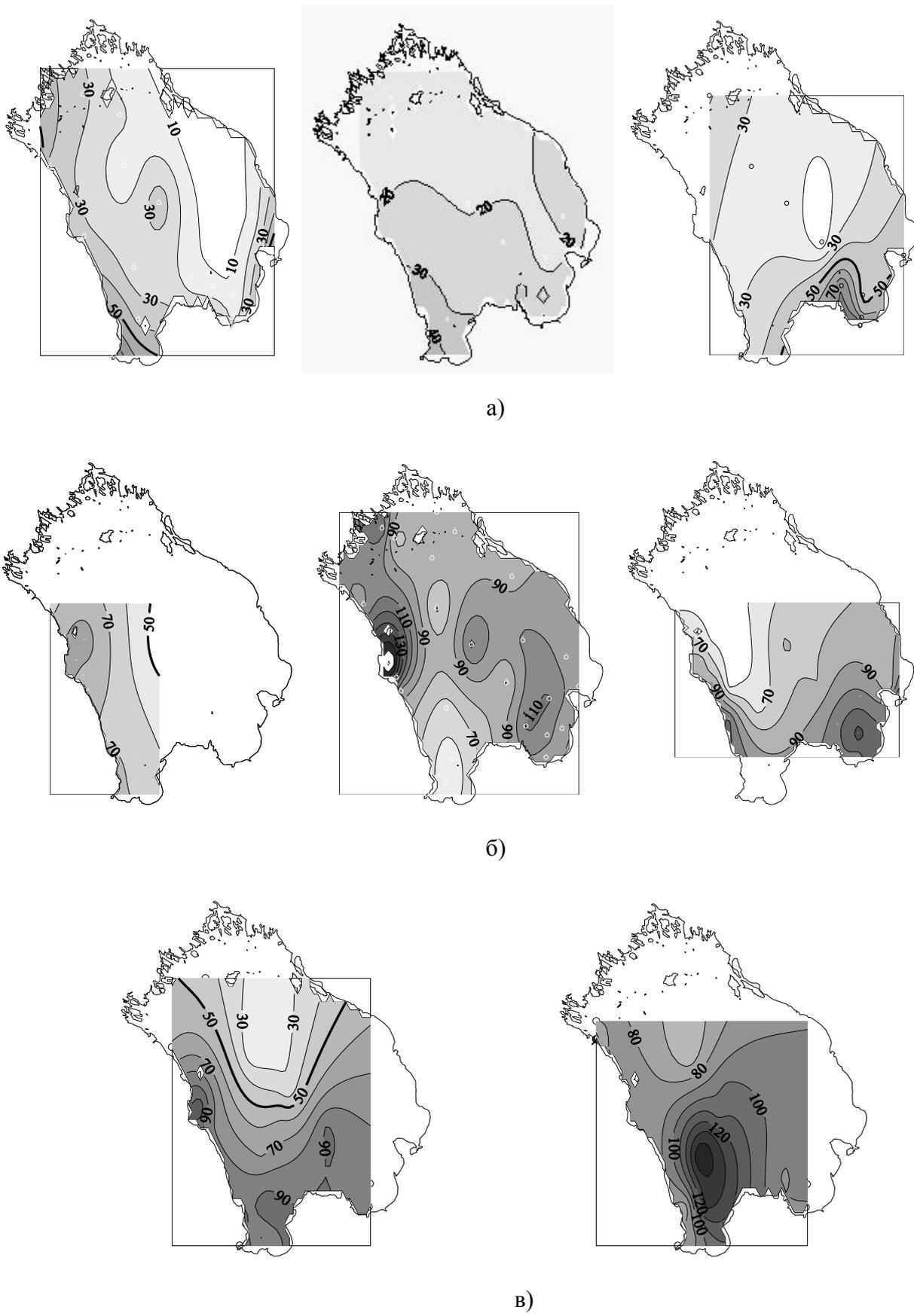


Рис. 5.7.9. Сезонные и многолетние особенности пространственного распределения НУВ в поверхностном слое воды озера в различные периоды: а) 1993 г (июль, август, октябрь) б) 2006 г. (июнь, июль – август, октябрь) в) 2008 г. (май – июнь, октябрь)

5.8. Фенолы

Фенолы — широко распространенные в природной среде ароматические соединения, образующиеся в естественных условиях в результате биохимической деструкции различных органических веществ растительного, животного, антропогенного происхождения (в частности, как промежуточный продукт трансформации НУВ), а также поступающие в природную среду из антропогенных источников с хозяйственно-бытовыми, рекреационными, сельскохозяйственными стоками, со сточными водами отраслей промышленности, таких как деревообрабатывающая, целлюлозно-бумажная, лесохимическая и химическая. Фенолы входят в перечень приоритетных веществ, загрязняющих биосферу, вследствие их токсичности, способности длительное время функционировать в экосистемах и накапливаться в живых организмах и донных отложениях, вызывая вторичное загрязнение водных систем.

Результаты исследований поступления фенольных соединений в озеро с речным стоком и их распределения в озерных водах подробно освещены в публикациях Н.Л. Крыленковой (2000; 2002; 2004). Определение фенолов в природной воде до 1997 г. выполнялось в параллели двумя спектрофотометрическими методами: 1) стандартным методом с 4-аминоантипирином без отгонки с водяным паром (Новиков и др., 1981; Лурье, 1984) и 2) нестандартным методом с диметиламиноантипирином (Пинкас и др., 1981), а с 1997 г. — флуориметрическим методом на анализаторе «Флюорат-02» (Гладилович, 1996).

Фенолы поступают в водоемы из внешних источников (аллохтонное происхождение), а также образуются в самом водоеме биотическим путем (автохтонное происхождение). Кроме этого в водоемах присутствуют еще фенольные соединения, образующиеся из различных органических предшественников природного и антропогенного происхождения (вторичное загрязнение).

Поступление фенолов с речным стоком. Речной сток является главным источником аллохтонных фенольных соединений в Ладожском озере, присутствующих в сточных водах большинства производств, расположенных в его бассейне. При этом вклад трех главных притоков (рек Вуокса, Волхов и Свирь с Пашой и Оятью) в суммарном речном поступлении фенолов превышает 90% (рис. 5.8.1.).

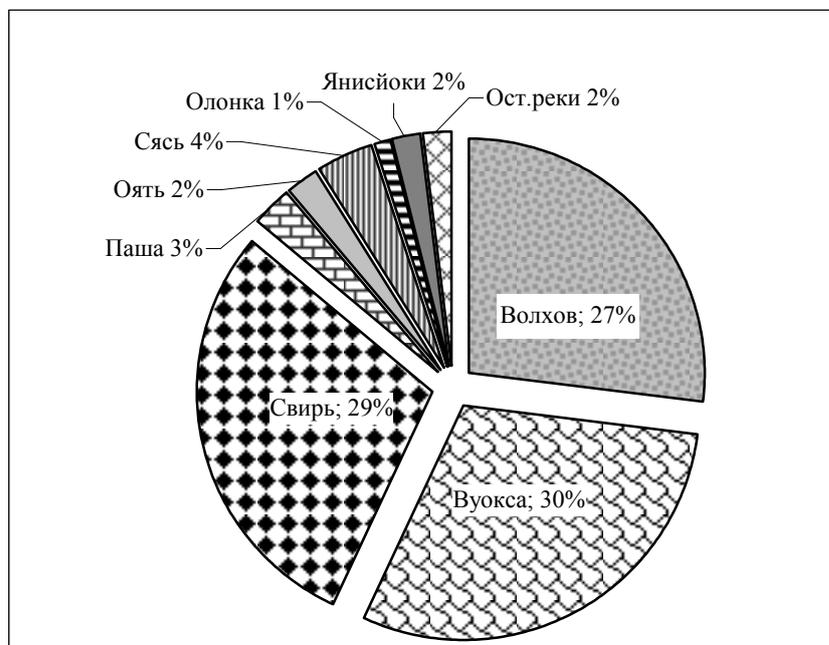


Рис. 5.8.1. Доля вклада отдельных притоков в суммарное поступление фенолов в озеро за 1991–2001 гг.

Внутригодовое распределение поступления фенолов с речным стоком, которое определяется не только изменениями концентраций фенольных соединений в воде, но и колебаниями водного стока, характеризуется наличием весеннего пика практически во всех реках (максимум около 50%), связанного с поступлением в период весеннего половодья накопившихся на водосборе загрязняющих веществ. На лето в среднем приходится почти 15% годового поступления. Летние пики концентраций фенолов в реках связаны с повышением температуры и активизацией процессов образования соединений фенольного ряда при разложении органического вещества различного происхождения. В то же время, в теплое время года увеличивается и скорость распада фенолов. На осень приходится около 25% поступления фенолов в озеро, что может быть объяснено влиянием осенних паводков, снижением скорости деградации фенолов с понижением температуры и фотохимической активности и антропогенным воздействием.

Период 1991–1993 гг. характеризовался наибольшим диапазоном колебаний концентраций фенолов в воде трех главных притоков: от 1,0 до 24,0 мкг л⁻¹. Для рек Свирь и Вуокса верхний предел значений составлял 6,6, а для Волхова — 24,0 мкг л⁻¹. Самая высокая среднегодовая концентрация (10,7 мкг л⁻¹) была в реке Волхов. Тогда же было отмечено максимальное суммарное поступление фенолов в озеро с водами основных притоков. В последующие годы, начиная с 1995 г., поступление фенолов с водой рек в озеро снижалось до

1998–2003 гг. (рис. 5.8.2). В результате за исследуемый период величина внешней фенольной нагрузки на единицу площади Ладожского озера снизилась в 7 раз — с 0,022 (1993 г.) до 0,003 г м⁻² год⁻¹ (1998 и 2003 гг.) (Крыленкова, 2004).

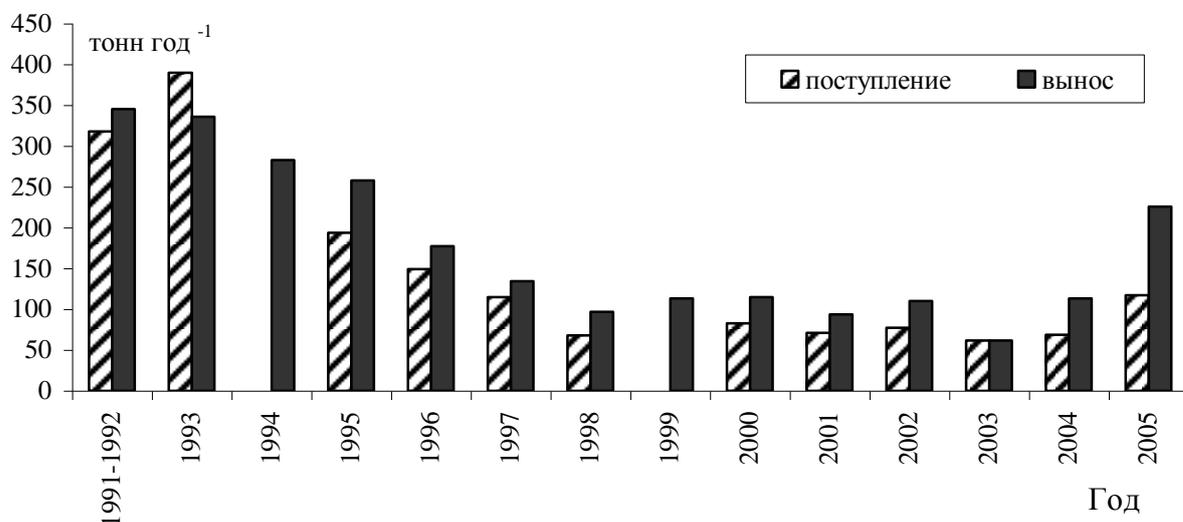


Рис. 5.8.2. Поступление фенолов в Ладожское озеро с водами притоков и вынос рекой Невой.

Анализ результатов наблюдений на притоках Ладожского озера в 2001–2005 гг. показал, что в содержании фенолов в воде рек за этот период не происходило существенных изменений. Концентрации фенолов не выходили за пределы уровня 3,4 мкг л⁻¹, что было обусловлено в основном микробиологическими процессами, а изменчивость поступления фенолов в Ладожское озеро была связана с межгодовыми колебаниями водного стока притоков

Таким образом, выявленная тенденция снижения предельных и среднегодовых концентраций фенолов в воде притоков озера со второй половины 90-х гг. XX века до 1998–2003 гг., приведшая к уменьшению поступления фенолов в озеро, обусловлена как межгодовыми изменениями водного стока, так и спадом производства на территории водосбора озера.

Фенолы в воде Ладожского озера. В Ладожское озеро аллохтонные фенолы поступают как с водами притоков, так и от расположенных в береговой зоне точечных источников (города, промышленные предприятия и т. д.), а также при биохимической трансформации нефтепродуктов. В естественных условиях фенольные соединения в озере образуются в процессе жизнедеятельности гидробионтов и при биохимическом распаде растительных и животных остатков (благодаря трансформации органического вещества, продуцируемого

фитопланктоном и высшей водной растительностью). Распределение фенолов в поверхностном слое воды озера характеризуется пространственно-временной неоднородностью. Долгопериодные изменения среднегодовых концентраций фенолов в поверхностном слое воды озера отражены на рис. 5.8.3.

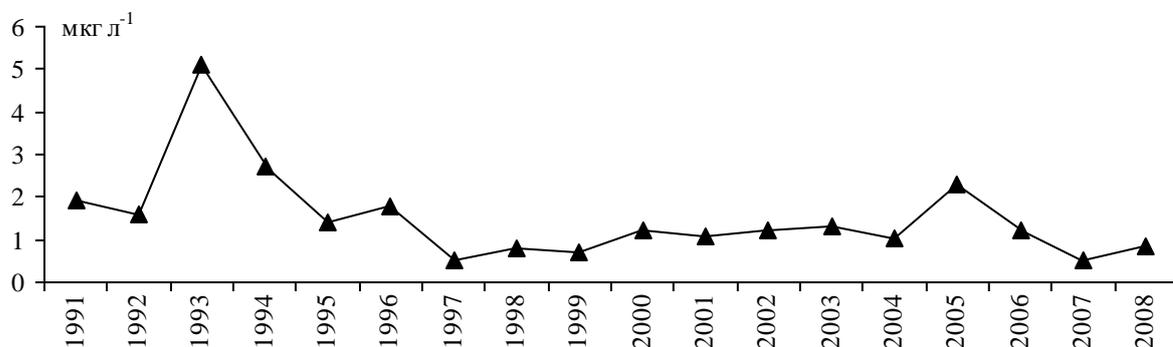


Рис. 5.8.3. Среднее содержание общих фенолов в поверхностном слое воды Ладожского озера в 1991–2008 гг.

Максимальная среднегодовая (средняя за период открытой воды) концентрация фенолов в поверхностном слое воды озера была отмечена в 1993 г., минимальная — в 1997 и в 2007 гг. В общих чертах, рис. 5.8.3. воспроизводит тенденции, отображенные на рис. 5.8.2, что подтверждает первостепенное влияние речного поступления на содержание фенолов в воде озера.

Наиболее широкий диапазон концентраций фенолов наблюдался в прибрежной зоне: от 0,5 до 34 мкг л⁻¹ (превышение ПДК в 34 раза), — и средние значения для этой зоны часто были наибольшими. Это связано как с наличием локальных зон, характеризующихся повышенным поступлением фенолов извне, так и с действием природных факторов, поскольку в литоральной теплоактивной зоне интенсивнее протекают процессы трансформации органических соединений, промежуточными продуктами которых могут быть соединения фенольного ряда.

Максимальные значения концентраций фенолов были зафиксированы в Волховской губе вблизи устья реки Волхов в 1993 г. (11–25 мкг л⁻¹). Высокое содержание фенолов отмечалось в воде Свирской губы (до 15,0 мкг л⁻¹), в южной части Щучьего залива, куда ранее сбрасывались воды Приозерского ЦБК (8,0–34,0 мкг л⁻¹), в районе Приозерска, в приустьевых участках рек Вуокса и Янисйоки (до 5,0 мкг л⁻¹), вблизи устья реки Олонка (15,0 мкг л⁻¹), в бухте Петрокрепость и в истоке Невы (8,5 мкг л⁻¹). Высокие концентрации фенолов в этих районах обусловлены в первую очередь антропогенными факторами. Повышенные и высокие значения концентраций фенолов в глубоководной части озера помимо антропогенного

воздействия, могут быть следствием микробиологической деструкции и трансформации органических соединений.

Таким образом, повышенное содержание фенолов в поверхностных водах некоторых участков прибрежной зоны Ладожского озера может являться как результатом их избыточного поступления извне (антропогенное загрязнение), так и результатом образования соединений фенольного ряда в самом озере в результате трансформации органического вещества различного происхождения (вторичное загрязнение). В открытой части озера повышенное содержание фенолов имеет исключительно вторичное происхождение: это либо продукты жизнедеятельности фитопланктона, либо производные трансформации нефтяных углеводородов, попавших в озеро в результате судоходства (Крыленкова, 2004).

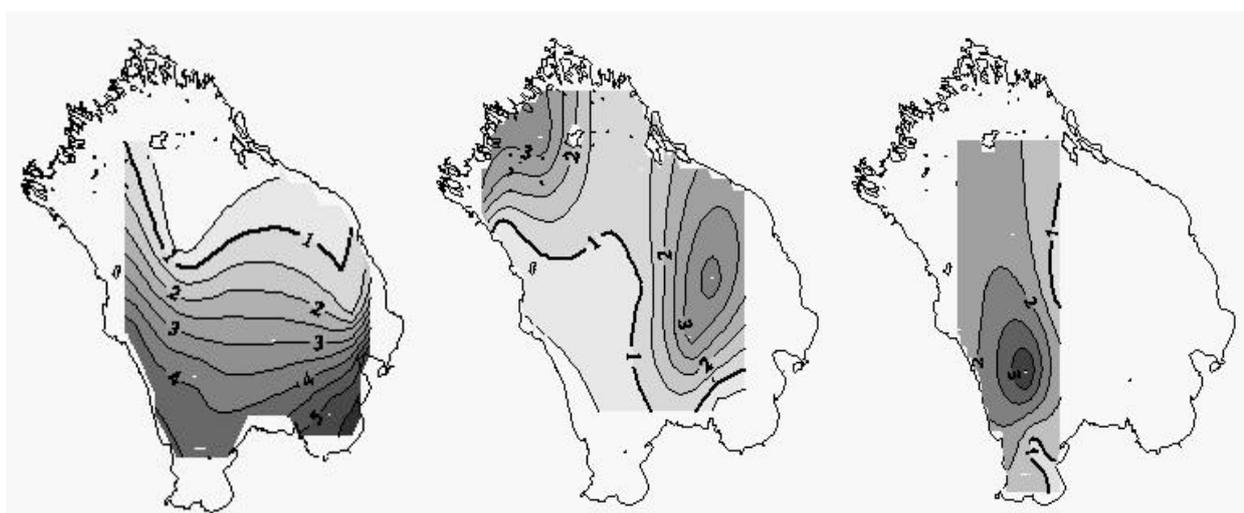
Вертикальное распределение фенолов в водной массе озера относительно однородно. Во всех лимнических зонах в период летней стратификации в придонных слоях воды содержание фенолов как правило несколько ниже, чем в поверхностном фотическом слое, насыщенном фенольными соединениями различного происхождения: аллохтонного антропогенного, автохтонного биотического, вторичного. В период осенней гомотермии концентрации фенолов по вертикали выравниваются. Однако в придонном слое воды в ультрапрофундальной зоне регулярно отмечалось более высокое содержание фенолов. Такое накопление соединений фенольного ряда можно объяснить тем, что в течение периода вегетации наиболее интенсивно протекает седиментация детритного материала, в ходе деструкции которого они образуются, а при низких температурах и дефиците кислорода на больших глубинах разложение этих веществ происходит замедленно (Крыленкова, 2004).

Сезонные изменения содержания фенолов в Ладожском озере регулируются двумя взаимно противоположными процессами — увеличением скорости разложения фенолов с повышением температуры воды и образованием фенолов в озере в летний период в результате жизнедеятельности водных организмов. Зимой часто происходит накопление фенольных соединений, обусловленное их медленным разложением при низких температурах, следствием чего является повышение концентрации фенолов весной. Затем, с повышением температуры воды, активизируются процессы их микробиологического разложения. С конца летнего периода и до середины сентября преобладают процессы образования фенолов, связанные с деградацией органического вещества, с выделением этих соединений как при жизнедеятельности гидробионтов, так и при разложении детрита. С осенним понижением температуры все эти процессы приостанавливаются, и содержание фенолов в воде понижается.

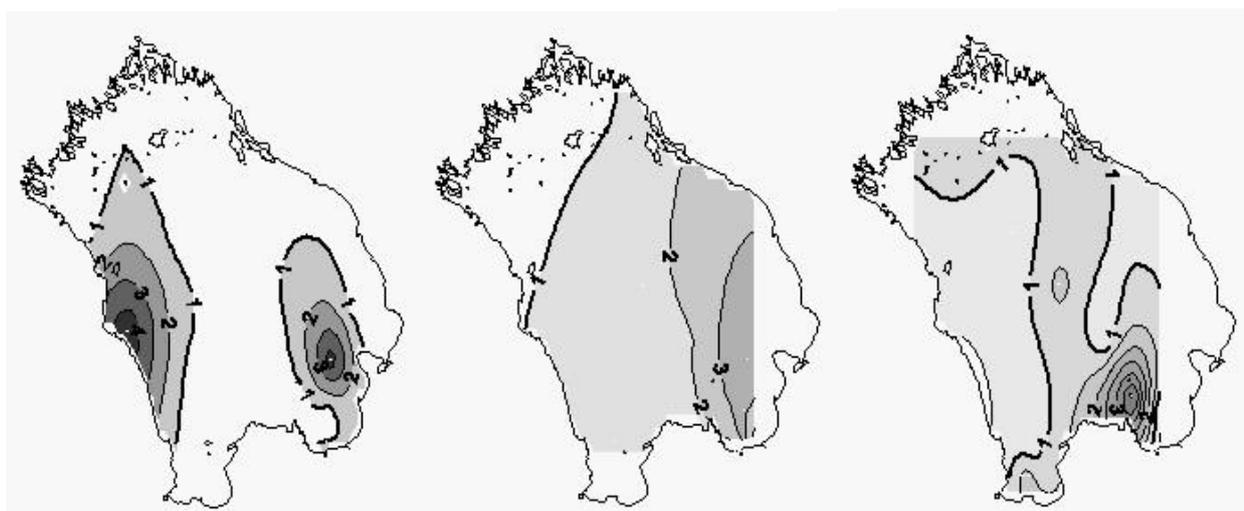
Таким образом, снижение среднегодовых концентраций фенолов в Ладожском озере связано, в первую очередь, со снижением внешней фенольной нагрузки, а сезонный ход

распределения фенолов в значительной степени обусловлен процессами их вторичного образования и сезонной активностью биоты.

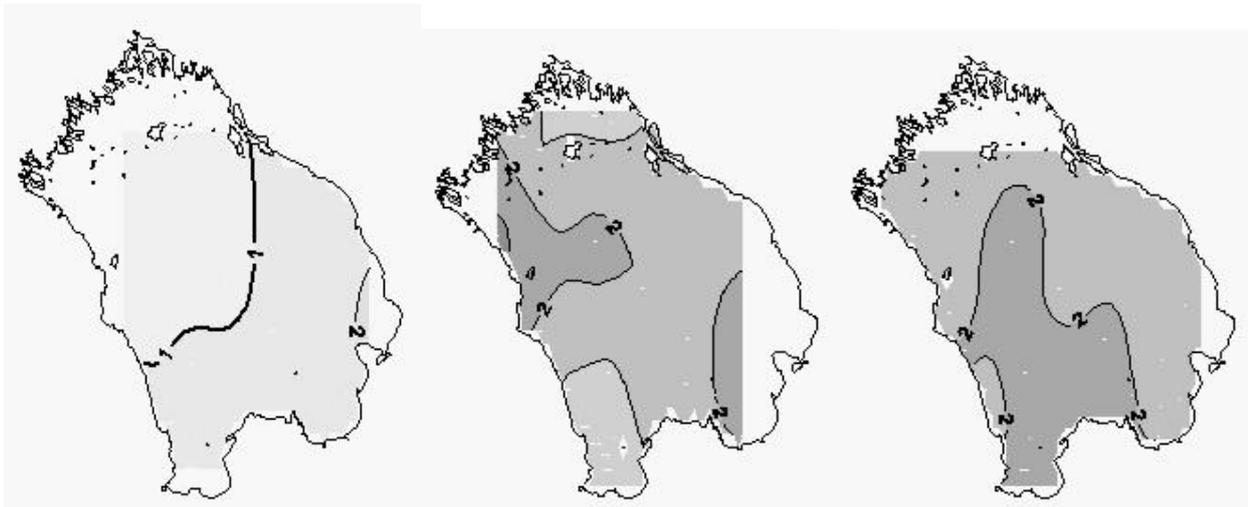
Примеры пространственного распределения фенолов в различные периоды открытой воды представлены на рис. 5.8.4. Изолинии со значениями > 1 указывают превышение концентраций фенолов над ПДК для рыбохозяйственных водоемов (1 мкг л^{-1}). Интенсивность окраски прямо пропорциональна содержанию фенолов в воде и может свидетельствовать об экологическом неблагополучии на отдельных участках акватории. Так, в зону экологического риска часто попадают бухта Петрокрепость, Волховская и Свирская губы и прилегающие к ним районы южной части озера. У западного берега неблагоприятная экологическая ситуация складывается в районе г. Приозерска и устья реки Бурная (Вуокса), на севере — в районе северных шхер.



a)



б)



в)

Рис. 5.8.4. Пространственное распределение фенолов в поверхностном слое воды Ладожского озера в разные периоды открытой воды.

а) 1994 г.: весна (июнь) – лето (август) – осень (сентябрь); б) 1995 г.: весна (июль) – лето (август) – осень (сентябрь); в) 2003 г.: весна (май) – лето (август), 2005 г.: осень (август – сентябрь)

Краткая гидрохимическая характеристика Ладожского озера, основанная на анализе пространственно-временной изменчивости гидрохимических показателей, сводится к следующему.

Главная роль в формировании химического состава воды Ладожского озера принадлежит речному стоку, на долю которого приходится свыше 95% химического баланса озера. Доминирующая роль в выносе большинства химических веществ с водосбора принадлежит реке Волхов. Основная водная масса Ладожского озера обладает значительной гидрохимической инертностью и сравнительной однородностью. Озерная вода характеризуется низкой минерализацией ($\sum_{и} 60\text{--}65 \text{ мг л}^{-1}$), гидрокарбонатно-кальциевым составом, незначительным превышением содержания сульфатных ионов над хлоридными.

Ладожское озеро — нормально аэрированный водоем с содержанием растворенного кислорода близким к насыщению в течение всего года. Даже при активном фотосинтезе фитопланктона насыщение кислородом поверхностных слоев воды пелагиали обычно составляет 93–110%, при этом относительное содержание O_2 в гипolimнионе несколько ниже — 86–96%.

С конца 70-х гг. прошлого века наблюдается постепенное снижение содержания фосфора в воде озера, в последние годы среднегодовая концентрация общего фосфора составляет $11\text{--}13 \text{ мкг Р л}^{-1}$, неорганического — $4\text{--}5 \text{ мкг Р л}^{-1}$. Среднее содержание общего азота

за период с 1976 г. составляет приблизительно 640 мкг N л^{-1} , при этом диапазон среднегодовой концентрации TN остается небольшим в течение всего периода наблюдений. Неорганический азот находится в воде озера преимущественно в форме нитратов, доля которых в общем содержании азота составляет около 30%.

Начиная с 2005 г. концентрация общего органического углерода колеблется около значения $7,0 \text{ мг C л}^{-1}$, что соответствует запасу органического углерода в объеме озера 6860 тыс. т. Содержание углерода органической взвеси в воде озера очень мало, поэтому концентрация ТОС отражает в основном содержание растворенных форм. В последние годы наблюдается тенденция увеличения концентрации лабильного органического углерода и его доли в общем содержании углерода во всех лимнических зонах озера. Весной и летом доля лабильного углерода от общего углерода обычно составляет 10–16%, а осенью возрастает до 20–30%, в отдельных случаях до 40%. Эти данные могут свидетельствовать об усиливающемся дисбалансе накопления и минерализации органического вещества в экосистеме.

В химическом составе вод Ладожского озера и его притоков преобладающим среди металлов является железо, концентрации алюминия и марганца заметно ниже, в наименьших концентрациях обнаруживаются медь, кобальт и свинец.

В течение последних двух десятилетий наблюдается увеличение содержания нефтяных углеводородов в поверхностном слое воды озера с $9,0$ до $88,7 \text{ мкг л}^{-1}$ (средневзвешенные значения концентрации НУВ). Напротив, среднегодовая концентрация фенолов в воде озера со второй половины 90-х гг. прошлого века имеет тенденцию к снижению, обусловленную как межгодовыми изменениями водного стока, приведшими к уменьшению поступления фенолов в озеро, так и спадом производства на территории водосборного бассейна.

Глава 6. Гидробиология

6.1. Высшая водная растительность

6.1.1. Видовое и ценотическое разнообразие высших водных и прибрежно-водных растений в литоральной зоне Ладожского озера

Приступая к изучению биологии водоема, исследователь, прежде всего, сталкивается с макроскопическими растениями, которые получили название «макрофиты». Нередко этот термин служит синонимом понятия «высшие водные растения», о чем свидетельствует многочисленная литература. Однако это не совсем верно. Под термином «макрофиты» целесообразно понимать макроскопические растения вне зависимости от их систематического положения, установление их родовой или видовой принадлежности не требует применения оптических приборов с большим увеличением. К высшим водным растениям следует отнести травянистые растения анатомически и морфологически приспособленные к жизни в водной среде в погруженном, полупогруженном состоянии или плавающие на поверхности воды. К ним целесообразно применить название «гидрофиты» (Распопов, 1977, 1978, 1985). Гидрофиты не представляют собой единого целого. Поэтому их целесообразно подразделить вслед за Пенфондом (Penfond, 1952) и Скалторпом (Sculthorpe, 1971) на три большие группы:

- 1) погруженные растения, или гидатофиты — растения, весь жизненный цикл которых проходит под водой, и растения, у которых генеративные побеги возвышаются над или плавают на поверхности воды, но основная растительная масса находится в толще воды;
- 2) растения с плавающими ассимиляционными органами, или нейстофиты — растения, большая часть вегетативных органов которых плавает на поверхности воды;
- 3) воздушно-водные растения, или гелофиты — растения с побегами, часть которых находится в водной среде, а часть возвышается над водой.

Кроме того, к водным растениям близки гигрофиты — сухопутные растения, в процессе онтогенеза требующие всегда большой влажности среды — влажных или переувлажненных местообитаний.

Флора водных и прибрежно-водных растений Ладожского озера насчитывает 138 видов растений, обнаруженных во время многолетних комплексных исследований этого водоёма Институтом озероведения РАН (Распопов, 1961, 1968, 1985, 2002, 2009; Распопов, Рычкова, 1971; Распопов и др., 2000; Русанов, 2008, 2011), а также учеными других учреждений (Белавская, 1994; Жакова, 2004; Palmen, 1943). Специальных флористических исследований не проводилось, поэтому, вероятно, список видов не полный. В него не включены виды харовых

водорослей, а также представители мезофитов и древесно-кустарниковых пород, которые проникали в гигрофильные сообщества во время низкого стояния уровня воды в Ладоге и погибали при повышении горизонта озерной воды. Из-за отсутствия специалиста-бриолога оказался очень бедным список водных мхов. При составлении списка растений руководствовались «Флорой водоемов России» Л.И. Лисицыной и В.Г. Папченкова (2000) и определителем сосудистых растений Л.И. Лисицыной и др. (2009).

По составу донных отложений (Семенович, 1966; Курочкина, 1982), среди которых вдоль большей части берегов преобладают пески различной крупности, галька, гравий и валуны, а также благодаря значительной волновой активности (Воронцов, 1966; Распопов и др., 1990), литоральная зона Ладоги мало благоприятна для произрастания макрофитов. По характеру зарастания она подразделяется на геоботанические районы: шхерный (включая Валаамский архипелаг), район открытых берегов, который подразделяется на западное и восточное побережья и южный (рис. 6.1.1). Для этих районов литоральной зоны указано флористическое и ценолитическое разнообразие. В табл. 6.1.1 помещены названия растений, их наличие в каждом из упомянутых выше геоботанических районов Ладожского озера и принадлежность вида к определенному экотипу.

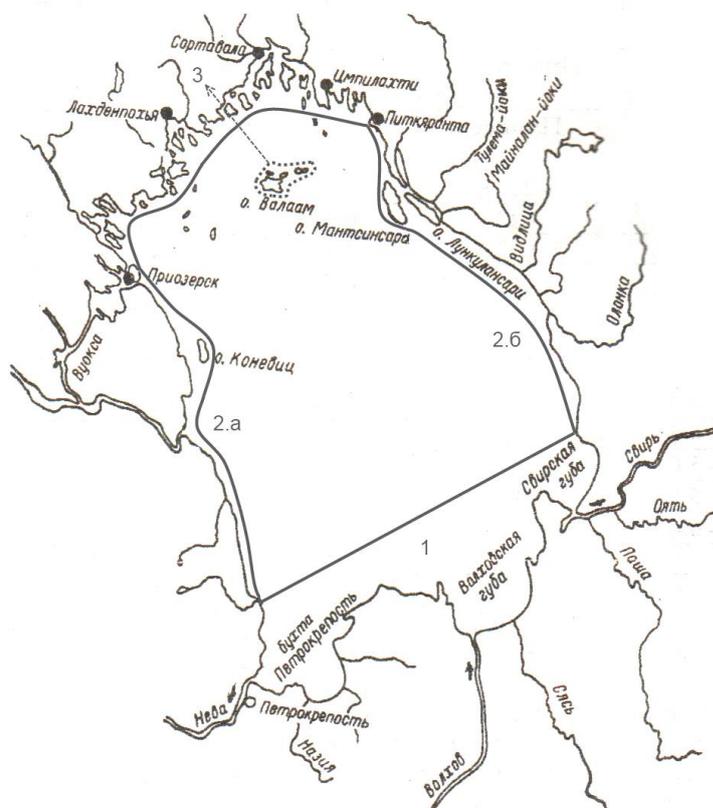


Рис. 6.1.1. Геоботанические районы Ладожского озера.

- 1 — южный район;
- 2а — западное побережье;
- 2б — восточное побережье;
- 3 — шхерный район.

Видовой состав и экотипы макрофитов литоральной зоны Ладожского озера

Принятые сокращения названий экотипов: гидатофиты — гд, нейстофиты — н, гелофиты — гл, гигрофиты — гг, наличие вида — +. ЮР — южный район, ЗП — западное побережье, ВП — восточное побережье, ШР — шхерный район.

Таксоны	Экотип	Районы литоральной зоны			
		ШР	ЗП	ВП	ЮР
1	2	3	4	5	6
BRYOPHYTA					
Ricciaceae					
<i>Riccia fluitans</i> L.	н	+			
<i>Ricciocarpus natans</i> (L.) Corda	н	+			+
Fontinaliaceae					
<i>Fontinalis antipyretica</i> Hedw.	гд	+	+	+	+
Amblistegiaceae					
<i>Calliergon giganteum</i> (Schimp.) Kindb.	гд	+	+	+	+
<i>Drepanocladus aduncus</i> (Hedw.) Warnst.	гд	+	+	+	+
LYCOPODIOPHYTA					
Isoetaceae					
<i>Isoetes lacustris</i> L.	гд	+		+	+
<i>Isoetes setacea</i> Durieu	гд	+			
EQUISETOPHYTA					
Equisetaceae					
<i>Equisetum fluviatile</i> L.	гл	+	+	+	+
<i>Equisetum palustre</i> L.	гг	+			+
<i>Equisetum pratense</i> Ehrh.	гг	+			+
POLYPODIOPHYTA					
Thelypteridaceae					
<i>Thelypteris palustris</i> Schott	гг	+			+
MAGNOLIOPHYTA					
Liliopsida					
Typhaceae					
<i>Typha angustifolia</i> L.	гл	+			+
<i>Typha latifolia</i> L.	гл	+			+
Sparganiaceae					
<i>Sparganium angustifolium</i> Michx.	гл	+	+	+	+
<i>Sparganium emersum</i> Rehm.	гл	+	+	+	+
<i>Sparganium erectum</i> L.	гл	+	+		+
<i>Sparganium glomeratum</i> (Laest.) L. Neum.	гл	+			
<i>Sparganium gramineum</i> Georgi	гл	+			+
<i>Sparganium minimum</i> Wallr.	гл	+		+	+
Potamogetonaceae					
<i>Potamogeton alpinus</i> Balb.	н	+			
<i>Potamogeton compressus</i> L.	гд	+		+	+
<i>Potamogeton crispus</i> L.	гд	+			+
<i>Potamogeton gramineus</i> L.	н	+	+	+	+
<i>Potamogeton heterophyllus</i> Sreb.	н	+	+	+	+
<i>Potamogeton lucens</i> L.	гд	+	+		+

<i>Potamogeton natans</i> L.	Н	+	+	+	+
1	2	3	4	5	6
<i>Potamogeton pectinatus</i> L.	ГД	+			+
<i>Potamogeton perfoliatus</i> L.	ГД	+	+	+	+
<i>Potamogeton praelongus</i> Wulf.	ГД	+			+
<i>Potamogeton pusillus</i> L.	ГД	+			+
Zannichelliaceae					
<i>Zannichellia repens</i> Boenn.	ГД	+			+
Najadaceae					
<i>Caulinia flexilis</i> Willd.	ГД	+			
Alismatacea					
<i>Alismaplantago-aquatica</i> L.	ГЛ	+	+	+	+
<i>Sagittaria natans</i> Pall.	Н	+			
<i>Sagittaria sagittifolia</i> L.	ГЛ	+	+	+	+
Butomaceae					
<i>Butomus umbellatus</i> L.	ГЛ	+	+	+	+
Hydrocharitaceae					
<i>Elodea canadensis</i> Michx.	ГД	+	+	+	+
<i>Hydrocharis morsus-ranae</i> L.	Н	+		+	+
<i>Stratiotes aloides</i> L.	Н	+		+	+
Poaceae					
<i>Agrostis stolonifera</i> L.	ГГ	+	+	+	+
<i>Alopecurus aequalis</i> Sobol.	ГГ	+	+	+	+
<i>Alopecurus geniculatus</i> L.	ГГ	+			+
<i>Calamagrostis neglecta</i> (Ehrh.) Gaertn.	ГГ	+	+	+	+
<i>Glyceria fluiians</i> (L.) R.BR.	ГЛ	+			+
<i>Glyceria maxima</i> (C.Hartm.) Holmb.	ГЛ	+	+	+	+
<i>Phalaroides arundinaceae</i> (L.) Rauschert	ГГ	+	+	+	+
<i>Phragmites australis</i> (Cav.) Trin. ex Steud.	ГЛ	+	+	+	+
<i>Scolochloa festucacea</i> (Willd.) Link	ГЛ	+	+	+	+
Cyperaceae					
<i>Carex acuta</i> L.	ГЛ	+	+	+	+
<i>Carex aquatilis</i> Wahlenb.	ГЛ	+	+	+	+
<i>Carex flava</i> L.	ГГ				+
<i>Carex lasiocarpa</i> Ehrh.	ГГ	+		+	
<i>Carex nigra</i> (L.) Reichard	ГГ	+	+	+	+
<i>Carex pseudocyperus</i> L.	ГГ	+	+	+	+
<i>Carex riparia</i> Curt.	ГГ	+	+		+
<i>Carex rostrata</i> Stokes	ГЛ	+	+	+	+
<i>Carex vesicaria</i> L.	ГЛ	+	+	+	+
<i>Carex vulpina</i> L.	ГГ				+
<i>Eleocharis acicularis</i> (L.) Roem. et Schult.	ГГ	+	+	+	+
<i>Eleocharis palustris</i> (L.) Roem. et Schult.	ГЛ	+	+	+	+
<i>Scirpus lacustris</i> L.	ГЛ	+	+	+	+
<i>Scirpus sylvaticus</i> L.	ГГ	+	+	+	+
Araceae					
<i>C alia palustris</i> L.	ГГ	+			+
Lemnaceae					
<i>Lemna minor</i> L.	Н	+	+	+	+

1	2	3	4	5	6
<i>Lemna trisulca</i> L.	ГД	+	+		+
<i>Spirodela polyrhiza</i> (L.) Schleid.	Н	+			+
Juncaceae					
<i>Juncus articulatus</i> L.	ГГ	+	+	+	+
<i>Juncus bufonius</i> L.	ГГ	+	+	+	+
<i>Juncus compressus</i> Jacq.	ГГ	+	+		+
<i>Juncus conglomeratus</i> L.	ГГ				+
<i>Juncus effusus</i> L.	ГГ	+	+		+
<i>Juncus filiformis</i> L.	ГГ	+			
Iridaceae					
<i>Iris pseudacorus</i> L.	ГГ	+		+	+
MAGNOLIOPHYTA					
Magnoliopsida					
Polygonaceae					
<i>Persicaria amphibia</i> (L.) S.F.Gray	Н	+	+	+	+
<i>Persicaria hydropiper</i> (L.) Spach	ГГ	+	+	+	+
<i>Persicaria minor</i> (Huds.) Opiz	ГГ	+			+
<i>Rumex aquaticus</i> L.	ГГ	+			+
<i>Rumex hydrolapatum</i> Huds.	ГГ	+	+		+
<i>Rumex maritimus</i> L.	ГГ	+	+	+	+
Caryophyllaceae					
<i>Stellaria palustris</i> Retz.	ГГ	+			+
Nymphaeaceae	Н	+	+	+	+
<i>Nuphar lutea</i> (L.) Smith					
<i>Nuphar pumila</i> (Timm) DC.	Н	+		+	+
<i>Nymphaea alba</i> L.	Н	+			
<i>Nymphaea candida</i> J.Presl.	Н	+	+	+	+
<i>Nymphaea tetragona</i> Georgi	Н	+			+
Ceratophyllaceae					
<i>Ceratophyllum demersum</i> L.	ГД	+			+
Ranunculaceae					
<i>Batrachium aquatile</i> (L.) Dumort.	ГД	+	+	+	+
<i>Batrachium circinatum</i> (Sibth.) Spach	ГД	+	+		+
<i>Batrachium peltatum</i> (Schränk) Bercht	ГД	+			
<i>Batrachium trichophyllum</i> (Chaix) Bosch	ГД	+			+
<i>Caltha palustris</i> L.	ГГ	+			
<i>Ranunculus flammula</i> L.	ГГ	+			
<i>Ranunculus lingua</i> L.	ГЛ	+			+
<i>Ranunculus repens</i> L.	ГГ	+	+	+	+
<i>Ranunculus reptans</i> L.	ГГ	+	+	+	+
<i>Ranunculus sceleratus</i> L.	ГГ	+	+	+	+
Brassicaceae					
<i>Rorippa amphibia</i> (L.) Bess.	ГГ	+		+	+
<i>Rorippa palustris</i> (L.) Bess.	ГГ	+			
<i>Subularia aquatica</i> L.	ГЛ	+	+	+	+
Rosaceae					
<i>Comarum palustre</i> L.	ГГ	+		+	+

1	2	3	4	5	6
Callitrichaceae					
<i>Callitriche hermaphroditica</i> L.	ГД	+			
<i>Callitriche palustris</i> L.	ГД	+			+
Elatinaceae					
<i>Elatine hydropiper</i> L.	ГД	+		+	+
Lythraceae					
<i>Lythrum salicaria</i> L.	ГГ	+		+	+
Onagraceae					
<i>Epilobium palustre</i> L.	ГГ	+		+	+
<i>Epilobium roseum</i> Schreb.	ГГ	+			+
Haloragaceae					
<i>Myriophyllum spicatum</i> L.	ГД	+		+	+
<i>Myriophyllum verticillatum</i> L.	ГД	+			
Hippuridaceae					
<i>Hippuris vulgaris</i> L.	ГЛ	+			
Apiaceae					
<i>Cicuta virosa</i> L.	ГГ	+			
<i>Oenanthe aquatica</i> (L.) Poir.	ГЛ	+			
<i>Sium latifolium</i> L.	ГЛ	+		+	+
Primulaceae					
<i>Lysimachia nummularia</i> L.	ГГ	+			+
<i>Lysimachia vulgaris</i> L.	ГГ	+		+	+
<i>Naumburgia thyrsoflora</i> (L.) Reichenb.	ГЛ	+		+	+
Menyanthaceae					
<i>Menyanthes trifoliata</i> L.	ГГ	+			
Boraginaceae					
<i>Myosotis palustris</i> L.	ГГ	+			+
Lamiaceae					
<i>Lycopus europaeus</i> L.	ГГ	+	+		+
<i>Mentha aquatica</i> L.	ГГ	+	+	+	+
<i>Mentha arvensis</i> L.	ГГ	+		+	+
<i>Scutellaria galericulata</i> L.	ГГ	+			+
<i>Stachys palustris</i> L.	ГГ	+	+	+	+
Solanaceae					
<i>Solanum dulcamara</i> L.	ГГ	+			+
Scrophulariaceae					
<i>Limosella aquatica</i> L.	ГГ	+			
<i>Pedicularis palustris</i> L.	ГГ	+		+	+
<i>Veronica anagallis-aquatica</i> L.	ГГ	+			+
<i>Veronica beccabunga</i> L.	ГГ	+			
Lentibulariaceae					
<i>Utricularia intermedia</i> Hayne	ГД	+			+
<i>Utricularia minor</i> L.	ГД	+			
<i>Utricularia vulgaris</i> L.	ГД	+		+	+
Plantaginaceae					
<i>Littorella uniflora</i> (L.) Ashers.	ГГ			+	+
1	2	3	4	5	6
Rubiaceae					

<i>Galium palustre</i> L.	ГГ	+	+	+	+
<i>Galium uliginosum</i> L.	ГГ	+	+	+	+
Lobeliaceae					
<i>Lobelia dortmanna</i> L.	ГД	+			+
Astraceae					
<i>Bidens cernua</i> L.	ГГ	+			
<i>Bidens tripartita</i> L.	ГГ	+	+	+	+
<i>Gnaphalium uliginosum</i> L.	ГГ	+		+	+
<i>Petasites spurius</i> (Retz.) Reichenb.	ГГ	+			+

Оценено соотношение различных экотипов водных растений в геоботанических районах Ладоги. Наибольшим флористическим богатством отличается шхерный район. Он характеризуется большим разнообразием биотопов, где в защищенных от волнения частях заливов и проливов в донных отложениях накапливается мелкозернистый материал и создаются благоприятные экологические условия для произрастания макрофитов. Здесь встречены все виды высших водных и прибрежно-водных растений, за исключением осоки лисьей. Богатый видовой состав влаголюбивых растений — 120 видов — отмечен в южном районе благодаря наличию здесь обширных мелководий и поступлению биогенных веществ с водами притоков. Литораль открытых берегов, как правило, подверженная интенсивному волнению и в силу этого отличающаяся крупнозернистым составом донных отложений, неблагоприятна для произрастания макрофитов, видовой состав которых в два раза беднее, чем в других геоботанических районах. Если же проанализировать процентное соотношение видов растений, относящихся к тому или иному экотипу, то эти показатели для всех районов близки для гидатофитов — 21,9–23,8% и нейстофитов — 10,8–13,7%. Гелофиты в процентном отношении доминируют в районе открытых берегов — 23,3–25,4% против 16,7–20,4% в двух других районах. Обратная картина наблюдается в отношении гигрофитов. В шхерном и южном районах их от 45,3 до 50%, тогда как на западном и восточном побережьях — 39,7–41,1% (табл. 6.1.2).

Наблюдаются большие различия во встречаемости видов растений. Очень редкими являются *Isoetes setacea*, *Lobelia dortmanna*. Редкими являются *Isoetes lacustris*, *Zannichellia repens*, *Caulinia flexilis*, *Limosella aquatica*, *Sagittaria natans*, *Subularia aquatica*, *Myriophyllum verticillatum*, *Glyceria fluitans*. Самыми распространенными высшими водными растениями в Ладожском озере являются тростник обыкновенный, рдест пронзеннолистный и камыш озерный; однако если первые два из указанных видов господствуют во всех геоботанических районах, то камыш предпочитает южные губы.

Таблица 6.1.2

Экотипы гигрофильных растений в геоботанических районах Ладожского озера: количество видов и процентное соотношение экотипов

Экотип	Геоботанические районы литоральной зоны			
	Южный район	Западное побережье	Восточное побережье	Шхерный район
Гидатофиты	27 (22,5%)	15 (23,8%)	16 (21,9%)	30 (21,9%)
Нейстофиты	13 (10,8%)	7 (11,1%)	10 (13,7%)	17 (12,4%)
Гелофиты	20 (16,7%)	16 (25,4%)	17 (23,3%)	28 (20,4%)
Гигрофиты	60 (50,0%)	25 (39,7%)	30 (41,1%)	62 (45,3%)
Всего:	120 (100%)	63 (100%)	73 (100%)	137 (100%)

В зарастании литорали Ладоги участвуют группировки макрофитов, относящиеся к 70 ассоциациям, эдификаторами которых являются 37 видов цветковых растений и хвощ приречный (таблица 6.1.3). Большой частью эдификаторные виды образуют по одной, реже по две ассоциации. Тростник обыкновенный строит 13 ассоциаций, камыш озерный и хвощ приречный — по 4, горец земноводный — 5. Большинство сообществ являются редкими и занимают очень небольшую площадь. Во всех геоботанических районах доминируют почти чистая ассоциация тростника (*Phragmitetum australis subpurum*), ассоциация тростника с водными растениями (*Phragmitetum australis aqui-herbosum*), почти чистая ассоциация рдеста пронзеннолистного (*Potametum perfoliati subpurum*), ассоциация рдеста пронзеннолистного с водными растениями литорали являются ассоциации камыша озерного — почти чистая (*Scirpetum lacustris subpurum*) и с другими водными растениями (*Scirpetum lacustris aqui-herbosum*). Помимо этого широкое распространение в шхерном районе получают ассоциации рдеста травяного с водными растениями (*Potametum graminei aqui-herbosum*), тростника с хвощом (*Phragmitetum australis equisetosum*) и тростника с камышом (*Phragmitetum australis scirposum*). Последняя ассоциация характерна и для южного района. Краткие характеристики группировок приводятся в работах И.М. Распопова (1968, 1985).

Таблица 6.1.3

Ассоциации макрофитов и их распространение в пределах геоботанических районов (условные обозначения: д — доминирует, ш — широко распространена, о — ограничено распространена, р — редкая ассоциация, - — отсутствует. ШР — шхерный район, ЗП — западное побережье, ВП — восточное побережье, ЮР — южный район)

1	Районы литоральной зоны			
	ШР	ЗП	ВП	ЮР
1	2	3	4	5
<i>Ceratophylletum demersi aqui-herbosum</i>	р	-	-	-
<i>Elodeetum canadensis aqui-herbosum</i>	о	-	-	о
<i>Elodeetum canadensis subpurum</i>	р	-	-	-

Myriophylletum spicati aqui-herbosum	p	-	-	-
1	2	3	4	5
Myriophylletum spicati charosum	-	-	-	p
Batrachietum peltati subpurum	o	-	-	-
Potametum compressi aqui-herbosum	p	p	-	-
Potametum praelongi aqui-herbosum	-	-	-	p
Potametum praelongi subpurum	p	-	-	-
Potametum perfoliati aqui-herbosum	д	ш	ш	д
Potametum perfoliati batrachiosum	o	-	-	-
Potametum perfoliati subpurum	д	ш	ш	д
Potametum graminei aqui-herbosum	ш	p	p	o
Potametum natantis aqui-herbosum	o	-	-	o
Persicarietum amphibii aqui-herbosum	o	-	p	o
Persicarietum amph. perfoliati-potamogetonetum	p	-	-	-
Persicarietum amph. graminei-potamogetonetum	p	-	-	p
Persicarietum amph. natantis-potamogetonetum	p	-	-	-
Persicarietum amphibii nupharosum	p	-	-	-
Lemnetum minoris subpurum	p	-	-	p
Stratiotetum aloidis aqui-herbosum	p	-	-	-
Nupharetum lutei aqui-herbosum	o	-	-	p
Nupharetum lutei natantis-potamogetonosum	p	-	-	-
Nupharetum pumili aqui-herbosum	p	-	-	-
Nymphaeetum candidae aqui-herbosum	p	-	-	-
Nymphaeetum tetragonae aqui-herbosum	p	-	-	-
Sparganietum angustifoliae aqui-herbosum	o	-	-	-
Sparganietum emersi aqui-herbosum	o	-	-	p
Sparganietum minimi elodeosum	p	-	-	-
Sagittarietum sagittifoliae aqui-herbosum	o	-	-	p
Scirpetum lacustris aqui-herbosum	o	-	p	д
Scirpetum lacustris naumburgiosum	-	-	p	-
Scirpetum lacustris subpurum	p	-	-	д
Scirpetum lacustris stratiotosum	p	-	-	-
Typhetum angustifoliae aqui-herbosum	p	-	-	p
Typhetum angustifoliae lemnosum	-	-	-	p
Typhetum latifoliae aqui-herbosum	p	-	-	p
Equisetetum fluviatilis aqui-herbosum	o	-	p	-
Equisetetum fluviatilis graminei- potamogetonosum	p	-	-	-
Equisetetum fluviatilis elodeosum	o	-	-	-
Equisetetum fluviatilis nupharosum	p	-	-	-
Eleochareto-equisetetum aqui-herbosum	p	-	-	-
Eleocharetum palustris aqui-herbosum	o	-	-	p
Eleocharetum acicularis aqui-herbosum	-	-	p	p
Phragmitetum australis aqui-herbosum	д	д	д	д
Phragmitetum australis graminei-potamogetonosum	-	-	-	p
Phragmitetum australis elodeosum	o	-	-	-
Phragmitetum australis equisetosum	ш	-	-	-
Phragmitetum australis littorellosum	-	-	-	p
Phragmitetum australis natantis-potamogetonosum	-	-	-	p
Phragmitetum australis nupharosum	p	-	-	-
Phragmitetum australis persicariosum	p	-	-	-

1	2	3	4	5
Phragmitetum australis scirposum	ш	-	-	ш
Phragmitetum australis scolochloosum	-	-	-	р
Phragmitetum australis stratiotosum	р	-	-	-
Phragmitetum australis subpurum	д	д	д	д
Phragmitetum australis vesicariae-potamogetonos.	р	-	-	р
Phragmitetum australis juncosum	-	-	-	р
Scolochloetum festucaceae aqui-herbosum	о	р	о	о
Glycerietum maximae aqui-herbosum	о	-	-	-
Glycerietum maximae subpurum	р	-	-	-
Phalaroidetum arundinaceae aqui-herbosum	р	-	-	-
Phalaroidetum arundinaceae cicutosum	р	-	-	-
Caricetum acutae mixta herbosum	р	р	р	о
Caricetum aquatilis aqui-herbosum	о	-	-	р
Caricetum rostratae mixta herbosum	-	-	р	-
Caricetum vesicariae aqui-herbosum	о	-	-	-
Naumburgietum thyrsoflorae aqui-herbosum	р	-	р	р
Alismetum plantago-aquaticae aqui-herbosum	р	-	р	-
Butometum umbellatae aqui-herbosum	р	-	-	р
Bidenetum tripartitae mixta-herbosum	р	-	-	-

Площадь зарастания литорали в настоящее время превышает 130 км² или 4,6% литоральной зоны. Наибольшее ценотическое разнообразие отмечается на защищенной от волнения литорали шхерного района, где отмечено 60 ассоциаций, общая площадь которых составляет 16 км². Самые большие площади зарослей макрофитов находятся в южном районе — 109 км², основная часть которых приходится на группировки тростника обыкновенного, камыша озерного и рдеста пронзеннолистного. В целом в зарастании южного геоботанического района участвуют фитоценозы, относящиеся к 34 ассоциациям, причем ценозы рогоза узколистного (*Typha angustifolia* L.) и рогоза широколистного (*Typha latifolia* L.) появились здесь в процессе эвтрофирования Ладожского озера. Слабо заросшей из-за подверженности волнению является литораль западного и восточного побережий. Здесь же отмечается наименьшее разнообразие группировок — 8 на литорали западного (площадь 3 км²) и 16 на литорали восточного берегов (4 км²).

Была определена фитомасса растений, для чего отбирались укосы в группировках с учетом их сомкнутости и площадей распространения. В доминирующих сообществах величины абсолютно сухой фитомассы (г/м²) следующие: в ассоциации рдеста пронзеннолистного с водными растениями — 115,2 ± 17,1, в почти чистой ассоциации рдеста пронзеннолистного с разреженным покровом — 62,8 ± 25,7, в сомкнутой — 143,7 ± 41,7, в разреженной почти чистой ассоциации тростника — 292,0 ± 40,0, в сомкнутой — 928,0 ± 91,0, в тростнике с водными растениями — 577,0 ± 98,8, в почти чистой ассоциации камыша озерного — 389,0 ± 177,0, в камыше с водными растениями — 466,7 ± 186,7 и в ассоциации хвоща приречного с

водными растениями — $200,0 \pm 42,1$. Общая абсолютно сухая фитомасса высших водных растений Ладожского озера составляет около 62,7 тыс. т (Распопов, 2002). Вместе с тем следует отметить, что заросли рдеста пронзеннолистного, произрастающего в губе Петрокрепость на площади более 5 тыс. га и создающие 7,7 тыс. т органического вещества, по окончании вегетации отмирают, и остатки растений выносятся течением из озера в реку Неву. Количество растительного материала, уносимого водами Невы, подсчитать невозможно.

6.1.2. Пространственная структура сообщества макрофитов Ладожского озера и факторы, ее регулирующие

Выявление факторов, ответственных за изменение пространственной структуры сообществ гидробионтов, является одной из центральных задач водной экологии. Особенно важен этот вопрос для больших озер, литоральная зона которых характеризуется высокой неоднородностью пространственного распределения морфометрических, гидродинамических и гидрохимических характеристик. Гидродинамические условия совместно с морфометрическими характеристиками литорали рассматриваются в качестве основных физических факторов, определяющих структуру сообщества водных растений (Keough et al., 1999). Влияние волнового воздействия и связанного с ним гранулометрического состава донных отложений на распределение высшей водной растительности исследовалось в ряде работ зарубежных и отечественных авторов (Keddy, 1982; Chambers, 1987; Распопов и др., 1990, Поддубный и др., 1998). В больших озерах со сложной морфометрией береговой зоны показатели качества воды сильно варьируют между отдельными изолированными заливами и в местах впадения основных притоков, но более однородны на открытых участках литорали. Анализ пространственной структуры высшей водной растительности в больших озерах и водохранилищах показывает, что одним из основных факторов, влияющих на сообщество макрофитов, является снижение качества водной среды из-за увеличения антропогенной нагрузки (Vini et al., 1999; Loughheed et al., 2001).

Исследования водной растительности Ладожского озера с целью оценки роли естественных и антропогенных факторов в пространственной структуре сообщества макрофитов Ладожского озера проводились в июле–августе 2006 г. на 24 станциях (табл. 6.1.4). Исследованные станции охватывают все три геоботанических района Ладожского озера — шхерный район, к которому также относится Валаамский архипелаг (10 станций), район открытых берегов (8 станций) и южный район (6 станций).

Таблица 6.1.4

Местоположение, гидрохимический режим (концентрация общего фосфора ($P_{\text{общ}}$, мкг/л) и удельная электропроводность (УЭП, мкСм/см)), характер грунтов и гидродинамический режим на станциях описания водной растительности в Ладожском озере

№№	Станция	Местоположение	$P_{\text{общ}}$	УЭП	Тип грунта	Гидродинамический режим литорали
		Южный район				
1	ст. 30	м. Осиновец*	61	96	каменисто-песчаный	прибойная
2	ст. 1–2	р. Кобона*	49	99	мелкопесчаный	затишная
3	ст. 3	дер. Дубно*	51	149	мелкопесчаный	затишная
4	ст. 4	р. Волхов*	152	241	мелкопесчаный	затишная
5	ст. 5	дер. Вороново*	65	139	каменисто-песчаный	прибойная
6	ст. 6	Свирская губа*	71	109	илистый	затишная
		Район открытых берегов (восточный)				
7	ст. 7	бухта Андрусовская*	37	104	мелкопесчаный	прибойная
8	ст. 8	о-в Мантинсари*	48	91	мелкопесчаный	прибойная
9	ст. 9	з-в Уксунлахти*	82	65	каменисто-песчаный	прибойная
		Шхерный район				
10	ст. 10	г. Питкяранта	25	103	илистый	затишная
11	ст. 12	з-в Импилахти*	38	97	мелкопесчаный	затишная
12	ст. 13	з-в Хауккалаhti*	42	99	илисто-глинистый	затишная
13	ст. 15	пос. Ляскеля	19	85	мелкопесчаный	затишная
14	ст. 17	п-о. Раутолахти*	29	89	каменисто-песчаный	прибойная
15	ст. 18	арх. Валаам, оз. Сисьярви*	18	92	илистый	затишная
16	ст. 19	арх. Валаам, Никольский скит	27	100	илистый	затишная
17	ст. 20	о. Путсари	16	99	мелкопесчаный	затишная
18	ст. 21	з-в Якимварский*	19	100	илисто-глинистый	затишная

19	ст. 22	о. Хауккасари*	21	99	каменисто-песчаный	прибойная
		Район открытых берегов (западный)				
20	ст. 23	г. Приозерск*	55	76	мелкопесчаный	затишная
21	ст. 26	бухта Владимирская	54	100	мелкопесчаный	затишная
22	ст. 27	з-в Тайпаловский*	47	88	мелкопесчаный	прибойная
23	ст. 28	бухта Далекая*	69	97	каменисто-песчаный	прибойная
24	ст. 29	южнее м. Быковец*	53	97	каменисто-песчаный	прибойная

В ходе исследования выполнено определение флористического и фитоценотического состава водной растительности. При экологическом анализе флоры использовалась классификация В.Г. Папченкова (2001). Описание водной растительности проводилось на участках литорали с длиной береговой линии 100 м. Оценка размеров зарослей воздушно-водных и плавающих растений проводилась глазомерно, распространение погруженных растений изучалось до максимальной глубины распространения растительности. На каждой станции описание водной растительности проводилось на трех участках (суммарная длина береговой линии 300 м), расстояние между обследуемыми участками составляло не менее 100 м. Для обследуемых участков составлялись крупномасштабные схемы зарастания с нанесением контуров индивидуальных зарослей наиболее обильных и часто встречающихся макрофитов. После составления схемы зарастания проводилось более подробное обследование участков для выявления не образующих зарослей редко встречающихся видов. Растения, находящиеся выше уреза воды, не учитывались. Итоговые электронные картосхемы зарастания создавались в программе *MapInfo Professional 6.0* на основе схем зарастания, составленных в полевых условиях. Электронные картосхемы использовались для определения площади фитоценозов основных зарослеобразующих видов и подсчета общей площади покрытия растительностью обследованных участков литорали. В качестве характеристики видового обилия использовался процент участия вида в общей площади зарастания обследованных участков.

Для оценки гидродинамических условий в литоральной зоне использовалась двухбалльная шкала степени волнения (Распопов, 1968). В соответствии с данной шкалой участки литорали с высотой волны более 0,25 м относятся к прибойной литорали (2 балла), а участки литорали с высотой волны до 0,25 м характеризуются как затишные (1 балл). Покрытие литорали крупнозернистой (валуны, камни, > 10 см в диаметре), среднезернистой (галька, гравий и песок, 0,2–10 см) и мелкодисперсной (ил, глина) фракцией донных отложений

оценивалось визуально по трехбалльной шкале (1 — отсутствие, 2 — частично, 3 — обильно). По характеру донных отложений исследованные станции подразделялись на биотопы каменисто-песчаной, мелкопесчаной, илистой и глинистой литорали (табл. 6.1.2.1). Степень антропогенного нарушения на каждой станции оценивалась по пятибалльной шкале, учитывая близость населенных пунктов, наличие пастбищ в прибрежной полосе, дампинг отходов и локальное поступление органических загрязнений. Максимальные значения переменной (4–5 баллов) получают станции, подверженные сильному антропогенному нарушению: две станции в Волховской губе: ст. 3 (д. Дубно), ст. 4 (вблизи устья реки Волхов), — а также ст. 10 (г. Питкяранта), ст. 15 (пос. Ляскеля) и ст. 23 (г. Приозерск). Минимальные значения (1 балл) получают станции, в основном расположенные в шхерном районе и районе открытых берегов. На каждой станции отбирались гидрохимические пробы для определения концентрации общего фосфора ($P_{\text{общ}}$) и электропроводности воды (УЭП).

Оценка влияния гидродинамического режима, характера грунтов, гидрохимического режима ($P_{\text{общ}}$, УЭП) и антропогенного нарушения на видовую структуру водных фитоценозов проводилась с использованием метода прямой ординации, канонического анализа соответствий (*canonical correspondence analysis, CCA*), выполненного в программном пакете Canoco (ter Braak, Šmilauer, 1998). Данный метод позволяет максимально разделить оптимумы видов в пространстве ординационных осей, являющихся линейной комбинацией факторов среды. Значения факторов среды преобразовывались логарифмированием в форме $\log_{10}(x + 1)$, а значения видового обилия (процент участия вида в общей площади зарастания) трансформировались извлечением корня квадратного, чтобы достичь нормальности распределения.

На обследованных станциях было обнаружено 37 видов макрофитов. Из них 20 видов составляют гидрофиты, 10 — гелофиты и 7 — гигрогелофиты. К наиболее часто встречаемым и обильным видам относятся *Phragmites australis*, *Potamogeton perfoliatus*, *Potamogeton gramineus* и *Eleocharis palustris*. Флористическое разнообразие на обследованных станциях изменяется в зависимости от гидродинамических условий и характера грунтов, отражая влияние гидродинамических условий на гранулометрический состав донных отложений. Число видов на затишной литорали ($11,0 \pm 1,0$) статистически достоверно ($p < 0,001$) превышает число видов на прибойной литорали ($6,3 \pm 1,4$). Соответственно, число видов на мелкопесчаных ($10,1 \pm 1,5$) и илистых ($11,3 \pm 2,1$) грунтах, которые в основном встречаются на затишной литорали, статистически достоверно ($p < 0,01$) превышает число видов на каменисто-песчаной литорали ($6,1 \pm 1,9$).

Канонический анализ соответствий позволил выявить основные факторы среды, ответственные за пространственное распределение водной растительности, а также провести их

ранжирование по значимости вклада в изменчивость видовой структуры. Первые две оси ординации охватывают в совокупности 22% общей вариабельности видовой структуры сообществ макрофитов. Первая ось ординации, объясняющая наибольшую часть в общей вариабельности данных (14%), положительно коррелирует с концентрацией $P_{\text{общ}}$ (коэффициент корреляции $r = 0,79$), электропроводностью воды ($r = 0,50$) и переменной антропогенного нарушения ($r = 0,58$). Таким образом, первая ось ординации отвечает за изменения в видовой структуре сообщества макрофитов, связанные с влиянием эвтрофирования и антропогенного нарушения. Станции, на которых растительные сообщества испытывают антропогенное воздействие располагаются в правой области диаграммы, объединяясь в группу А (рис. 6.1.2). Это станции из южного района озера: ст. 1–2 в бухте Петрокрепость вблизи устья реки Кобона, три станции в Волховской губе — ст. 4 вблизи устья реки Волхов, ст. 3 у д. Дубно и ст. 5 у д. Вороново,

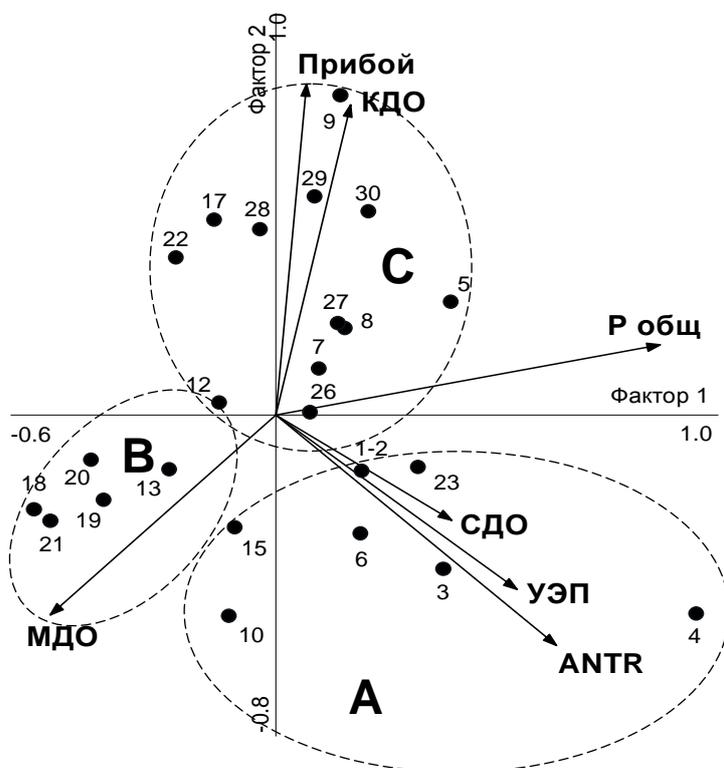


Рис. 6.1.2. Диаграмма станций описания водной растительности в пространстве первых двух осей канонического анализа соответствий. Нумерация станций в таблице 6.1.2.1. Факторы среды: Прибой — степень прибойности; КДО, СДО и МДО — покрытие крупнозернистой (валуны, камни), среднезернистой (галька, гравий и песок) и мелкодисперсной (ил, глина) фракцией донных отложений; УЭП — электропроводность воды; $P_{\text{общ}}$ — концентрация $P_{\text{общ}}$; ANTR — степень антропогенного нарушения.

а также ст. 6 в Свирской губе. В южном районе озера подъем концентрации фосфора, связанный с поступлением вод реки Волхов, приводит к развитию фитоценозов *Butomus umbellatus*, *Hydrocharis morsus-ranae* и *Utricularia vulgaris*, а также *Potamogeton pectinatus*,

который является индикатором эвтрофных условий (Sand-Jensen et al., 2000). Эти виды отличаются высокими положительными коэффициентами корреляции с первой осью и располагаются в правой области диаграммы (рис. 6.1.3). Кроме того, в группу А входят ст. 10 у г. Питкяранта и ст. 15 у пос. Ляскеля из шхерного района озера, а также ст. 23 у г. Приозерска в западном подрайоне открытых берегов. Для растительных сообществ, испытывающих антропогенный стресс, характерно увеличение проективного покрытия *Sagittaria sagittifolia* и *Sparganium emersum*. Все станции группы А располагаются в районах, которые на основании гидрохимических и гидробиологических показателей относятся к зонам экологического риска (Андроникова, Распопов, 2007). Станции с низким уровнем фосфора из шхерного района озера (ст. 12, 13, 18-21) располагаются в левой области диаграммы, объединяясь в группу В (рис. 6.1.2). Для растительных сообществ на этих станциях характерно развитие видов-индикаторов олиго-мезотрофных

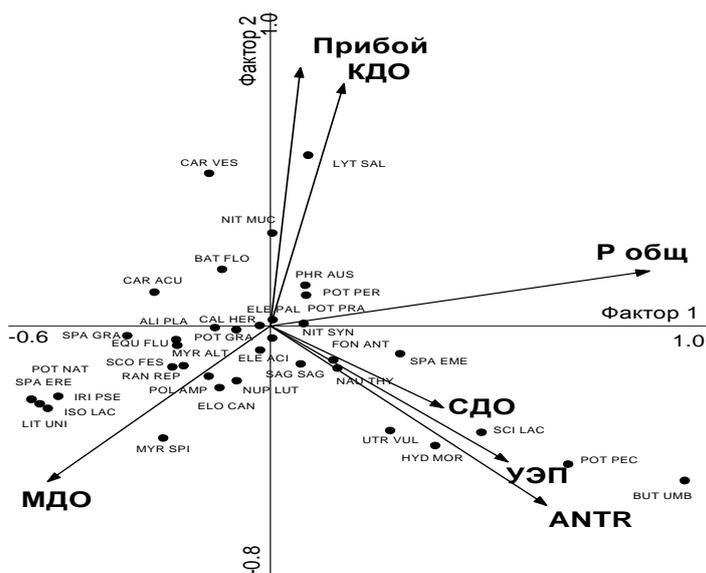


Рис. 6.1.3. Диаграмма видов макрофитов в пространстве первых двух осей канонического анализа соответствий. Факторы среды те же, что на рис. 6.1.2.1. Виды: NIT MUC — *Nitella mucronata* (A. Br.) Miquel, NIT SYN — *N. syncarpa* (Thuill.) Chev., FON ANT — *Fontinalis antipyretica* Hedw., ISO LAC — *Isoëtis lacustris* L., EQU FLU — *Equisetum fluviatile* L., NUP LUT — *Nuphar lutea* (L.) Smith, BAT FLO — *Batrachium floribundum* (Bad.) Dumort., RAN REP — *Ranunculus reptans* L., POL AMP — *Polygonum amphibium* L., NAU THY — *Naumburgia thyrsoiflora* (L.) Reichenb., LYT SAL — *Lythrum salicaria* L., MYR ALT — *Myriophyllum alterniflorum* DC., MYR SPI — *M. spicatum* L., LIT UNI —

Littorella uniflora (L.) Aschers., UTR VUL — *Utricularia vulgaris* L., CAL HER — *Callitriche hermaphroditica* L., BUT UMB — *Butomus umbellatus* L., ALI PLA — *Alisma plantago-aquatica* L., SAG SAG — *Sagittaria sagittifolia* L., ELO CAN — *Elodea canadensis* Michx., HYD MOR — *Hydrocharis morsus-ranae* L., POT GRA — *Potamogeton gramineus* L., POT NAT — *P. natans* L., POT PEC — *P. pectinatus* L., POT PER — *P. perfoliatus* L., POT PRA — *P. praelongus* Wulf., IRI PSE — *Iris pseudacorus* L., CAR ACU — *Carex acuta* L., CAR VES — *C. vesicaria* L., ELE ACI — *Eleocharis acicularis* (L.) Roem. et Schult., ELE PAL — *E. palustris* (L.) Roem. et Schult., SCI

LAC — *Scirpus lacustris* L., PHR AUS — *Phragmites australis* (Cav.) Trin. ex Steud., SCO FES — *Scolochloa festucacea* (Willd) Link, SPA EME — *Sparganium emersum* Rehm., SPA ERE — *S. erectum* L., SPA GRA — *S. gramineum* Georgi.

условий *Isoëtis lacustris*, *Littorella uniflora* и *Myriophyllum alterniflorum* (Penning et al., 2008), а также увеличение проективного покрытия *Ranunculus reptans* и *Potamogeton gramineus*. Эти виды отрицательно коррелируют с первой осью ординации, располагаясь в левой области диаграммы (рис. 6.1.3).

Вторая ось ординации, объясняющая значительно меньшую долю в общей изменчивости данных (8%), коррелирует положительно с переменной степени прибойности ($r = 0,76$) и долей крупнозернистой (валуны, камни) фракции донных отложений ($r = 0,72$). Кроме того, вторая ось коррелирует отрицательно с долей мелкодисперсной (ил, глина) фракции донных отложений ($r = -0,52$). Тем самым вторая ось ординации отвечает за изменения в растительном покрове, обусловленные влиянием гидродинамики и связанного с нею гранулометрического состава грунтов. Станции на прибойной каменисто-песчаной и мелкопесчаной литорали располагаются в верхней части диаграммы, объединяясь в группу С (рис. 6.1.2). В то же время основное большинство станций на затишной мелкопесчаной, илистой и глинистой литорали располагаются в нижней части диаграммы (группы А и В). Для зарастания прибойной каменисто-песчаной и мелкопесчаной литорали характерно доминирование *Phragmites australis* и *Potamogeton perfoliatus*. Также для прибойной литорали характерно увеличение обилия *Carex acuta*, *C. vesicaria*, *Batrachium floribundum* и *Lythrum salicaria*. Эти виды отличаются наиболее высокими положительными коэффициентами корреляции со второй осью ординации, о чем свидетельствует их расположение в верхней части диаграммы (рис. 6.1.3). Напротив, виды, предпочитающие биотопы затишной илистой и глинистой литорали, *Polygonum amphibium*, *Myriophyllum spicatum*, *Eloдея canadensis*, *Nuphar lutea* и *Sparganium erectum*, имеют высокие отрицательные коэффициенты корреляции со второй осью ординации и располагаются в нижней части диаграммы (рис. 6.1.3). Несмотря на высокое содержание $P_{\text{общ}}$ (> 60 мкг Р/л) на некоторых прибойных станциях (ст. 9 и 28), их расположение на диаграмме относительно первой оси ординации сильно отличается от расположения эвтрофных станций затишной литорали. Это свидетельствует о том, что сильное воздействие волнобоя и крупнозернистые донные отложения на прибойной литорали ограничивают распространение и развитие видов, отвечающих увеличением обилия на подъем содержания биогенных элементов. В то же время спокойные гидродинамические условия и мелкодисперсный характер грунтов на затишной литорали благоприятствуют развитию фитоценозов целого комплекса видов, толерантных к увеличению эвтрофирования.

Таким образом, в структуре сообщества макрофитов Ладожского озера наиболее выражены изменения, связанные с различным уровнем эвтрофирования отдельных участков литорали. Это указывает на потенциальную возможность использования водных растений для оценки антропогенного воздействия на экосистему Ладожского озера. В тоже время низкое флористическое разнообразие высшей водной растительности на прибойной каменисто-песчаной литорали указывает на ограниченную роль водных фитоценозов, произрастающих на прибойной литорали, в индикации эвтрофирования. Наиболее высокой информационной емкостью обладают сообщества макрофитов, развивающиеся на изолированных от волнового воздействия мелкопесчаных, илистых и глинистых мелководьях.

6.2. Перифитон

6.2.1. Структура и функционирование перифитона в притоках Ладожского озера

Впервые вопросы видового состава водорослей некоторых притоков Ладожского озера и реки Невы были освещены Е.Н. Балахонцевым (1909) в начале прошлого века. Им было показано, что в реках Волхов, Свирь, Морье и Нева в составе бентосных и перифитонных сообществ преобладали диатомовые водоросли. В 1960-х гг. исследования реки Невы были продолжены (Раскина, 1968); установлено, что в перифитоне реки преобладали диатомовые и зеленые водоросли. Позднее сообщества прикрепленных водорослей ряда ладожских притоков, протекающих по Ленинградской, Мурманской областям и Республике Карелия были описаны в публикациях С.Ф. Комулайнена (1996, 2004). Он отмечает, что большинство массовых видов в этих водоемах являются типичными для холодноводных олиготрофных рек и отмечает заметные различия в структуре доминирующих комплексов видов перифитона в разных реках. Наиболее подробные исследования перифитона притоков проводились в 2000 и 2001 гг., что отражено в работах Е.В. Станиславской (Станиславская, 2003, 2006; Станиславская, Горченко, 2005; Rusanov, Stanislavskaya, 2008).

За весь период исследований в составе перифитона исследованных рек обнаружено 440 видов и внутривидовых таксонов водорослей, принадлежащих к 6 отделам: *Bacillariophyta* — 240 таксонов, *Chlorophyta* — 143, *Cyanophyta* — 50, *Xanthophyta* — 2, *Euglenophyta* — 3, *Rhodophyta-2* (Станиславская, Горченко, 2005; Станиславская, 2006).

Наиболее разнообразно в альгофлоре перифитона изученных рек представлен отдел *Bacillariophyta* – 240 таксонов из классов *Centrophyceae* и *Pennatophyceae* (54%). Представители

первого класса в составе обрастаний рек встречаются в незначительных количествах, но такие виды как *Melosira varians* Ag., *M. undulata* (Ehr.) Kütz., *Aulacoseira subarctica* (O.Mull.) Hawarth, *A.ambigua* (Grun.) Sim. являются массовыми в разные периоды, особенно в крупных притоках. Следует также отметить, что *Melosira varians* в малых реках северного побережья отмечается в составе массовых видов на протяжении всего вегетационного периода.

Класс *Pennatophyceae* выделяется максимальным разнообразием — 225 таксонов. Во всех реках обнаруживаются представители таких родов, как *Achnanthes*, *Cocconeis*, *Fragilaria*, *Navicula*, *Cymbella*, *Gomphonema*, *Synedra*. Порядок *Araphinales* представлен 35 таксонами из 5 родов. Наиболее разнообразен род *Fragilaria*, в котором отмечается 18 таксонов. Постоянно встречаются в перифитоне такие виды как: *Ulnaria ulna* (Nitzsch.) Lange-Bertalot, *F. capucina* var. *rumpens* Kütz., *F. fasciculate* (C.A., Ag.) Kütz., *Tabellaria flocculosa* (Roth.) Kütz., *T. fenestrata* (Lyngb.) Kütz., несколько реже отмечаются *Fragilaria capucina* v. *vaucheriae* Kütz., *Meridion circulare* Ag., *Diatoma vulgare* Bory.

Порядок *Raphinales* представлен 190 таксонами из 22 родов. Представители этого порядка играют основную роль в формировании сообществ перифитона. Наиболее разнообразны роды: *Navicula* (21), *Eunotia* (18), *Nitzschia* (17), *Gomphonema* (17), *Achnanthes* (15), *Cymbella* (13), *Pinnularia* (10). Меньшим разнообразием отличаются роды *Surirella* (8), а роды *Diploneis*, *Frustulia*, *Stauroneis Amphora*, *Gyrosigma* насчитывают 3–4 таксона. Среди наиболее часто встречающихся шовных диатомей можно отметить: *Achnanthes lanceolata* (Breb.) Grun., *A. minutissima* Kütz., *Eunotia bilunaris* (Ehr.) Mills, *E. pectinalis* (Dillw.) Rabenh., *E. tenella* (Grun.) Hust., *E. exigua* (Breb.) Rabenh., *E. incisa* Greg., *Cocconeis placentula* var. *euglypta* Ehr., *Navicula cryptocephala* Kütz., *N. rhynchocephala* Kütz., *N. viridula* Kütz., *Cymbella minuta* Hilse, *Gomphonema parvulum* (Kütz.), *G. acuminatum* Ehr., *G. constrictum* Ehr., *G. olivaceum*, Greg., *Nitzschia palea* (Kütz.) W. Sm., *N. dissipata* (Kütz.) Grun.

Отдел *Chlorophyta* в перифитоне изученных рек занимает второе место по количеству таксонов — 140 (32%). Среди хлорококковых наиболее насыщены таксонами роды *Scenedesmus* (15) и *Monoraphidium* (8). Наиболее существенную роль в обрастаниях играют представители порядков *Ulotrichales*, *Cladophorales*, *Oedogoniales*. Порядок улотриковых представлен всего четырьмя родами, среди которых большее количество таксонов отмечается у рода *Stigeoclonium* (8). Роды *Ulothrix*, *Microspora* и *Aphanohaeta* насчитывают 2–3 таксона, но также играют важную роль в сообществах перифитона. Порядок кладофоровых представлен *Cladophora glomerata*, которая отмечена в обрастаниях реки Невы и *Rhizoclonium hieroglyphicum*, широко распространенный в других реках. Развитие представителей рода *Oedogonium* из порядка оедогониевых отмечается во всех водотоках, тогда как таксоны рода *Bulbochaeta* встречены лишь в реках Тулокса и Тулема. Класс конъюгат представлен двумя порядками *Zygnematales* и

Desmidiaceae. К первому из них относятся виды из трех родов *Spyrogira*, *Mougeotia*, *Zygnema*, которые часто доминируют по биомассе. Среди десмидиевых максимальное количество таксонов насчитывают роды *Cosmarium* (27) и *Closterium* (14). Во всех реках распространены *Closterium aciculare* T. West, *C. leibleinii* Kütz., *Cosmarium botrytis* Menegh., *C. reniforme*, *C. laeve*. Помимо этих родов среди обрастаний распространены одноклеточные формы из родов *Euastrum*, *Cosmoastrum* и нитчатые — *Teilingia*, *Spondylosium*, а также нередко встречаются крупноклеточные виды из родов *Pleurotaenium*, *Penium*, *Gonatozygon*.

Третий по таксономическому разнообразию отдел *Cyanophyta*, который составляет 12% от общего количества таксонов. Класс хроококковых водорослей не широко распространен в перифитоне изученных рек. По числу видов можно выделить роды *Microcystis* (7) *Merismopedia* (4) и *Coelosphaerium* (3). Наиболее многочисленным из синезеленых водорослей является класс гормогониевых водорослей. Среди них по таксономическому разнообразию можно выделить водоросли порядка *Oscillatoriales*: *Lyngbya* (7), *Phormidium* (6), *Oscillatoria* (5). Почти во всех реках отмечается развитие *Lyngbya kuetzingii* (Kütz.) Schmidle и *Phormidium ambiguum* Gom.

Из отдела *Xanthophyta* в перифитоне обнаружены представители одного рода — *Tribonema*. Такие виды как *Tribonema vulgare* West и *Tribonema affine* West имеют значительное развитие в комплексах перифитона в Тулоксе, Тулеме и Видлице.

Отдел *Rhodophyta* представлен *Batrachospermum moniliforme* Roth и *Chantransia chalibea* (Roth) Tries, значительное развитие которых отмечается в реках Уксун и Авлога.

Отдел *Euglenophyta* представлен в составе перифитона всего двумя родами — *Euglena* и *Trachelomonas*, хотя виды этих родов постоянно встречаются почти во всех притоках.

Таксономическое разнообразие водорослей перифитона в разных реках изменяется от 60 до 130. Наибольшее количество таксонов водорослей в составе обрастаний обнаружено в наиболее крупных реках Волхов (130 таксонов), Свирь (125) и Сясь (110). Минимальное число таксонов отмечено в малых притоках — Морье и Авлоге (60). Диатомовые водоросли наиболее многочисленны в Свири, в реке Морье отмечается их минимальное количество. Зеленые водоросли наиболее разнообразно представлены в перифитоне реки Тулема, а также в реках Сясь, Тулокса, Видлица, Тохма, Нева. Минимальное количество зеленых водорослей обнаруживается в реках Волхов, Паша, Бурная, Лава, Иййоки. Максимальное число видов синезеленых водорослей встречается в реках Сясь, Иййоки, Паша, а минимальное разнообразие этой группы водорослей приходится на реки Тулокса, Олонка, Бурная, Уксун, Авлога и Хиитолан. Красные водоросли обнаружены в реках Нева, Авлога, Уксун, Олонка, Оять, Паша, Тулокса и Видлица; желто-зеленые — в Неве, Видлице, Тулоксе, Волхове, Сясь, Тулеме; эвгленовые в большинстве рек, кроме Тулемы и Бурной.

Большинство обнаруженных таксонов (52%) являются типично перифитонными. Это, в основном, виды нитчатых зеленых и синезеленых водорослей, а также диатомовые водоросли. Минимальное количество типичных обрастателей отмечается в реке Уксун (36%), максимальное в реке Олонке (58%). Помимо типичных обрастателей в перифитоне закономерно обнаруживаются планктонные организмы, которые составляют 21% от общего числа таксонов. Минимальное количество планктонных форм отмечается в малых реках, а также в Тулоксе, Уксун, Олонке (до 5%). Максимальное их количество определяется в крупных притоках – Волхове, Свири, Бурной, Сяси, Янисе и Неве (до 16%). Бентосные формы составляют 24% от общего количества таксонов. Их минимальное количество отмечается в реках Тулеме и Паше (до 10%), а максимальное в малых реках Иййоки, Хиитолан, а также в Свири, Волхове и Уксуне (до 27%).

По географическому распространению основная масса видов (69%) является космополитами, бореальных видов — 17%, арктоальпийских — 14%. Группа космополитов преобладает во всех изученных реках, максимальный процент они составляют в Волхове (65%), минимальный — в Уксуне. Второе место по разнообразию, как правило, занимают бореальные виды, их максимальное развитие отмечалось в реке Свирь (16%), минимальное — в реках Тулема и Паша. Среди бореальных видов постоянно встречались *Cocconeis placentula* var. *euglypta*, *Eunotia praerupta*, *Navicula viridula*, *Cymbella minuta*. Доля арктоальпийских видов варьирует от 1% в реке Сясь до 15% в реке Уксун. Наиболее распространены из арктоальпийских видов *Frustulia saxonica*, *Tabellaria fenestrata*, *T.flocculosa*.

По отношению к солености воды 77% отмеченных видов являются индифферентами, галофилов — 12%, галофобов — 8%, олиго- и мезогалобов по 2%. Наибольший процент галофилов и олигогалобов отмечается в реке Сясь, галофобов — в реке Уксун, мезогалобов — в реках Оять и Тулокса. Минимальное количество галофилов обнаруживается в Уксуне, галофобов — в реке Бурной. Из галофилов к массовым видам относятся *Melosira varians*, *Navicula rhynchocephala*, а массовыми галофобами являются *Eunotia incisa* и *E. praerupta*.

По отношению к активной реакции среды (рН), также преобладают индифференты — 43%, алкалифилы составляют 36%, ацидофилы — 19%, алкалибионты — 2%. Преобладание алкалифилов в составе перифитона связано с относительно высокими величинами рН среды, которые характерны для исследуемых рек. В реках Тулема, Оять, Паша, Уксун, Сясь, Олонка, Нева по видовому разнообразию первое место занимают индифференты, тогда как в Свири, Бурной, Волхове, Видлице и Янисе по числу видов преобладают алкалифилы. Максимальное количество ацидофилов отмечается в реке Уксун, минимальное — в реке Сясь.

По отношению к загрязнению органическим веществом больше 65% обнаруженных видов имеют индикаторное значение. По показателям сапробности максимальный процент

видов приходится на группу β -мезосапробов — 38%, доля олигосапробов — 17%, α -мезосапробов — 9%, ксеносапробов — 4%, ρ -сапробы не встречаются совсем. Индикаторы β -мезосапробных условий преобладают во всех водоемах, за исключением Тулоксы, где их доля совпадает с долей олигосапробов. Максимальный процент β -мезосапробов (до 27%) обнаруживается в реках Волхов, Сясь и Нева, минимальный в Уксуне, для которого отмечается также максимальное количество олигосапробов (16%). Доля олигосапробов минимальна в Волхове и Янисе. Содержание ксеносапробов изменяется от 1% в реке Бурная до 10% в реке Тулокса, среди которых отмечаются такие массовые формы как: *Eunotia incisa*, *E.exigua*, *Frustulia saxonica*, *F.vulgaris*, *Pinnularia viridis*. Максимальная доля α -мезосапробов обнаруживается в реках Волхов и Олонка (9%), минимальная — в Тулеме и Паше (4%). Среди массовых видов-показателей загрязнения, в реках были найдены *Cymbella silesiaca* Bleisch, *Navicula cryptocephala*, *N. rhynchocephala*, *N. viridula*.

Структура биомассы перифитона изменяется в течение всего вегетационного сезона и различается по рекам, но в целом соответствует структуре этих сообществ в большинстве водотоков Северо-Запада. В реках Волхов и Лава на протяжении всего периода исследований развиваются только диатомовые водоросли. В мае в таких реках, как Бурная, Янис, Олонка, Волхов, Тулокса, Видлица, Назия, Хиитолан, Иййоки, Морье преобладают преимущественно диатомовые водоросли, которые определяют от 60 до 100% общей биомассы. В реках Сясь, Свирь, Нева, Мийнола помимо диатомовых наблюдается развитие зеленых водорослей, которые определяют от 20 до 60% общей биомассы. В Иййоки в этот период наблюдается заметное развитие синезеленых водорослей, а в Авлоге красных водорослей (рис. 6.2.1).

В июле в большинстве рек заметно увеличивается развитие зеленых и синезеленых водорослей. В таких реках как Янис, Паша, Тулокса, Оять, Олонка, Уксун, Видлица продолжают преобладать диатомовые водоросли, при определенном развитии зеленых и синезеленых водорослей. В реках Бурная, Нева, Свирь, Тулема, Назия напротив, большего развития достигают зеленые водоросли, в Сяси, Ййоки и Морье можно наблюдать преобладание синезеленых водорослей (рис. 6.2.2).

В сентябре роль зеленых и синезеленых водорослей еще более возрастает. Так, в реках Бурная, Нева, Тулема, Уксун, Сясь, Тохма зеленые водоросли составляют свыше 70% объема общей биомассы. В других реках вновь увеличивается доля диатомовых, например, в Тулоксе, Видлице диатомовые превышают 60% общей биомассы. В реках Оять, Олонка и Паша диатомовые и зеленые водоросли развиваются практически в равных количествах при незначительном развитии синезеленых водорослей. В Свири преобладают зеленые водоросли при довольно высоком значении синезеленых и диатомовых. В отличие от других водотоков в Янисе значительно повышается доля синезеленых водорослей (рис. 6.2.3).

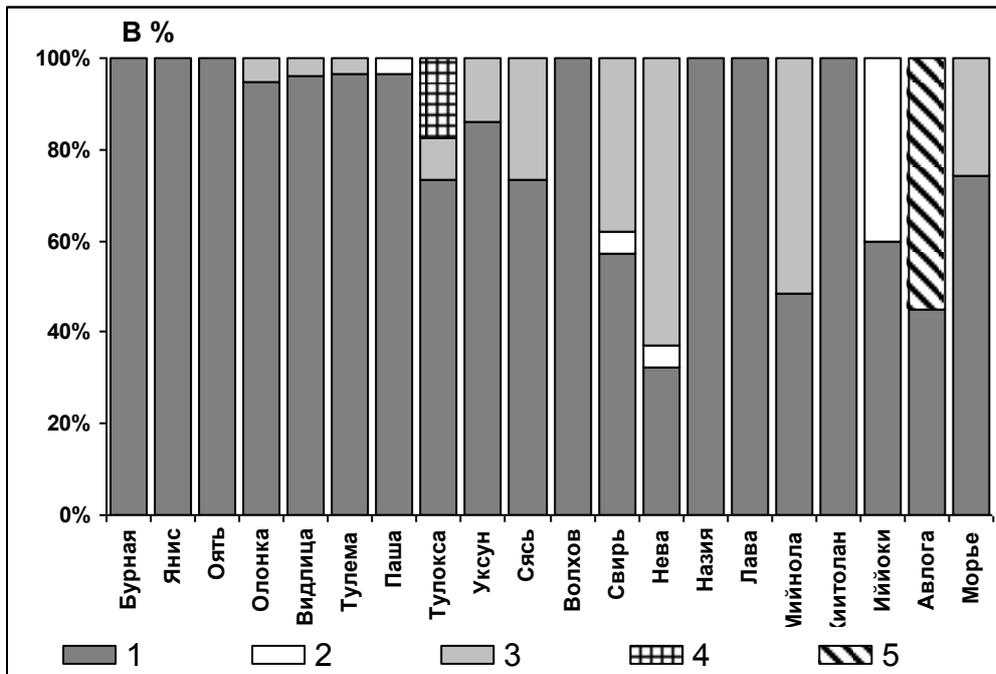


Рис. 6.2.1. Структура биомассы водорослей перифитона в исследованных реках в мае 2001г. 1 — диатомовые водоросли, 2 — синезеленые водоросли, 3 — зеленые водоросли, 4 — желто-зеленые водоросли, 5 — красные водоросли.

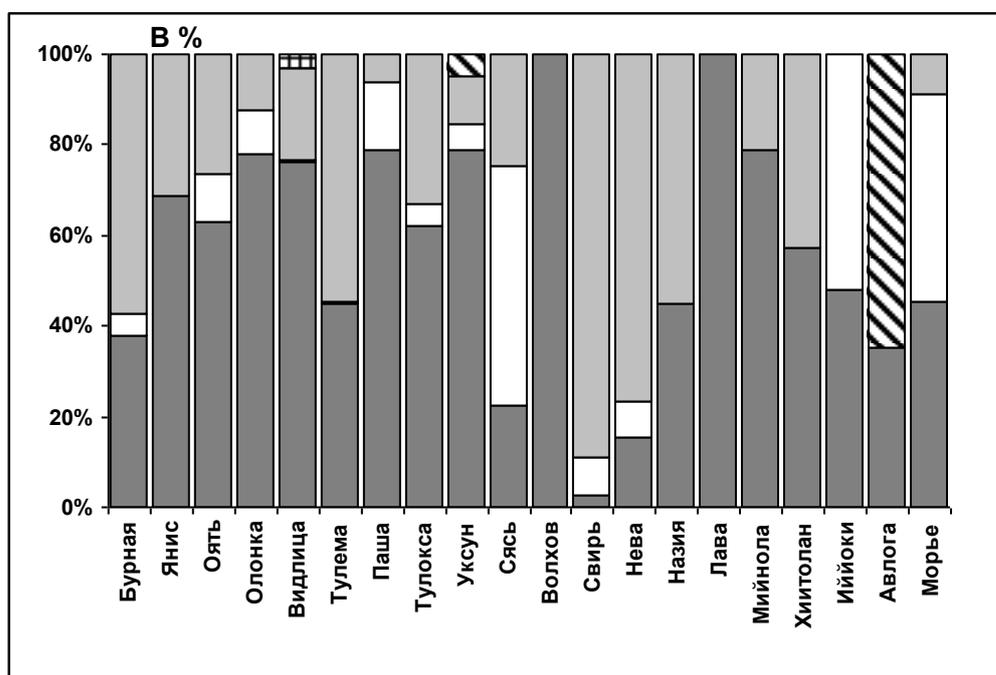


Рис. 6.2.2. Структура биомассы водорослей перифитона в исследованных реках в июле 2001 г. (обозначения как на рис. 6.2.1).

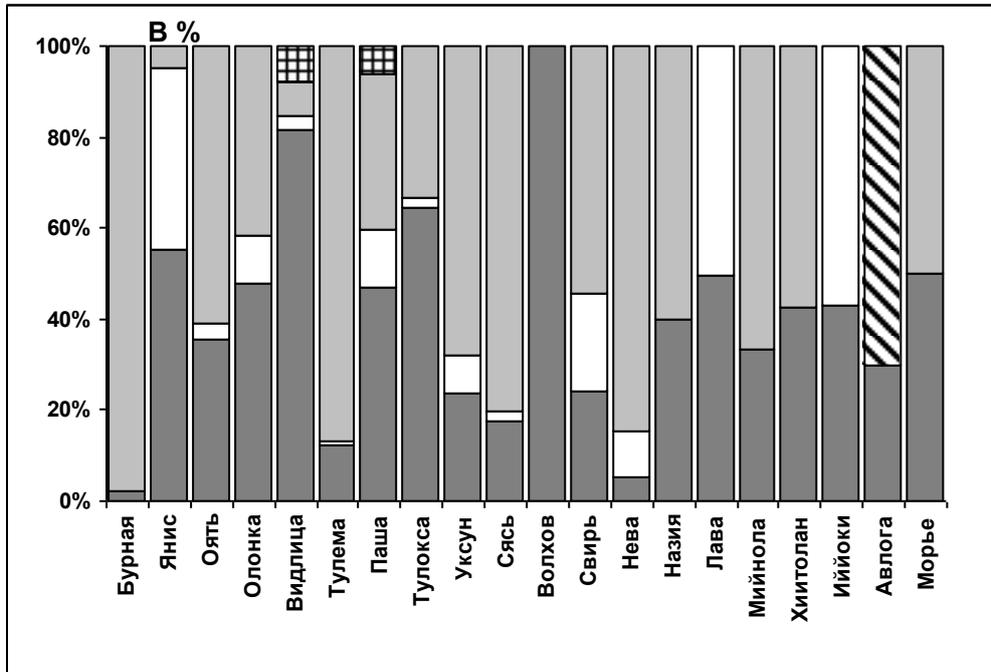


Рис. 6.2.3. Структура биомассы водорослей перифитона в исследованных реках в сентябре 2001 г. (обозначения как на рис. 6.2.1).

В целом, оценивая видовой состав, его разнообразие и структуру сообществ перифитона в исследованных реках можно отметить, что она сходна с составом и структурой большинства рек умеренной зоны (Комулайнен, 1996, 2004).

6. 2. 2. Структура и функционирование перифитона в литорали Ладожского озера

Первые, очень краткие, сведения о водорослях обрастаний в Ладожском озере относятся к концу XIX в., когда проф. Х. Гоби опубликовал сообщение о поездке с альгологической целью на Ладожское озеро (Гоби, 1878). И хотя до 80-х гг. прошлого столетия специальных работ по изучению перифитона на озере не проводилось, сведения о водорослях обрастаний мы встречаем в ряде работ. В связи с прокладкой водопровода для Петербурга была создана экспедиция по изучению качества воды в Ладожском озере. Ею был собран и опубликован обширный материал по водорослям южной части Ладожского озера. В сферу изучения экспедиции вошли водоросли фитопланктона, перифитона и донные (Балахонцев, 1909). В 1968 г. вышел очередной том Трудов Института озераведения с итогами работ Ладожской экспедиции Института по растительным ресурсам озера. В работе Н.Н. Давыдовой и Н.А. Петровой приведен список водорослей, встреченных в озере, который включает в себя типично-планктонные, бентосные виды и виды-обрастатели. Дана эколого-систематическая характеристика большинства встреченных водорослей (Давыдова, Петрова, 1968).

Исследование перифитона затруднено рядом методических и методологических проблем. Главная из них — неоднозначность трактовки объекта исследований, отсутствие стройной системы основных терминов и понятий. Используемое здесь толкование термина «перифитон» — водоросли обрастаний (синоним термина «фитоперифитон»).

Изучение перифитона как одного из компонентов литоральной зоны Ладожского озера было начато Институтом озероведения в 1980 г. Развитие перифитона в литоральной зоне озера, его видовой состав и продукционные характеристики обусловлены большим разнообразием биотических и абиотических факторов среды, широким диапазоном их изменений: размерами озера (крупнейшее в Европе), изрезанностью береговой линии, особенностями гидрологического режима озера, гидродинамикой водных масс. Важным условием для существования фитоперифитона является наличие субстратов, пригодных для заселения водорослями-обрастателями. В Ладоге таковыми являются скалисто-глибовые и каменистые берега, имеющие широкое распространение в северной части озера, в прибрежье юго-восточного и западного районов озера и высшие водные растения, занимающие менее 5% площади литоральной зоны (Распопов и др., 1998). На песчаных берегах, особенно в прибойной зоне, обрастания обычно отсутствуют.

За годы работы Ладожской экспедиции изучены видовой состав водорослей обрастаний, численность и биомасса группировок перифитона, их распространение по озеру. Получены продукционные характеристики сообществ фитоперифитона. Проведены сезонные наблюдения за развитием альгоценозов-обрастателей в заливах с различной антропогенной нагрузкой — в шхерном районе и Шлиссельбургской бухте. Оценен вклад перифитона в создании органического вещества среди других продуцентов (фитопланктона и макрофитов) в небольших заливах с различной степенью зарастания макрофитами. Состояние перифитона и тенденции его изменений, происходящих в группировках обрастаний на протяжении длительного отрезка времени, представлены в работах И.М. Распопова и М.А. Рычковой (Распопов и др., 1998; Рычкова, 1987, 2002, 2003, 2007).

Перифитон Ладожского озера представлен 466 видами и внутривидовыми таксонами, принадлежащими к 8 отделам. Наиболее разнообразны отделы *Bacillariophyta* — 192 таксона (41%), *Chlorophyta* — 190 (41%) и *Cyanophyta* — 68 (14.5%). Остальные отделы представлены незначительным числом таксонов водорослей, и их вклад в общий список составляет менее 4%. Доминирование в перифитоне озера диатомовых, зеленых и синезеленых водорослей характерно для больших озер бореальной зоны. Среди синезеленых водорослей большим разнообразием выделяются роды *Anabaena*, *Microcystis*, *Lyngbya*, *Oscillatoria*, а из диатомовых — *Eunotia* (21 таксон), *Cymbella* (20), *Gomphonema* (15), *Achnanthes* (11). Среди зеленых водорослей наибольшим числом таксонов выделяются протококковые (96) и десмидиевые (62).

Из них наибольшей видовой насыщенностью характеризуются роды *Scenedesmus* (13) и *Cosmarium* (28).

Перифитон Ладожского озера представлен, в основном, бореальными видами и космополитами, что характерно для водоемов умеренной зоны. По отношению к солености воды в соответствии с классификацией Кольбе (Давыдова, 1985) все встреченные водоросли являются пресноводными, олигогалобами, большую часть которых составляют индифференты.

По отношению к активной реакции среды по системе Хустеда (Давыдова, 1985) большинство из них — индифференты и алкалифилы. Ацидофилы представлены, в основном, диатомеями из рода *Eunotia* и десмидиевыми из рода *Cosmarium*.

По численности в обрастаниях доминируют виды родов *Fragilaria*, *Gomphonema*, *Cymbella*, *Achnanthes*, *Diatoma* из диатомовых, из зеленых — представители родов *Spirogyra*, *Oedogonium*, *Bulbochaete*, *Cladophora*, *Ulothrix*, *Mougeotia*, из синезеленых — *Gomphosphaeria*, *Leptochaete*, *Microcystis*.

На открытых берегах озера в эпилитоне (обрастания на каменистых и скалистых субстратах) имеет широкое распространение группировка с доминантом *Ulothrix zonata* (Web. et Mohr.) Kütz. Только этот вид, прикрепляясь своими ризоидами к каменистому или скалистому субстрату, может выдерживать динамические нагрузки волн открытого озера. *Cladophora glomerata* (L.) Kütz. — водоросль, широко распространенная в перифитоне многих водоемов мира, имеет локальное распространение в Ладожском озере. В отдельные годы *Cladophora glomerata* обильна в Волховской и Шурыгской бухтах, в районе г. Питкяранты, вдоль западного берега Шлиссельбургской бухты (Рычкова, 1987, 2002; Rychkova, 1995). В вершинах многочисленных заливов, изолированных от волн открытой Ладоги в летние месяцы обычно доминируют зеленые нитчатые водоросли, представители родов *Oedogonium*, *Spirogyra*, *Bulbochaete*, реже — *Zygnema* и *Mougeotia*. Обильны здесь и диатомовые, но, как правило, это мелкие виды родов *Achnanthes*, *Gomphonema*, *Eunotia* и их доля в общей биомассе группировок незначительна. В вершинах заливов, в устьях рек и на выходе из заливов, там, где происходит смешение речных и озерных вод, обычно отмечается максимальное видовое разнообразие водорослей формирующих группировки. Более подробно о распространении водорослей обрастаний по площади в литоральной зоне и сезонных изменениях в перифитоне в работах И.М. Распопова и М.А. Рычковой (Распопов и др., 1998; Рычкова, 1987, 2000, 2002, 2003).

Многообразие природных условий, оказывающих влияние на существование и развитие группировок обрастаний, и то, что они сформированы видами, размеры которых могут отличаться на несколько порядков, обуславливают очень большую амплитуду численности, биомассы, содержания хлорофилла «а» и первичной продукции (табл. 6.2.1, 6.2.2). Такая

амплитуда количественных показателей характерна для перифитона крупных озер и водохранилищ (Рычкова, 1975; Костикова, 1980, 1992; Шевченко, 1994; Jonsson, 1992 и др.). Все экстремально высокие значения биомассы, содержания хлорофилла «а» и первичной продукции группировок обрастаний наблюдаются в Волховской губе.

Литоральная зона Ладожского озера в силу разнообразия природных условий поделена на районы южный, западный, шхерный, восточный и Валаамский архипелаг. В табл. 6.2.1 и 6.2.2 приведены изменения биомассы и содержания хлорофилла группировок эпифитона по годам и по районам.

Таблица 6.2.1

Биомасса группировок эпифитона (мг/см²) в литорали Ладожского озера в 2000, 2006 гг.

Районы	2000 год		2006 год	
	Количество станций	Биомасса	Количество станций	Биомасса
Южный	8	<u>4,24</u> 0,04–25,54	6	<u>1,37</u> 0,18–3,65
Западный	6	<u>0,10</u> 0,05 –0,30	6	<u>0,74</u> 0,16 –2,97
Шхерный	9	<u>0,66</u> 0,04–3,35	8	<u>2,24</u> 0,11– 8,48
Восточный	5	<u>1,36</u> 0,13–3,53	3	<u>0,70</u> 0,17–1,40
Валаамский архипелаг	2	<u>0,55</u> 0,16–0,94	2	<u>1,68</u> 0,67–2,70

Многолетние работы по определению первичной продукции показывают, что наиболее интенсивно процесс фотосинтеза идет в южной части озера ($A = 1,17 \text{ г O}_2/\text{м}^2 \text{ сут.}$). Процесс создания органического вещества вдоль западного берега идет в 1,5 раза интенсивнее по сравнению с восточным. Возможно, это связано с более обширными зарослями макрофитов на восточном берегу. Поскольку макрофиты и перифитон являются конкурентами за биогенные элементы и свет, то при интенсивном развитии высшей водной растительности, ухудшаются световые условия для вегетации водорослей обрастаний, соответственно, существенно снижается и интенсивность фотосинтеза перифитона.

Содержание хлорофилла «а» (мг/м²) в группировках обрастаний

Год	Макрофиты	Камни	Среднее	Максимальное
1986	4,55	9,51	6,95	44,13
1987	6,42	23,53	11,45	76,93
1988	7,72	29,34	10,15	74,17
1989	10,50	8,13	9,78	1202,01
1990	13,83	2,16	12,97	115,33
1991	10,04	11,03	10,20	403,83
1992	12,23	65,90	22,15	137,67
1993	12,34	47,66	22,43	186,50
1996	6,15	8,50	6,44	46,18
1997	9,44	19,22	15,56	102,78
1998	32,34	50,66	37,83	86,75

Средние значения первичной продукции группировок эпифитона изменяются в пределах 0,5–0,8 гО₂ /м² сутки. Разброс данных по продукции в группировках обрастаний на каменистых субстратах значительно выше, чем в обрастаниях с макрофитов, что, в основном, обусловлено динамикой вод. Значимость перифитона в формировании запаса органического вещества в водоеме зависит, прежде всего, от наличия субстрата, пригодного для заселения и развития водорослей обрастаний, что в значительной степени определяется морфометрией озера. В отдельных мелководных заливах шхерного района, интенсивно заросших макрофитами, продукция перифитона может составлять 15% в общем балансе создания органического вещества (Летанская и др., 1987).

Экосистема Ладожского озера, на территории водосбора которого проживает более 3,5 млн человек, испытывает огромную антропогенную нагрузку. Особенно сильное влияние деятельности человека проявляется в литоральной зоне — зоне обитания и развития перифитона. Процессы, обусловленные деятельностью человека и вызывающие загрязнение как всей акватории озера, так и отдельных его участков тяжелыми металлами, бытовыми и промышленными стоками оказывают влияние на видовой состав, биомассу и продукционные показатели группировок обрастаний. Наблюдения показывают, что среди видов-доминантов уменьшается доля олигосапробов — *Tabellaria fenestrata* (Lung.) Kütz., *T. flocculosa* (Roth.)

Kütz., *Fragilaria capucina* Desm., *F. crotonensis* Kitt., а также представителей родов *Rivularia* и *Gloeothrichia*. Увеличивается в перифитоне численность бета-мезосапробов — *Diatoma elongatum* (Lyngb.) Ag., *Pediastrum boryanum* (Turp.) Menegh., *P. duplex* Meyen, *Cocconeis pediculus* Ehr, *C. placentula* Ehr, представителей родов *Gomphonema*, *Eunotia*. Особенно сильные изменения в перифитоне произошли в устьях рек и в вершинах заливов, испытывающих влияние антропогенных факторов. На берегах открытой Ладоги происходит уменьшение площадей, занятых *Ulothrix zonata*.

Реакция водорослей перифитона на биогенную нагрузку отличается от реакции водорослей фитопланктона. С увеличением в воде содержания фосфора в первую очередь увеличивается численность зеленых нитчатых водорослей, наблюдается интенсивное развитие *Cladophora glomerata*, видов родов *Spirogyra*, *Oedogonium*, *Mougeotia* (Величко, 1982). Аналогичные изменения при увеличении антропогенной нагрузки отмечены в перифитоне многих озер и рек (Штина, 2000; Комулайнен, 2007; Pieszynska et al. 1988). На Ладоге в летние месяцы вклад зеленых водорослей в биомассу группировок обрастаний может составлять 75–80% от общей величины (табл. 6.2.3).

Таблица 6.2.3

Вклад основных систематических отделов (в % от биомассы) в общую биомассу эпифитона

Район	Cyanophyta		Bacillariophyta		Chlorophyta		Другие	
	2000 г.	2006 г.	2000 г.	2006 г.	2000 г.	2006 г.	2000 г.	2006 г.
Южный	4,2	1,8	15,5	21,5	78,7	76,3	1,6	0,4
Западный	4,1	4,9	37,5	20,1	47,1	68,4	11,3	6,6
Шхерный	3,9	2,6	34,9	37,0	60,0	58,6	1,2	1,8
Восточный	1,8	1,1	18,0	32,8	80,0	66,0	0,2	0,1
о. Валаам	2,2	5,0	36,7	10,6	60,5	84,1	0,6	0,3

С увеличением антропогенной нагрузки на водоем все более актуальной является оценка экологического состояния озера. Наиболее часто для оценки качества воды рассчитываются индексы, основанные на развитии организмов при тех или иных условиях среды. Вычисленные по методу Пантле-Бука в модификации Сладечека (1973) индексы сапробности для видов

доминантов фитообрастаний свидетельствуют в основном об олиго-бета и бета-мезасопробных условиях в литорали озера.

6.3. Фитопланктон

6.3.1. Фитопланктон притоков Ладожского озера

Фитопланктон притоков Ладожского озера до конца XX в. оставался слабо изученным. Имелись лишь немногочисленные данные о видовом составе фитопланктона в устье некоторых рек (Балахонцев, 1909; Петрова, 1968). Лучше всего изучен фитопланктон Невы (Раскина, 1968) и озерно-речной системы Вуоксы (Трифонова, 1995; Состояние биоценозов..., 2004). Институтом озероведения РАН регулярные исследования фитопланктона притоков Ладоги проводятся с 1995 г. (Трифонова и др., 2001а, б; Трифонова, Павлова, 2004). По результатам наиболее подробных исследований 2000–2005 гг. проведен сравнительный анализ уровня и структуры биомассы весеннего, летнего и осеннего фитопланктона 21 притока и Невы, оценено их трофическое состояние и степень сапробности (Оценка состояния..., 2006; Trifonova et al., 2007 и др.). Исследованные притоки можно разделить на четыре группы: 1) реки северного побережья: Бурная, Вуокса (старое русло), Хиитолан, Иййоки, Мийнола, Тохма, Янис, Уксун; 2) реки северо-восточного побережья: Тулема, Видлица, Тулокса, Олонка; 3) реки юго-восточного побережья: Свирь, Паша, Оять, Сясь; 4) реки южного и юго-западного побережья: Волхов, Назия, Лава, Морье, Авлога.

В фитопланктоне 22 рек бассейна Ладожского озера обнаружено 658 видов (746 таксонов) водорослей, принадлежащих к 10 отделам, 14 классам, 26 порядкам и 67 семействам. Наиболее разнообразны во всех реках *Bacillariophyta* — 356 таксонов (47,6%), *Chlorophyta* — 211 (28,2%), *Cyanophyta* — 46 (7%), *Euglenophyta* — 45 (6,6%), *Chrysophyta* — 43 (5,6%). Остальные отделы представлены значительно меньшим числом таксонов. Максимальным разнообразием (более 200 таксонов) отличается фитопланктон наиболее крупных рек — Вуоксы, Бурной, Волхова, Свири и Невы, вытекающих из больших озер (рис. 6.3.1). Большое количество таксонов (180–200) обнаружено в Олонке, Видлице, Сяси, Тулоксе, Морье и Ояти. Наименее разнообразен фитопланктон малых рек Лава, Тохма и Иййоки (менее 100 таксонов).

В большинстве исследованных рек по числу таксонов преобладают диатомовые водоросли (32–75% общего числа) и только в Видлице и Неве — зеленые (рис. 6.3.1). Наиболее существенна роль диатомовых (более 50%) в планктоне малых притоков Хиитолане, Мийноле, Иййоки, Тохме, Назии и Авлоге за счет бентосных форм и обрастателей. Представители *Pennatophyceae* доминируют по числу таксонов, составляя в реках от 58 до 83% общего числа

таксонов диатомовых. Из них для большинства рек типичны: *Amphora ovalis* (Kütz.) Kütz., *Asterionella formosa* Hass., *Cocconeis placentula* Ehr. с разновидностями, *Cymbella ventricosa* Kütz., *Diatoma tenuis* Ag., *Fragilaria crotonensis* Kitt., *F. ulna* (Nitzsch.) Lange-Bert., *F. virescens* Ralfs, *Gomphonema parvulum* (Kütz.) Kütz., *Meridion circulare* Ag., *Navicula radiosa* Kütz., *Nitzschia acicularis* W. Sm., *N. palea* (Kütz.) W. Sm., *Tabellaria fenestrata* (Lyngb.) Kütz., *T. flocculosa* (Roth.) Kütz. и др. Из центрических диатомей наиболее характерны *Aulacoseira ambigua* (Grun.) Sim., *A. granulata* (Grun.) Sim., *A. islandica* (O.Müll.) Sim., *A. subarctica* (O.Müll.) Haworth, *Cyclostephanos dubius* (Fricke) Round, *Cyclotella kuetzingiana* Thw., *C. meneghiniana* Kütz., *C. pseudostelligera* Hust., *C. radiosa* (Grun.) Lemm., *C. stelligera* Cl. et Grun., *Stephanodiscus minutulus* (Kütz.) Cl. et Moll., *S. neoastraea* (Håkansson et Hickel) emend Casper, Scheffler et Augsten, *S. hantzschii* Grun. и *Melosira varians* Ag. Представители *Centrophyceae* наиболее разнообразны в Неве, Янисе, Тохме, Тулоксе, Ояти и Иййоки (34–42% общего числа диатомей), наименее — в Мийноле, Назии, Морье, Авлоге (17–20%). В некоторых реках обнаружены редкие и/или впервые описанные для северо-запада России виды: *Aulacoseira perglabra* (Oestrup) Haworth, *A. tenella* (Nyg.) Simonsen, *A. tenuior* (Grun.) Krammer, *Cyclotella atomus* Hust., *C. tripartita* Håkansson, *Stephanodiscus delicatus* Genkal, *S. triporus* Genkal et Kuzmin, *Thalassiosira bramaputrae* (Her.) Håkansson et Locker, *T. guillardii* Hasle (Генкал, Трифонова, 2009; Trifonova, Genkal, 2001; 2006).

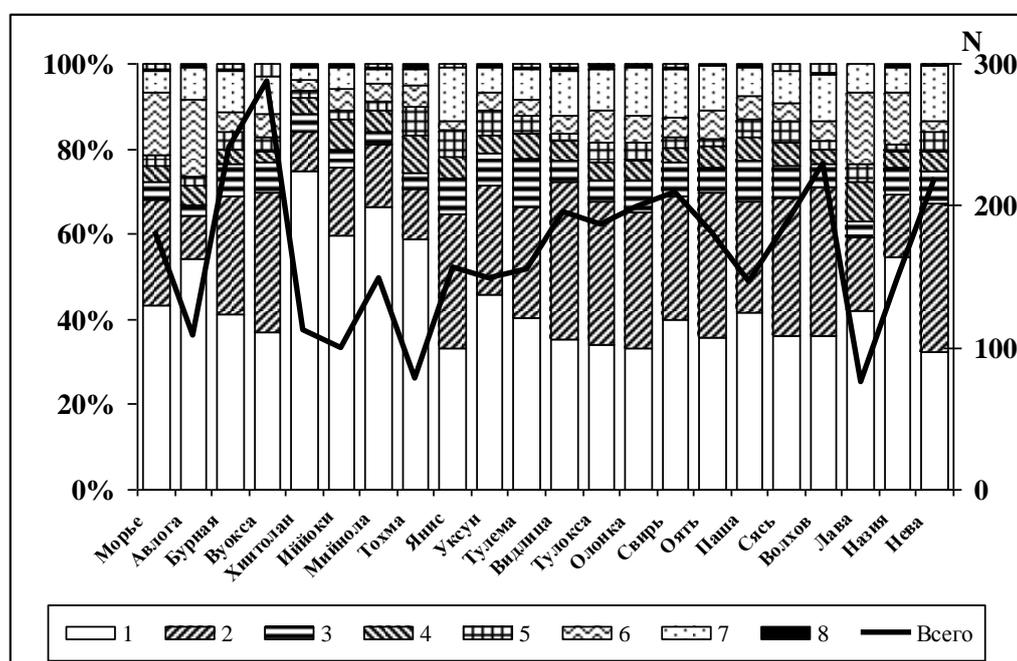


Рис. 6.3.1. Таксономический состав и процентное соотношение отделов водорослей в фитопланктоне притоков Ладожского озера и реки Невы.

1 — *Bacillariophyta*, 2 — *Chlorophyta*, 3 — *Chrysophyta*, 4 — *Cryptophyta*, 5 — *Dinophyta*, 6 — *Euglenophyta*, 7 — *Cyanophyta*, 8 — *Raphidophyta*, 9 — *Xanthophyta*, 10 — *Rhodophyta*

Зеленые водоросли составляют в планктоне притоков Ладожского озера от 9 до 37% общего числа таксонов и наиболее разнообразны в крупных реках Бурной, Волхове, Видлице, Вуоксе, Тулоксе, Ояти и Неве. В малых реках, за исключением Морье, роль *Chlorophyta* не превышает 15–17%. В Тохме, Хиитолане и Авлоге обнаружено всего 9–11 видов зеленых. К наиболее часто встречающимся относятся: *Botryococcus braunii* Kütz., *Chlamydomonas* spp., *Coelastrum microporum* Näg., *Crucigenia tetrapedia* (Kirchn.) W. et G.S.West, *Dictyosphaerium pulchellum* Wood, *Koliella spiculiformis* (Vish.) Hind., *Monoraphidium contortum* (Thur.) Kom.-Legn., *M. griffithi* (Berk.) Kom.-Legn., *Pandorina morum* (Müll.) Bory, *Pediastrum tetras* (Ehr.) Ralfs, *Scenedesmus quadricauda* (Turp.) Bréb., *Sphaerocystis schroeteri* Chod., *Closterium acutum* (Lyngb.) Bréb., *C. moniliferum* (Bory) Ehr, *Staurastrum paradoxum* Meyen и др. Практически во всех реках преобладают хлорококковые водоросли (55% общего числа таксонов *Chlorophyta*) и только в Мийноле — десмидиевые (за счет видов рода *Closterium*). Большое количество таксонов десмидиевых отмечено в Янисе, Тулоксе, Неве и Морье.

Синезеленые водоросли в изученных реках составляют 3–12% таксономического состава и также наиболее разнообразны (25–28 видов) в крупных реках Бурной, Янисе, Олонке, Тулоксе, Видлице, Ояти, Волхове и Неве (рис. 6.3.1), наименее (3–5) — в малых северных реках Хиитолане, Тохме, Мийноле, Иййоки, Лаве. По числу таксонов доминируют роды *Anabaena* (7) и *Merismopedia* (4). В планктоне большинства рек встречены: *Chroococcus turgidus* (Kütz.) Näg., *Coelosphaerium kuetzingianum* Näg., *Merismopedia warminginiana* Lagerh., *Microcystis aeruginosa* (Kütz.) Kütz., *M. wesenbergi* (Kom.) Kom., *Snowella lacustris* (Chodat) Kom. et Hind., *Woronichinia compacta* (Lemm.) Kom. et Kom.-Legn., *W. Naegeliana* (Unger) Elenk, *Anabaena lemmermannii* P. Richt., *Aphanizomenon flos-aquae* (L.) Ralfs, *Planktolynghya limnetica* (Lemm.) Anagn. et Kom., *Phormidium tenue* (Agardh.) Anagn. et Kom. Для многих рек характерны *Planktothrix agardhii* (Gom.) Anagn. et Kom. и *Oscillatoria limosa* (Dillw.) Ag.

Доля эвгленовых водорослей в планктоне изученных рек колеблется от 2 до 8% общего таксономического состава фитопланктона притоков. Больше половины таксонов *Euglenophyta* отмечены только в малых загрязняемых реках южного и юго-западного побережья — Назии, Лаве, Морье и Авлоге, где они составляют 12–18% таксономического состава (рис. 6.3.1). Максимальное количество таксонов (27) обнаружено в планктоне Морье, где на протяжении всего сезона отмечаются многочисленные виды эвгленовых из родов *Trachelomonas*, *Euglena* и *Phacus*. Значительное разнообразие эвгленовых в указанных притоках, очевидно, связано с их более высокой минерализацией и загрязнением.

Большинство золотистых водорослей относится к родам *Dinobryon*, *Kephyrion* и *Mallomonas*. Типичными для многих рек являются *Chrysococcus rufescens* Klebs, *Dinobryon divergens* Imh., *D. bavaricum* Imh., *D. suecicum* Lemm., *Kephyrion moniliferum* (Schmid) Bourrelly,

Mallomonas tonsurata Teil., *Synura uvella* Ehr. em. Korsch. и др. Максимальное количество видов *Chrysophyta* зарегистрировано в Вуоксе, Бурной, Тулеме, Свири и Неве, а наиболее существенна их доля в таксономическом составе планктона Тулемы, Паши, Яниса и Свири — 8–12% (рис. 6.3.1). Разнообразие золотистых, как правило, увеличивается в октябре – ноябре за счет развития холодноводных видов из родов *Kephyrion* и *Pseudokephyrion*.

Криптофитовые водоросли составляют 3–9% общего таксономического списка и представлены широко распространенными видами: *Chroomonas acuta* Uterm., *Cryptomonas erosa* Ehr., *C. curvata*, *C. marssonii* Skuja, *C. ovata* Ehr., *Rhodomonas lacustris* Pasch. et Ruttn. В альгофлоре крупных рек Бурной, Свири, Волхова роль *Cryptophyta* минимальна, а наибольшее значение они имеют в реках восточного и северо-восточного побережья — Паше, Сяси, Ояти, Олонке, а также малых загрязненных реках Лаве, Морье, Тохме, Иййоки, Нази.

На протяжении периода исследований наблюдалось постепенное распространение рафидофитовой водоросли *Gonyostomum semen* Diesing на водосборе Ладоги. В конце 90-х гг. вид был обнаружен в 5 из 13 изученных рек (Трифонова и др., 2001б), преимущественно в северных и восточных притоках — Уксуне, Тулеме, Видлице, Тулоксе и Олонке. В настоящее время *Gonyostomum* не встречен только в Сяси, Лаве и Янисе (Оценка состояния..., 2006). Экспансия этого вида в водоемах Финноскандии отмечается с 70-х гг. прошлого столетия (Heinonen, 1980; Cronberg et al., 1988).

Альгофлора исследованных рек, как и большинства водоемов умеренной зоны, представлена главным образом космополитными видами (61–85% таксонов с известной характеристикой). Бореальные виды составляют около 16% общего количества таксонов, арктоальпийские — 12%. Последние представлены в основном диатомеями из родов *Aulacosira*, *Achnanthes*, *Eunotia*, *Frustulia*, *Hannea*, *Stauroneis*, *Tetracyclus*.

Более половины (276 из 494) обнаруженных водорослей — типично планктонные организмы. К планктонным относится большинство центрических диатомей, зеленых хлорококковых и десмидиевых водорослей, эвгленовых, динофитовых, золотистых и криптомонад. В то же время большинство пеннатных диатомей являются бентическими или обрастателями. В некоторых малых реках (Хиитолан, Мийнола) доля последних в планктоне превышает 50%.

По отношению к солености воды в соответствии с классификацией Кольбе (Давыдова, 1985) все обнаруженные водоросли являются пресноводными, олигогалобами, большую часть составляют индифференты — до 73% общего числа таксонов с известной характеристикой. Из 443 видов и разновидностей водорослей, являющихся индикаторами активной реакции среды по модифицированной системе Хустеда (Давыдова, 1985), 56 — ацидофилы, 187 — индифференты, 200 — алкалофилы. Ацидофилы в альгофлоре рек составляли 3–21%, а

наибольший процент их отмечен в Уксуне, Тулеме, Авлоге и Тохме, минимальный — в Неве, Сяси и Волхове. Ацидофилы представлены в основном пеннатыми диатомеями из рода *Eunotia*, отдельными видами из родов *Aulacoseira*, *Fragilaria*, *Navicula*, *Tetracyclus* и некоторыми десмидиевыми и золотистыми.

Анализ видового состава на сапробность показал, что около половины обнаруженных видов-индикаторов (42%) относятся к β -мезосапробам, характеризующим условия средней степени загрязнения. Олигосапробы и промежуточная группа — β -олиго- и олиго- β -мезосапробы составляют по 18% общего числа индикаторов. Роль ксеносапробов, показателей чистых вод (включая χ - α -, α - χ - и χ - β -мезосапробные организмы), достигает 8%. Количество обитателей зон высокого загрязнения — α -мезо- и α -мезо-полисапробов не превышает 7%. Наибольший процент ксеносапробы составляют в Уксуне, Тулеме: в основном это виды рода *Eunotia*, *Achnanthes linearis* (W. Sm.) Grun., *Cymbella gracilis* (Rabenh.) Cl., *Fragilaria virescens*, *Frustulia rhomboides* (Ehr.) D. T., *Hannea arcus* (Kütz.) Patrick, *Meridion circulare* и др. Количество α -сапробных видов наибольшее в Волхове и малых загрязняемых притоках Лаве, Мийноле, Назии, Морье (9–14% списка индикаторов). Среди них диатомовые: *Stephanodiscus hantzschii*, *Achnanthes lanceolata*, *Navicula cryptocephala*, *Nitzschia acicularis*, *N. palea*, эвгленовые *Euglena polymorpha* Dang., *Lepocinclis ovum* (Ehr.) Lemm., криптомонады *Cryptomonas erosa*, *C. ovata*, десмидиевые *Closterium acerosum*, *C. leibleinii*. Полисапробные виды встречены в Морье (*Euglena spathyrhyncha* Skuja) и Вуоксе (*E. caudata* Hubner).

Биомасса весеннего фитопланктона в мае в исследованных притоках изменяется от 0,3 до 14,5 мг/л (рис. 6.3.2 А). Наибольшие ее величины отмечены в крупных реках Волхове, Бурной, Вуоксе, Свири, Видлице и Неве, где полностью преобладают диатомовые водоросли (до 80% биомассы), а криптофитовые являются субдоминантами. Основные доминирующие виды: *Aulacosira islandica*, *A. subarctica*, *A. ambigua*, виды родов *Cyclotella* и *Stephanodiscus*, преимущественно мелкоклеточные. В Волхове отмечалось массовое развитие *Cyclostephanos dubius* и *Stephanodiscus binderanus* (Kütz.) Krieg., а в Сяси — *S. hantzschii*. Пеннаты диатомеи представлены главным образом *Asterionella formosa* и *Tabellaria fenestrata*.

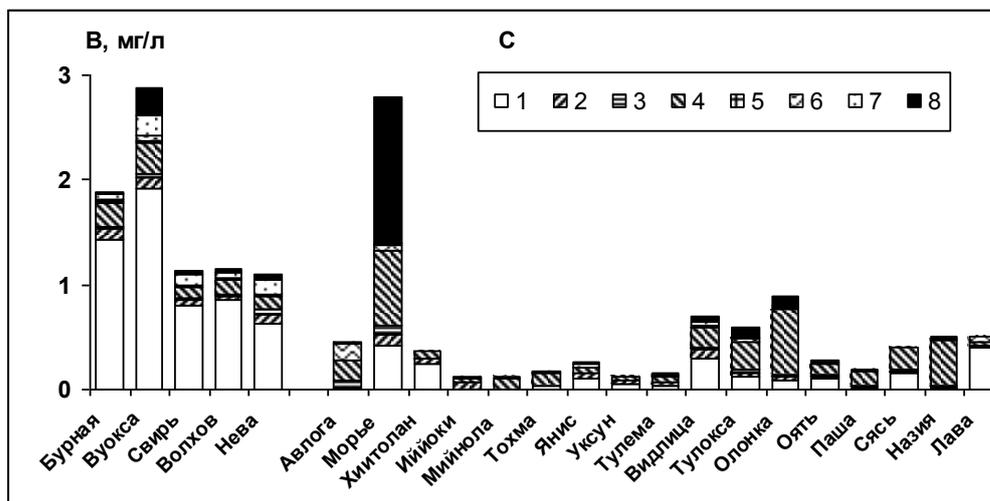
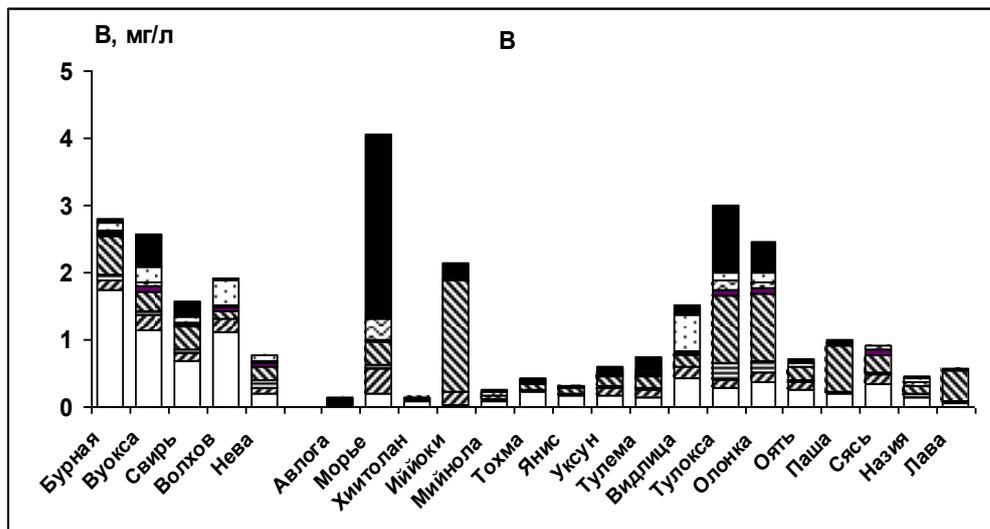
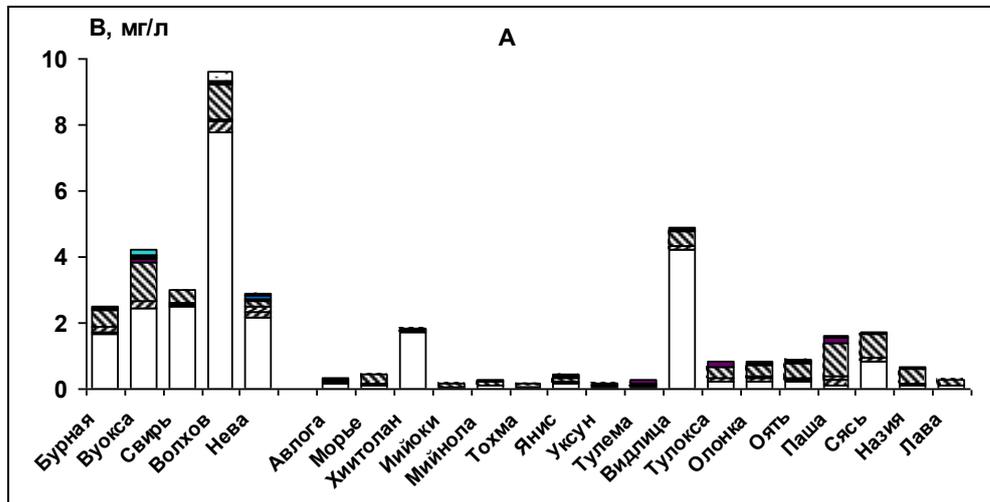


Рис. 6.3.2. Средняя за период наблюдений (2000–2005 гг.) биомасса фитопланктона исследованных рек. А — весна, В — лето, С — осень (обозначения те же, что на рис. 6.3.1).

Криптофитовые преобладают в Тулоксе, Паше, Олонке, Сяси и в большинстве малых рек (до 70% биомассы). Субдоминанты в этих реках диатомеи, зеленые водоросли, динофитовые и золотистые.

Биомасса летнего фитопланктона в июле – августе колеблется от 0,2 до 5,9 мг/л (рис. 6.3.2 В). Наибольшие величины отмечены в Морье, Бурной, Вуоксе, Олонке и Волхове. Структура летнего фитопланктона более разнообразна по сравнению с весенним. Центрические диатомеи составляют до 80% общей биомассы в крупных реках, а в остальных реках их доля не превышает 50% биомассы. Криптофитовые доминируют в Паше, Сяси, Уксуне, Янисе и Олонке, а в остальных реках являются субдоминантами.

Зеленые водоросли существенную роль играют в фитопланктоне Ояти, Сяси, Уксуна, Тулемы и Олонки. В большинстве рек биомассу зеленых создают мелкие хлорококковые водоросли из родов *Sphaerocystis*, *Monoraphidium*, *Scenedesmus* и *Pandorina* из вольвоксовых, и только в северных реках Янис и Мийнола — десмидиевые, прежде всего *Closterium acutum* и *C. moniliferum*. Синезеленые водоросли наиболее обильны в Волхове и Неве — до 20% биомассы фитопланктона. Золотистые играют существенную роль в планктоне Невы, Олонки, Видлицы и Тулемы, составляя от 10 до 30% биомассы в основном за счет развития видов рода *Dinobryon*. В малых загрязненных реках Хиитолан, Авлога, Лава, Назия и в Мийноле до 20% биомассы составляют эвгленовые. В реках восточного побережья Тулоксе, Тулеме, Уксуне, Видлице и Олонке большую роль (до 25% биомассы) играет крупная рафидофитовая водоросль *Gonyostomum semen*.

В сентябре – октябре биомасса осеннего фитопланктона изменяется от 0,2 до 9 мг/л. Выше всего она в Морье, Бурной и Волхове (рис. 6.3.2 С). По структуре осенний фитопланктон сходен с весенним. В крупных реках (Бурная, Свирь) по биомассе доминируют диатомовые, составляя до 80% общей биомассы, в остальных реках их роль значительно ниже. Криптофитовые лидируют в фитопланктоне Сяси, Паши, Олонки, Ояти и Тулоксы (до 85% биомассы) и заметную роль играют в Волхове, Свири, Видлице и Неве. Зеленые водоросли преобладают в северных реках (Мийнола, Тулема, Янис, Уксун), составляя до 60–80% биомассы, а в Тулоксе, Олонке, Видлице и Неве до 20–30%. В большинстве рек биомассу зеленых создают хлорококковые водоросли из родов *Sphaerocystis*, *Scenedesmus*, *Botryococcus* и вольвоксовые из родов *Chlamydomonas* и *Pandorina*. В Мийноле, Янисе и Тулеме, как и летом, преобладают десмидиевые, в основном виды рода *Closterium*. Существенное развитие синезеленых водорослей (до 20%) отмечено в планктоне Невы, Волхова, Свири, Яниса, Олонки и Тулоксы. Золотистые, преимущественно виды рода *Dinobryon*, наиболее обильны в Уксуне, Тулоксе, Олонке и Ояти. Рафидофитовая водоросль *Gonyostomum semen* наибольшую роль —

до 65% биомассы — играет в планктоне реки Морье. В Тулеме, Видлице, Тулоксе и Неве она составляет до 20 , а в Янисе, Олонке, Свири и Ояти — не более 10% биомассы.

Поздней осенью, в ноябре, уровень развития фитопланктона низкий — 0,01-2 мг/л. Только в Бурной, Волхове и Свири биомасса может быть выше 1 мг/л. В остальных реках она не превышает 0,2 мг/л. Доминируют диатомовые и криптофитовые водоросли.

Средняя за вегетационный сезон биомасса фитопланктона исследованных рек колеблется в пределах 0,2–5,2 мг/л. Наиболее продуктивен фитопланктон Волхова, Морье и Вуоксы, которые по уровню биомассы фитопланктона можно считать эвтрофными. Значительно ниже биомасса фитопланктона в других крупных реках — Неве, Свири, Сяси, Паше, а также в Олонке, Тулоксе, Видлице и Назии (1,2–2,3 мг/л). Здесь она соответствует мезотрофному типу вод. Наиболее низкие величины биомассы (0,2–0,6 мг/л) характерны для рек Уксун, Оять, Тулема, Мийнола и большинства малых рек, которые можно считать олиготрофными. Четкой зависимости между биомассой фитопланктона и содержанием биогенных элементов в реках нет, так как она перекрывается влиянием других факторов, прежде всего гидрологических. Тем не менее, максимальные величины биомассы водорослей планктона отмечаются в реках с высоким содержанием фосфора — Морье (до 9 мг/л), Тулоксе (до 6 мг/л), Волхове (до 16 мг/л).

Кластерный анализ исследованных рек по совокупности гидрохимических данных и данных по структуре и биомассе фитопланктона притоков Ладоги выявил наибольшее сходство между собой фитопланктона крупных рек Волхова, Свири и Бурной с фитопланктоном Невы (Трифорова и др., 2001 а; Trifonova et al., 2007). Именно эти реки оказывают наибольшее влияние на формирование фитопланктона Ладоги, а, следовательно, и всей системы Ладога — Нева — Невская губа, так как фитопланктон Невы полностью формируется за счет альгофлоры Ладожского озера и практически без изменения поступает в Невскую губу (Балахонцев, 1909; Петрова, 1968; Раскина, 1968).

Сравнение фитопланктона притоков Ладожского озера и реки Нева с другими европейскими реками показывает, что основным отличием северных рек, в том числе притоков Ладоги, можно считать большое разнообразие золотистых водорослей. В большинстве европейских рек по биомассе доминируют центрические диатомеи, причем их доля увеличивается по мере эвтрофирования рек, достигая 86–96% общей биомассы фитопланктона (Reynolds, Descy, 1996; Охупкин, 1997). В бассейне Ладоги центрические диатомовые доминируют по биомассе только в наиболее крупных реках, вытекающих из озер: Вуокса, Свирь, Волхов, Видлица. В большинстве средних и малых рек по биомассе в течение сезона преобладают криптомонады, массовое развитие которых наблюдается и во многих европейских

реках. Роль зеленых водорослей в биомассе фитопланктона притоков Ладожского озера значительно ниже, чем в реках более южных регионов.

6.3.2. Фитопланктон Ладожского озера

Изучение фитопланктона Ладожского озера впервые было проведено в начале XX в. Е.Н. Балахонцевым (1911) в связи с проблемой переноса водозаборной станции для питьевого водоснабжения Санкт-Петербурга из реки Невы в бухту Петрокрепость. Автор приводит список водорослей (208 таксонов рангом ниже рода), встреченных в фитопланктоне озера. Особый интерес до сих пор представляют его наблюдения за годовой динамикой фитопланктона бухты. Общий тип ее с одним четко выраженным весенним «пиком» диатомовых (*Aulacoseira islandica*) сохраняется до настоящего времени. Для основной акватории озера тип сезонной динамики фитопланктона изменился. Вместо летней депрессии в его развитии наблюдается годовой ее максимум (Летанская, 2002). Количественные показатели развития водорослей оценить невозможно из-за разницы использованных методик. На основе анализа состояния фитопланктона озера и других крупных водоемов Европы Е.Н. Балахонцев пришел к выводу, что Ладожское озеро являлось на тот момент наиболее чистым водоемом, а его вода удовлетворяла всем санитарным требованиям того времени. Эта ситуация сохранялась вплоть до 70-х гг. прошлого столетия. К этому времени резко возрастает антропогенная нагрузка на водоем и, соответственно, концентрации соединений фосфора в воде (Антропогенное эвтрофирование..., 1982; Современное состояние..., 1987; Ладожское озеро: критерии состояния..., 1992), что привело к изменениям в комплексе массовых видов (особенно летнего фитопланктона) и уровне его функциональных показателей. При этом количество обнаруженных видов водорослей (214 таксонов рангом ниже рода) практически не изменилось (Петрова, 1990), а главное соотношение количества видов в основных систематических отделах (*Chlorophyta*, *Bacillariophyta*, *Cyanophyta*) стабильно до настоящего времени (табл. 6.3.1).

Рост плотности популяций видов этих отделов водорослей (особенно синезеленых летом) и уровень первичной продукции (Петрова, 1987; Петрова и др., 1992) свидетельствуют о переходе ранее олиготрофного состояния экосистемы в мезотрофное. Последний этап исследований фитопланктона с 1992 по 2009 г. приходится на период снижения антропогенной нагрузки на водоем и, соответственно, уменьшения концентраций соединений фосфора в воде (Расплетина, Сусарева, 2002). За период с 1992 по 2009 г. в планктоне встречено 257 таксонов водорослей рангом ниже рода.

Таблица 6.3.1

Систематический состав фитопланктона озера на разных этапах его исследования

Отдел водорослей	Балахонцев, 1909	Петрова, 1990	Данные последних исследований
Cyanophyta	29	41	38
Cryptophyta	-	-	7
Dinophyta	13	9	9
Chrysophyta	19	7	23
Bacillariophyta	65	82	42
Xanthophyta	1	4	6
Raphidophyta	—	—	1
Euglenophyta	—	1	1
Chlorophyta	81	70	117
Количество видов	208	214	257

Как и прежде наиболее разнообразно представлены зеленые, диатомовые и синезеленые (табл. 6.3.1). Анализ списков водорослей, существующих в Ладожском озере, показал, что 90% всех видов относятся к редким и случайным. Присутствие или отсутствие их в тот или иной период исследований не является показателем изменения среды. Основное ядро фитопланктона, которое включает в себя около 50 видов, не претерпело изменений на протяжении всего периода изучения видового состава фитопланктона. Главный приоритет в меняющихся условиях среды водоема принадлежит массовым видам, которые являются доминантами (и составляют от 20 до 100% в общей биомассе) и субдоминантами (от 5 до 20% соответственно). По результатам мониторинга фитопланктона с 1992 по 2009 гг. кардинальные изменения произошли в сообществе летом. Помимо массового развития синезеленых, их содоминантами становятся криптофитовые, которые, по сути, являются одной из лидирующих групп в составе современного фитопланктона с середины июня до середины сентября. Обилие криптоноад резко возросло к середине 80-х гг. прошлого столетия (Ежегодник..., 1987; 1988). Присутствие представителей рода *Cryptomonas* в составе фитопланктона озера отмечалось еще

Е.Н. Балахонцевым (1909), однако увеличение роли этих водорослей в составе сообщества, вероятно, шло постепенно. Столь резкое увеличение популяции этих организмов в течение последних 20 лет является подтверждением изменившихся условий среды. В эти годы наблюдается, помимо снижения концентраций фосфора в воде, более глубокая трансформация растворенного органического вещества водного гуминового комплекса. Из его состава выделяются биогенные элементы и низкомолекулярные органические соединения (Коркишко и др., 2000) в форме, доступной для усвоения некоторыми водорослями, в частности, криптомонадами. По наблюдениям на озере Меларен (Willen, 1987), обилие криптомонад возрастает в процессе деэвтрофирования водоема. Процветанию этих организмов способствует нетребовательность их к минеральным формам биогенных элементов и способность получать вещества и энергию благодаря миксотрофному типу питания и подвижности (Klaveness, 1991).

Как отмечалось в предыдущих главах, основные природные факторы, которые сформировали экосистему Ладожского озера, можно разделить на две группы. Первая группа их весьма стабильна на всем протяжении исследований водоема. Это, прежде всего, высокое широтное положение водоема (отсюда достаточно суровый температурный режим), обширная площадь. Сложная морфометрия озерной котловины. Резкий градиент глубин между северной глубоководной и южной мелководной частями водоема и замедленный водообмен определяют особенности гидрофизического режима озера и характер пространственно-временного распределения фитопланктона. Вторая группа факторов носит нестабильный характер. Он связан с межгодовыми колебаниями климатических факторов, особенно с колебаниями величины стока с водосбора. Последнее обстоятельство весьма важно, поскольку от него зависит поступление питательных элементов в озеро и, соответственно, состояние всей его экосистемы. Концентрации химических ингредиентов и особенно фосфора в воде озера, менялись в течение мониторинговых наблюдений за состоянием его экосистемы. Вплоть до 2000 г. наблюдалось четкое снижение концентраций фосфора в воде озера, что было обусловлено сокращением антропогенной нагрузки на водоем (Lozovik, Raspletina, 1999) и началом маловодной фазы общей увлажненности территории (Doganovsky, 1997). В последнее десятилетие маловодной фазы, максимум которой пришелся на 2005–2006 гг., происходит дальнейшее снижение концентраций фосфора в воде озера. Однако адекватной реакции фитопланктона пока не наблюдается.

Анализ результатов проведенных в 2001–2009 гг. исследований фитопланктона в основные периоды вегетационного сезона (весна, лето, осень) позволяет оценить современное состояние этого сообщества.

Время наступления основных фаз вегетационного сезона по акватории озера неодинаково, так как связано с разной скоростью прогревания и охлаждения водных масс

мелководной южной и глубоководной центральной и северной частями озера. Для сравнения видовой структуры биомассы фитопланктона в основные периоды вегетационного сезона проанализированы результаты по станциям продольного разреза водоема, которые достаточно адекватно отражают состояние фитопланктона в основных районах озера

Весна. Пространственная неоднородность распределения водорослей Ладожского озера особенно резко проявляется весной, когда озеро разделено термобаром на область за его границей (с более высокими температурами воды) и перед ним (с более низкими температурами воды). Существование термобара длится с мая до середины июля с небольшими сдвигами в ту или иную сторону в зависимости от климатических условий года, и он является важнейшим экологическим фактором для всей биоты озера. Положение его границы тесно связано со скоростью нагревания водных масс озера в каждый конкретный срок.

На рис. 6.3.3 представлены результаты наблюдений за фитопланктоном в начале и в конце мая. В начале месяца активная вегетация водорослей отмечается лишь в мелководной области, где температура воды колебалась от 5 до 8 °С. В диапазоне этих температур и активной турбулентности воды в сообществе абсолютными доминантами являются диатомовые водоросли с основным видом *Aulacoseira islandica* (O. Mull.) Sim. По мере дальнейшего прогревания водных масс озера, граница термобара смещается к области больших глубин и в сообществе, наряду с диатомеями, растет вклад в биомассу криптофитовых водорослей (*Cryptomonas erosa* Ehr., *Cr. sp.*; *Rhodomonas lacustris* Pasch. et Ruttn.). В течение мая в глубоководной части озера фитопланктон чрезвычайно беден и представлен отдельными клетками диатомей (*Aulacoseira islandica*, *A. distans* (Ehr.) Sim., *A. italica* (Ehr.) Sim., *A. subarctica* (O. Mull.) Haworth). Значения биомассы и концентрации хлорофилла между районами, разделенными термобаром, различаются на порядок. Максимальные значения биомассы достигают 2,4–4,8 г м⁻³ и 7,6–18,6 мг м⁻³ для хлорофилла в мелководной зоне и соответствуют слабоэвтрофным условиям. В районах средних и больших глубин, перед термобаром, количественные показатели фитопланктона не превышают 0,2 г м⁻³ для биомассы и 1,5 мг м⁻³ для хлорофилла, что характеризует воды этой зоны как олиготрофные.

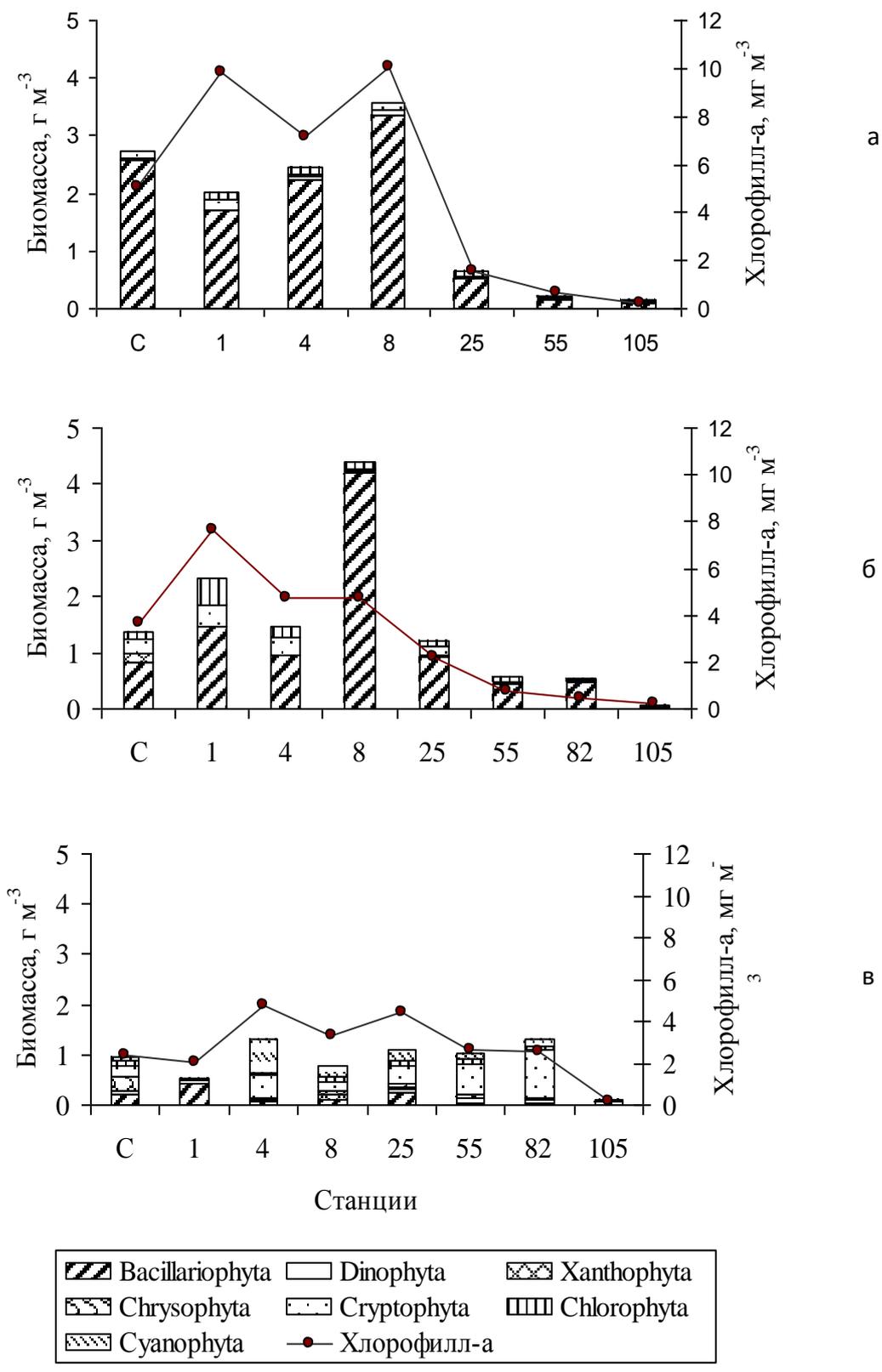


Рис. 6.3.3. Биомасса фитопланктона, концентрация хлорофилла в разные фазы весеннего периода. а — 3–6 мая 2007 г., б — 28–31 мая 2008 г., в — 25–9 июня 2009 г.

На рис. 6.3.4 (а, б) представлено вертикальное распределение фитопланктона в мелководной и глубоководной областях озера. В обоих случаях распределение водорослей достаточно равномерное. В первой зоне оно обусловлено активным конвективным перемешиванием воды, а во второй перемешивание весьма медленное и еще носит зимний характер.

Обычно к концу июня теплоактивная область уже занимает практически всю акваторию озера, за исключением ядра холодной воды в районе максимальных глубин. В прогретой центральной части озера доминирование в сообществе переходит от диатомовых к криптофитовым водорослям, а на мелководьях – к синезеленым. Количественные показатели водорослей в этой зоне становятся значительно ниже по сравнению с майскими величинами.

Лето. После исчезновения термобара, что обычно происходит к середине июля с некоторыми сдвигами в зависимости от климатических условий года, выравнивания поверхностных температур воды по акватории озера и формирования температурной стратификации водных масс, наступает летний сезон. В течение июля – августа разница между количественными показателями фитопланктона по акватории водоема сохраняется. Минимальная биомасса по годам изменяется от 0,5 до 1,0 г м⁻³, концентрация хлорофилла от 2,0 до 4,0 мг м⁻³, максимальные величины находятся в пределах от 2,0 до 13,0 г м⁻³ и от 6,0 до 23,0 мг м⁻³ соответственно. Строгой приуроченности этих величин к какому либо району в каждый конкретный год не наблюдается. Ведущим фактором в поверхностном распределении водорослей летом является уже не температура воды, как весной, а система постоянных, стоковых и ветровых течений, а также апвеллингов. Состав доминирующего комплекса водорослей по сравнению с весной меняется. В сообществе преобладают синезеленые, криптофитовые и диатомовые. Однако вклад этих отделов в структуру общей биомассы в течение лета непостоянен и зависит от срока и места наблюдений. Массовые виды сообщества также различны. На рис. 6.3.5 представлены результаты состояния фитопланктона в раннелетнюю, летнюю и позднелетнюю фазы этого периода. В конце июля – первую половину августа абсолютными доминантами выступают синезеленые водоросли. Их вклад в общую биомассу составляет от 35% на севере и до 84% на юге. На основной акватории обычно доминируют *Anabaena spiroides* Kleb., *A. flos-aquae* (Lyngb.) Breb., *A. circinalis* (Kütz.) Hansg., *Aphanizomenon flos-aquae* (L) Ralfs, *Gomphosphaeria naegeliana* (Unger) Lemm. Содоминантами синезеленых являются криптофитовые водоросли. Их вклад в биомассу в районе средних и больших глубин колеблется от 20 до 30%, а на южных мелководьях меньше. Преобладают *Cryptomonas erosa*, *C. sp.*, *Rhodomonas lacustris*.

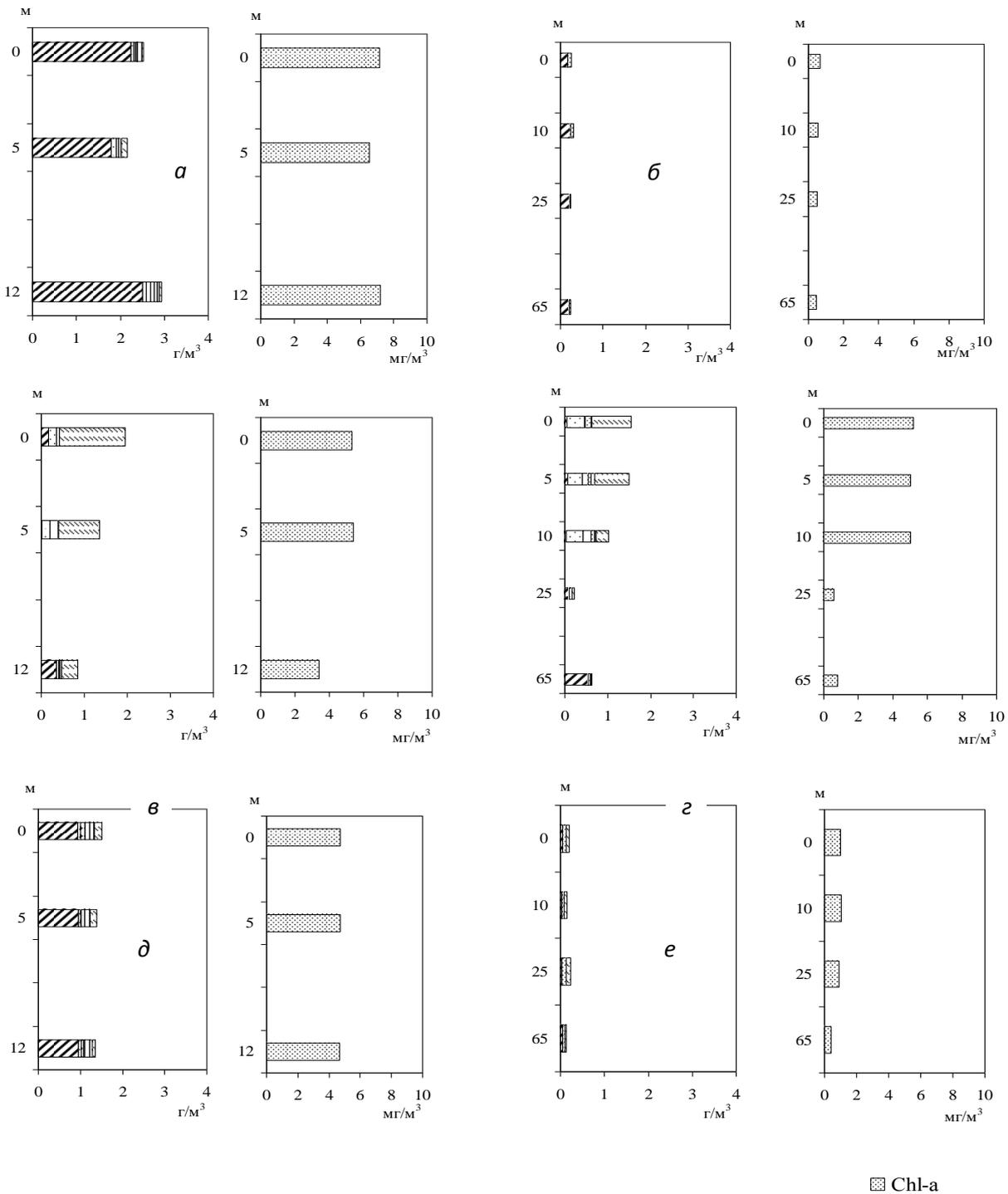


Рис. 6.3.4. Вертикальное распределение биомассы фитопланктона и концентрации хлорофилла-а весной в прибрежье — а (ст. 4, 4 мая 2007 г) и в центре озера — б (ст. 55, 5 мая 2007 г); летом

в прибрежье — в (ст. 4, 3 августа 2006 г) и в центре озера — г (ст. 55, 29 июля 2006 г); осенью в прибрежье — д (ст. 4, 12 октября 2008 г) и в центре озера — е (ст. 55, 14 октября 2008 г). Обозначения отделов водорослей — как на рисунке 6.3.3, по оси ординат — глубина станций.

Видовой состав криптононад в течение вегетационного сезона не меняется. На южных мелководьях значительный вклад в биомассу синезеленых вносят виды из рода *Microcystis*: *M. aeruginosa* Kütz., *M. viridis* (A. Braun) Lemm., *M. wezenbergii* (Kom.) Starmach, *M. reinboldii* (Richter) Forti.

Далее по значимости в биомассе, следуют представители рода *Anabaena* с теми же видами, что и в центре озера. Криптофитовые, диатомовые и зеленые являются субдоминантами. Среди диатомовых в Волховской губе преобладают *Fragilaria crotonensis* Kitt., *Melosira varians* Ag., *Stephanodiscus binderanus* (Kütz.) Krieg., *St. hantzschii* Grun., *Cyclotella meneghiniana* Kütz., большая часть которых более требовательна к обеспеченности питательными элементами. На основной акватории чаще встречаются *Stephanodiscus rotula* (Kütz.) Hendeby, *St. minutulus* (Kütz.) Cl. et Moll., *Cyclotella kuetzingiana* Thw., *C. comta* (Ehr.) Kütz., *C. sp.*.

На мелководьях из зеленых водорослей типичными представителями являются виды из родов *Coelastrum*, *Dictyosphaerium*, *Pediastrum*, *Scenedesmus*, а в остальных районах *Monoraphidium contortum* (Thur.) Kom.-Legn., *Pseudosphaerocystis lacustris* (Lemm.) Nov., *Botryococcus braunii* Kütz. Распределение основных комплексов фитопланктона меняется к концу августа, особенно в Волховской губе. Массовая вегетация летних видов диатомовых и особенно *Stephanodiscus hantzschii*, *St. binderanus*, *Cyclotella meneghiniana* Kütz. совпала с максимальными концентрациями соединений фосфора в этом районе в 2005 г. В центре и на северных станциях по-прежнему доминируют синезеленые и криптофитовые. Из синезеленых лидирующую роль приобретает *Aphanizomenon flos-aquae*. Вклад диатомовых водорослей в общую биомассу в поверхностном слое воды летом на основной акватории озера постоянно не превышает 2–8%.

Вертикальное распределение водорослей в период летней стратификации водоема связано с освещенностью и положением слоя температурного скачка. Величина эвфотного слоя в летний период достигает 4–6 м и совпадает с двойной прозрачностью по диску Секки соответствующих районов озера (Villjanen et al., 1999). На рис. 6.3.4 (в, г) представлены вертикальная структура сообщества, биомасса и концентрация хлорофилла-а на мелководье и в центре озера. На мелководных станциях четкая закономерность в распределении водорослей наблюдается редко, так как часто нарушается ветровым перемешиванием.

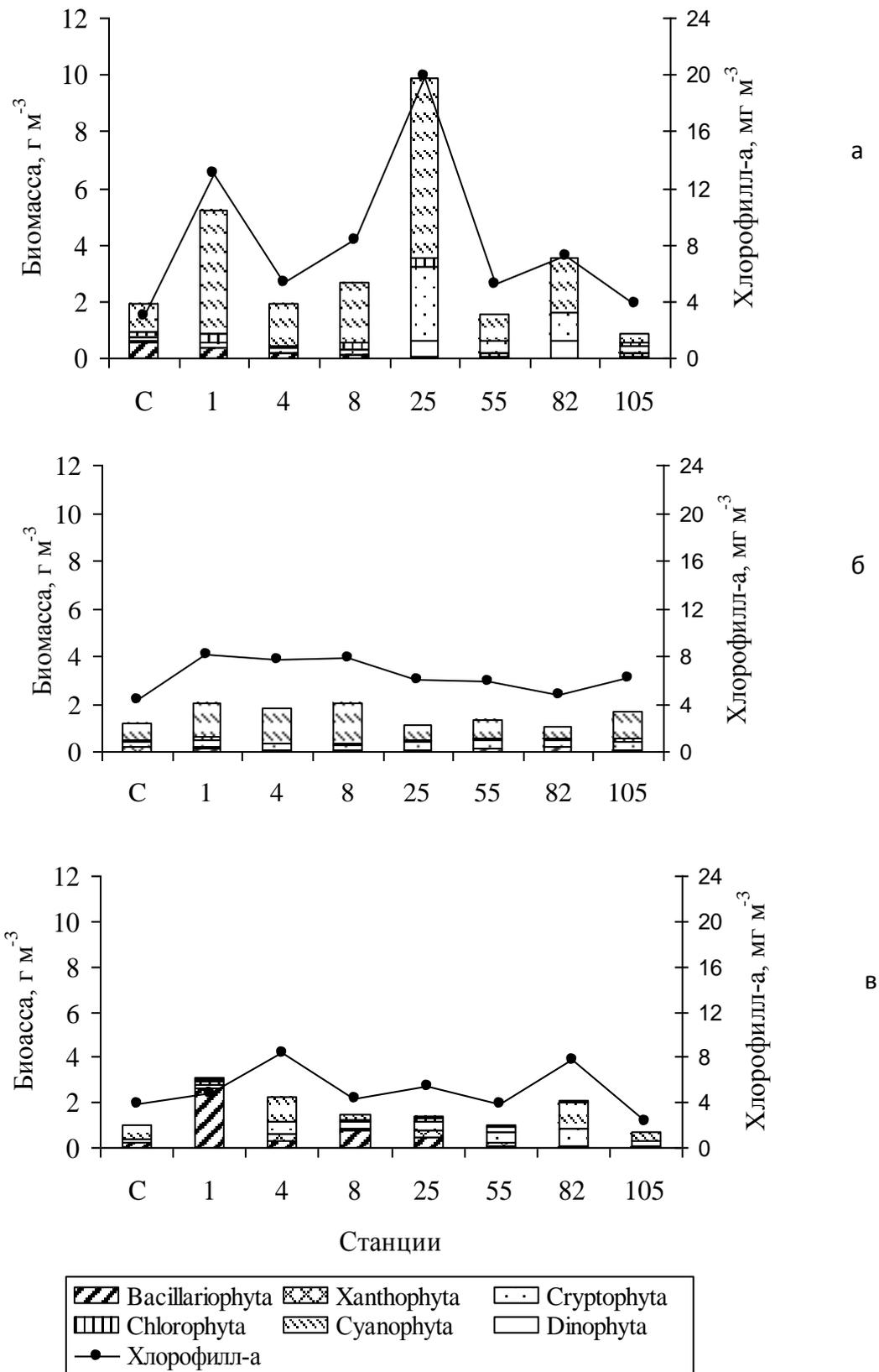


Рис. 6.3.5. Биомасса фитопланктона, концентрация хлорофилла-а в разные фазы летнего периода. а — 31 июля – 3 августа 2006 г., б — 11–20 августа 2008 г., в — 27августа – 3 сентября 2005 г.

В районах средних и больших глубин основная масса водорослей сосредоточена в эвфотной зоне, где структура сообщества практически не отличается от поверхностного слоя воды. Далее в гомотермном эпилимнионе, который в летний период составляет около 10 м, идет постепенное снижение количественных показателей фитопланктона, а ниже слоя температурного скачка они уменьшаются на порядок.

В гиполимнионе (глубже 25 м) среди водорослей преобладают раннелетние и поздневесенние диатомовые (*Fragilaria crotonensis*, *Tabellaria fenestrata* (Lyngb.) Kütz. var. *fenestrata*, *Asterionella formosa* Hass.).

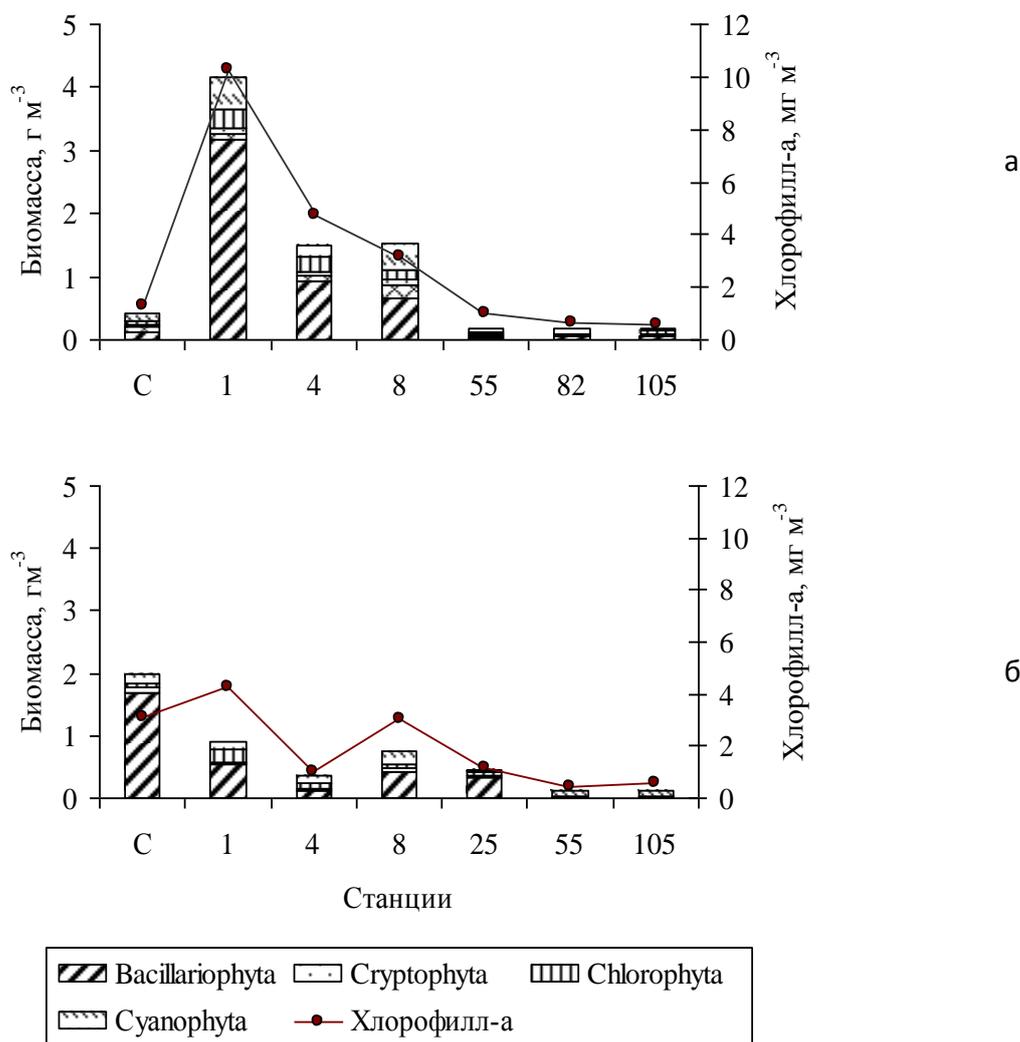


Рис. 6.3.6. Биомасса фитопланктона, концентрация хлорофилла-а в разные фазы осеннего периода. а — 10–16 сентября 2008 г., б — 28 октября – 4 ноября 2009 г.

Осень. В сентябре происходит постепенное охлаждение воды, усиление ветровой активности, заглубление слоя эпилимниона и уменьшение солнечной инсоляции. Наблюдается

снижение общей продуктивности фитопланктона. Видовой состав сообщества носит позднелетний характер. Эта ситуация продолжается до полутора месяцев, пока поверхностные температуры воды не опустятся ниже 10 °С, и не наступит осенний сезон (Летанская, Протопопова, 2003).

На рис. 6.3.6 показана ситуация состояния фитопланктона в осенний период. Температуры поверхностных вод в октябре по акватории водоема находится в пределах 8–9 °С. Биомасса водорослей колеблется от 0,2 до 4,2 г м⁻³, а концентрация хлорофилла-а — от 0,6 до 10,3 мг м⁻³ соответственно.

Максимальные значения наблюдаются в Волховской губе, а на основной акватории озера — минимальные. По всему озеру в структуре сообщества преобладают диатомовые водоросли, а на мелководных участках они выступают абсолютными доминантами. В Волховской губе и бухте Петрокрепость основным видом, как и весной, является *Aulacoseira islandica*. Кроме нее следует отметить *Aulacoseira italica*, *A. distans*, *A. subarctica*. Из синезеленых преобладает *Aphanizomenon flos-aquae*. Величины биомассы криптофитовых водорослей в этом районе минимальны по сравнению с весенне-летним периодом. В центральном и северном районах преобладают синезеленые и диатомовые, среди последних *Tabellaria fenestrata*. К концу октября – началу ноября при дальнейшем понижении температуры воды и формировании осеннего термобара, вегетация водорослей на основной акватории практически затухает, за исключением южных мелководий. Вертикальная структура сообщества и ее количественные показатели представлены на рис. 6.3.4 (д, е).

Таким образом, тип структурно-функциональной организации фитопланктона в основные фазы вегетационного сезона как в последние годы, так и в течение всего периода исследований озера (Летанская, 2002) носит стабильный характер. Активная вегетация водорослей начинается с диатомовых (май) в прибрежье, в июле – августе преимущественное развитие получают синезеленые и криптофитовые по всей акватории озера, а в октябре – ноябре снова наблюдается вегетация весенних диатомовых на мелководье. На основной акватории озера происходит постепенное затухание вегетации позднелетнего комплекса водорослей.

Отмечен весенний «пик» развития диатомовых, вклад которых в общую биомассу достигает 70–90 % от ее величины только на южных мелководьях, а в центральном и северном районах наблюдается лишь летний «пик», который связан с массовым развитием синезеленых и криптофитовых, общий вклад которых в биомассу, особенно в первую половину июля, достигает 90%. Осенью значения параметров минимальны (рис. 6.3.7).

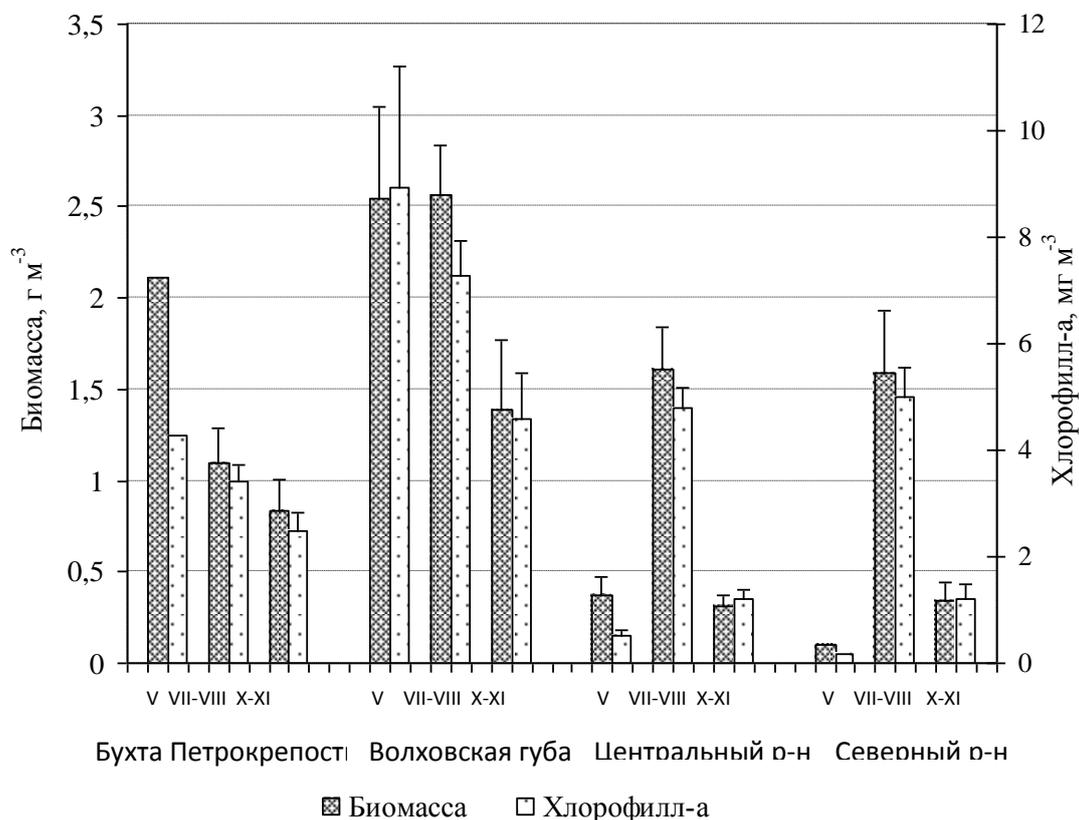


Рис. 6.3.7. Биомасса фитопланктона и концентрация хлорофилла-а в основных районах Ладожского озера ($X \pm SE$, 2001–2009 гг., поверхность).

Весной для всех исследованных станций средние значения биомассы и хлорофилла-а в поверхностном слое составляют $2,30 \pm 0,24 \text{ г м}^{-3}$ и $5,62 \pm 0,65 \text{ мг м}^{-3}$ (теплоактивная область), а в теплоинертной — $0,50 \pm 0,15$ и $0,78 \pm 0,16$ соответственно. Осенью в прибрежном районе средняя биомасса достигает $0,81 \pm 0,13 \text{ г м}^{-3}$, концентрация хлорофилла-а — $2,38 \pm 0,31 \text{ мг м}^{-3}$, а на основной акватории эти значения составляют $0,21 \pm 0,02$ и $0,77 \pm 0,05$ соответственно. В июле – августе, поскольку четкие и постоянные различия в горизонтальном распределении водорослей отсутствуют, можно использовать средние значения для всей акватории озера. Средняя биомасса составляет $1,73 \pm 0,12 \text{ г м}^{-3}$, концентрация хлорофилла-а — $5,17 \pm 0,25 \text{ мг м}^{-3}$. Обилие фитопланктона в водной толще ограничено границей гомотермного эпилимниона, а основная масса водорослей сосредоточена в эвфотном слое, объем которого составляет примерно 10% всей водной массы озера.

Таким образом, значения количественных параметров фитопланктона позволяют отнести поверхностные воды Ладожского озера к мезотрофному типу вод лишь летом, а прибрежные районы весной и осенью. Остальные районы (весной и осенью) и основная водная масса озера глубже 25 м в течение всего вегетационного сезона характеризуется чрезвычайно

низкими показателями развития фитопланктона, что позволяет отнести их воды к олиготрофному типу (OECD, 1982).

Основной массив данных наблюдений за фитопланктоном (1991–2009 гг.) имеется для периода летней стратификации водоема. Измерения проводились в годы с разными климатическими условиями. Начало исследований приходилось на пик многоводной фазы общей увлажненности территории, а продолжение — на начало маловодной фазы, пик которого отмечен в 2005–2006 гг. На рис. 6.3.8. представлены средние значения биомассы и концентрации хлорофилла-а за этот период.

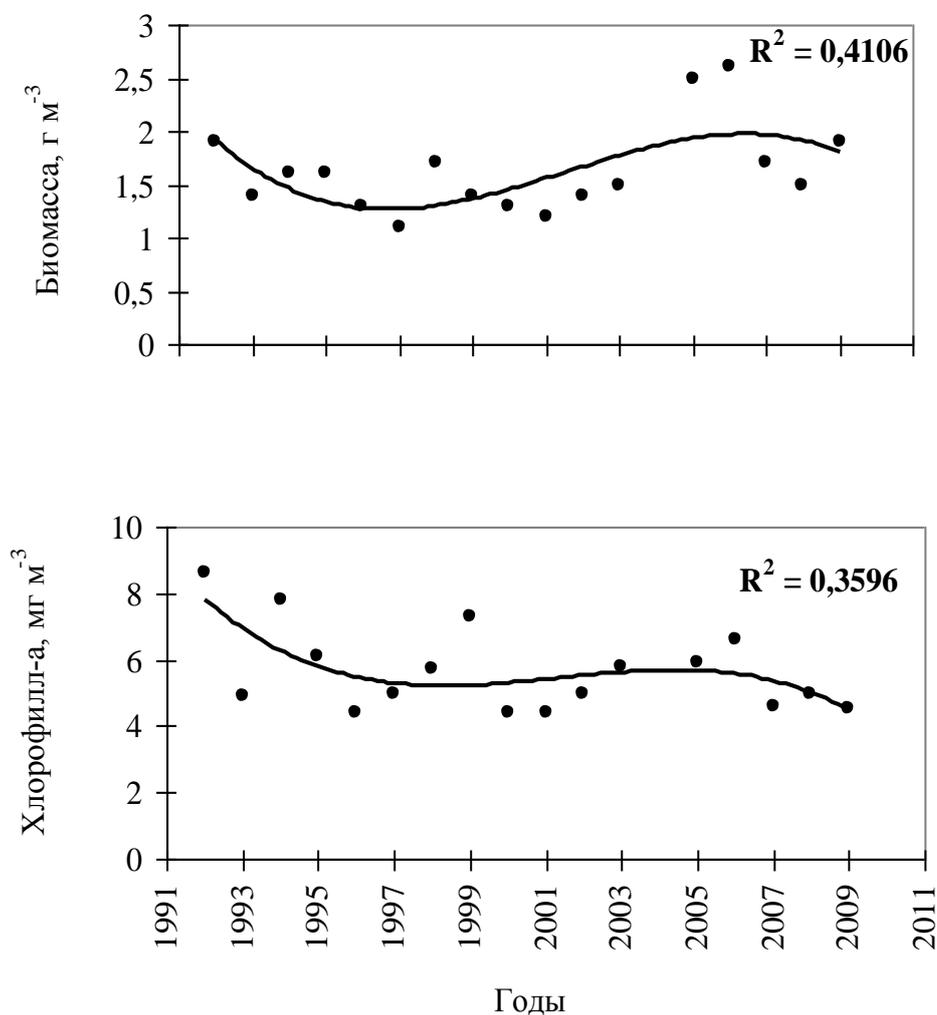


Рис. 6.3.8. Межгодовые колебания средних значений биомассы фитопланктона и концентрации хлорофилла-а в поверхностном слое воды (0–1 м) для всей акватории Ладожского озера (VII–VIII, 1992–2009 гг.)

Четкого тренда в изменении приведенных параметров не обнаружено. Однако некоторая тенденция к увеличению общей биомассы отмечена на пике маловодной фазы, что связано с ростом вклада синезеленых водорослей в общую величину биомассы. В 2005–2006 гг. в пятнах «цветения» синезелеными их собственная биомасса достигала 4–6 г м⁻³. Подобные значения ранее не наблюдались за весь период исследований озера. Напротив, максимальные значения хлорофилла-а характерны для пика многоводной фазы при абсолютном господстве криптофитовых водорослей, что связано с большим процентным содержанием хлорофилла-а в этих организмах. В целом изменения количественных параметров летом связаны с внутрисезонной сукцессией видов в фитопланктоне и климатическими условиями соответствующих лет наблюдений (Летанская, 2003).

Анализ данных по состоянию летнего фитопланктона с соответствующими результатами по литературным источникам (табл. 6.3.2) показывает, что, несмотря на меняющиеся условия среды в водоеме, продуктивность фитопланктона достаточно стабильна.

Таблица 6.3.2

Средние и максимальные значения биомассы (В), содержания хлорофилла-а (Chl-a) в поверхностном слое и эпилимнионе Ладожского озера (июль – август 1973–2009 гг.)

Год	Поверхность						0–10 м			Источн ик
	В, г м ⁻³		Chl-a, мг м ⁻³		В	Chl-a	В, г м ⁻³	Chl-a, мг м ⁻³	к-во измер.	
	средн	макс.	средн.	макс.	к-во измер.	средневзвеш.				
1973	2,1	8,2	4,6	10,0	10	10	—	—	—	1
1976–79	—	—	2,8	38,9	—	—	0,6	2,6	—	2
1987	1,1	3,1	5,5	39,5	14	38	0,8	4,5	13; 37	3
1990	1,7	2,9	5,6	10,2	6	98	—	—	—	4
1992–95	1,6	6,6	6,8	18,6	79	79	0,9	5,3	63	5
1996–97	1,1	3,0	5,0	10,3	23	23	0,8	4,5	39	6
1998–99	1,6	5,1	6,0	11,8	24	24	1,0	4,7	39	7

2000–09	1,8	12,6	5,1	22,6	151	151	1,2	4,2	72; 87	8
---------	-----	------	-----	------	-----	-----	-----	-----	--------	---

Примечание: 1 — Пырина, Трифонова, 1979; 2 — Petrova, 1987; 3 — Ежегодник..., 1988; 4 — Lepisto, 1997; Kovalenko, 1997; 5 — Holopainen & Letanskaya, 1999; 6, 7 — Летанская, 2000; 8 — наши данные.

Являясь крупным глубоководным водоемом с замедленным водообменом, озеро изначально обладает высокой устойчивостью к внешним воздействиям, а внутриводоемные процессы играют доминирующую роль в функционировании экосистемы. Структурные перестройки, которые произошли в сообществе лидирующих видов водорослей, а именно массовое развитие криптоноад, также способствуют поддержанию гомеостаза системы (Stewart, Wetzel, 1986).

6.4. Бактериопланктон

6.4.1. Бактериопланктон притоков Ладожского озера

Структура и функциональная активность микробного сообщества Ладожского озера изучаются уже более 40 лет. Результаты исследований обобщены во многих публикациях (Капустина, Каурова, 2002, Драбкова и др., 2005, Kapustina, 1999, 2003). Однако до сих пор имеется мало данных по микробиологической характеристике притоков этого крупнейшего водоема северо-запада России, которые являются индикаторами изменений, происходящих на водосборе, а их биоценоз участвует в формировании экосистемы озера. Некоторые данные по общей численности бактерий ряда крупных притоков Ладожского озера получены при экспедиционных работах Ладожской экспедиции Института озероведения в 1986–1987 гг. (Капустина, 1992). Более подробно изучалось бактериальное сообщество сложной озерно-речной системы Вуокса, являющейся второй по многоводности рекой бассейна Ладожского озера (Фурсенко, 1976; Капустина и др., 1994; Чеботарев, 2004, 2006). Полученные в этих исследованиях данные характеризуют структуру и функциональную активность микроорганизмов реки Вуокса на всем ее протяжении от границы России и Финляндии до впадения в Ладожское озеро основного русла Вуоксы, называемого в устьевой части рекой Бурной. Согласно полученным характеристикам на основе бактериологических показателей классов вод (Драчев, 1964) воды Вуоксы в ее среднем и нижнем течении оценены как чистые (Чеботарев, 2004).

В связи с тем, что бактерии играют важную роль в круговороте вещества и энергии в водных экосистемах, в том числе и в водотоках, при проведении регулярных гидробиологических работ на притоках Ладожского озера обычно ставится задача оценить состояние бактериопланктона в главных притоках озера — реках Свирь, Вуокса и Волхов, крупных притоках — реках Паша, Оять, Сясь, Олонка и Янисйоки и малых притоках с небольшим водосбором (менее 2 тыс. км²) — речках Мийнола, Уксунйоки, Тулема, Видлица, Тулокса, Морье и Авлога. Все эти реки, за исключением рек Паша и Оять, впадающих в реку Свирь в ее нижнем течении, являются притоками 1-ого порядка. Кроме того, анализируется бактериопланктон Невы в районе ее истока из Ладожского озера (у г. Петрокрепости).

Полученные значения общей численности бактерий в воде притоков Ладожского озера в разные годы представлены в табл. 6.4.1. Притоки значительно различаются между собой по содержанию бактериального компонента в планктонном сообществе. Концентрация клеток бактерий в воде разных притоков изменяются от очень небольших величин — 0,48 млн клеток (река Свирь в сентябре 1997 г.) до 3,26 млн клеток (устье северного рукава Вуоксы в июле 2005 г.) в 1 мл воды. Наиболее высокие значения общей численности бактерий (2,4–3,3 млн клеток/мл) характерны для вод озерно-речной системы Вуокса: в среднем течении реки Бурная, через которую происходит основной сброс воды из Вуоксы в Ладожское озеро, и в устье ее северного рукава, впадающего в Ладогу у г. Приозерск. Еще более высокие величины численности бактериопланктона в Бурной наблюдались ранее (Чеботарев, 2004), когда концентрация микроорганизмов в толще воды после затяжных дождей осенью 1994 г. составляла 8–12 млн клеток/мл. Высокие значения общей численности бактерий отмечаются и в водах реки Волхов в летнее время — 1,90–2,04 млн клеток/мл. Однако осенью численность бактерий в Волхове значительно уменьшается и составляет всего 0,65 млн клеток/мл.

Таблица 6.4.1

Общая численность (N, млн клеток/мл) и биомасса (B, мг С/л) бактериопланктона в притоках Ладожского озера и в истоке реки Нева

Приток	N			B		
	1997	1998	2005	1997	1998	2005
Вуокса (р. Бурная)	2,80	1,51	2,44	112	53	104
Вуокса (сев. рукав)	—	—	3,26	—	—	145
Волхов	0,65	2,04	1,90	26	72	95
Свирь	0,48	1,22	1,48	17	46	60
Паша	0,68	1,15	1,45	27	35	63
Оять	0,75	0,95	1,34	30	44	48

Сясь	1,28	1,21	1,56	64	42	67
Олонка	1,15	1,76	1,55	58	62	65
Янис	1,30	1,13	1,35	47	34	46
Мийнола	1,55	1,88	1,62	47	57	62
Тулема	0,81	1,42	1,26	24	42	38
Видлица	1,01	1,19	1,30	35	34	43
Тулокса	0,35	1,14	1,10	10	41	32
Уксун	1,09	1,08	1,28	33	32	40
Авлога	—	—	1,10	—	—	31
Морья	—	—	1,24	—	—	30
Нева	0,97	1,68	2,15	49	75	82

Наиболее низкие значения общей численности бактериопланктона наблюдаются в малых притоках — Авлоге, Уксунйоки, Тулоксе и Янисйоки (1,08–1,14 млн клеток/мл) и притоках Свири реках Паша и Оять (0,95–1,45 млн клеток/мл). Осенью количество клеток бактериопланктона в этих же притоках еще меньше (на 40–50%). Численность бактерий в планктоне других рек выражалась значениями, находившимися в пределах 1,3–1,7 млн клеток/мл. Во многих притоках общая численность бактерий в воде летом 2005 г. была выше, чем в 1997–1998 гг. (табл. 6.4.1). Близкие значения общей численности бактерий в реках Волхов, Свирь, Бурная, Сясь, Паша, Оять, Олонка и Янисйоки: 1,0–2,0 млн клеток/мл в летнее время и 0,4–0,8 млн клеток/мл весной (апрель – май) получила Капустина (1987) при проведении аналогичных исследований в 1986–1987 гг. Сделан вывод, что воды реки Волхов не оказывают значительного влияния на формирование бактериопланктона южной части Ладожского озера в связи с разбавлением речных вод в Волховской губе и отмиранием привнесенной в озеро аллохтонной микрофлоры.

В пробах воды, отобранных в реке Неве в месте ее истока из Ладожского озера в районе г. Петрокрепость содержание бактерий в планктоне составляет 1,7–2,2 млн клеток/мл в летнее время и около 1,0 млн клеток/мл осенью. Эти значения фактически характеризуют концентрацию клеток бактериопланктона в поверхностных водах юго-западной части Ладожского озера. В большинстве притоков численность клеток бактериопланктона ниже или того же порядка.

Одновременно с подсчетом общей численности бактерий определяется морфологическая структура бактериопланктона. В составе всех микробных сообществ притоков доминируют

палочковидные микроорганизмы, как правило, небольшого размера. Длина палочковидных клеток варьирует в пределах 0,4–2,5 мкм, а ширина — 0,2–0,4 мкм. Расчеты показывают, что в большинстве притоков средний объем клеток планктонных бактерий составляет 0,32–0,35 мкм³. Более крупный бактериопланктон характерен только для реки Вуокса (0,45 мкм³), Волхов (0,50 мкм³) и Олонка (0,46 мкм³). Микробные клетки другой формы, в том числе кокки, вибрионы, нити и другие морфотипы, составляющие менее 20% клеток бактериопланктона, также имеют небольшие размеры и, таким образом, не играют существенной роли в формировании биомассы микробного сообщества планктона.

Биомасса бактериопланктона в притоках Ладожского озера, рассчитанная на основе средних размеров клеток планктонных бактерий, составляет 30–145 мг С/л, но с преобладающими значениями биомассы 40–60 мг С/л (табл. 6.4.1). Наиболее высокая биомасса бактериопланктона характерна для реки Волхов и в южном рукаве (река Бурная) озерно-речной системы Вуокса (более 100 мг С/л). Самые низкие значения биомассы бактерий — порядка 30 мг С/л — фиксируются в воде рек Авлога, Морье и Тулокса.

На основании полученных характеристик бактериопланктона за разные годы можно сделать вывод, что большинство притоков Ладожского озера являются продукционно бедными. По общей численности и биомассе бактериопланктона их воды сопоставимы с водами олиготрофных озер Карельского перешейка в период активного роста бактерий в летние месяцы (Чеботарев, 1984). Бактериальное сообщество в реке Волхов и озерно-речной системе Вуокса, а также в истоке Невы в районе Петрокрепости по своим характеристикам можно отнести к мезотрофным водоемам.

6.4.2. Бактериопланктон Ладожского озера

Систематическое изучение бактериопланктона Ладожского озера проводится с 1977 г. Исследования выполняются с использованием общепринятых в водной микробиологии методов (Романенко, Кузнецов, 1974; Overbeck, 1972; Sorokin, Kadota, 1972; Hobbie et al., 1977), что повышает надежность полученных результатов. До 1977 г. сведения о бактериопланктоне огромного водоема практически отсутствовали, за исключением эпизодических исследований в 60-х гг. прошлого столетия (Родина. Кузьмицкая. 1963; 1968; Драбкова, 1967).

В крупных глубоких водоемах с резким перепадом глубин, как правило, создаются предпосылки для проявления неоднородности гидрофизических, гидрохимических и, соответственно, гидробиологических характеристик. Анализ характеристик бактериопланктона в Ладожском озере проводился для следующих зон: прибрежной (гл. до 15 м), деklinальной (гл. 15–52 м), профундальной (гл. 52–89 м) и ультрапрофундальной (гл. > 89 м) (Тержевик и др., 1987). Лимнологическая специфичность отдельных районов во многом обуславливает

особенности распределения бактериопланктона по акватории озера, а также особенности сезонной динамики численности микроорганизмов. Анализ материалов по общей численности бактериопланктона за весь период исследований позволяет говорить о различных схемах пространственно-временного распределения бактерий в отдельных зонах Ладожского озера. В прибрежной зоне обычно наблюдается следующая стадийность: весенний (паводковый) пик – поздневесенняя депрессия – летний пик (июль, август) – осенняя депрессия (конец сентября – ноябрь). В глубоководных районах, как правило, идет медленное повышение количества бактерий от зимы к лету – летний пик (конец июля – начало августа) – слабая осенняя депрессия, а иногда осенний пик (сентябрь, октябрь), затем постепенное снижение численности. В деklinальной зоне в зависимости от гидрофизической ситуации могут наблюдаться оба сценария. В разные годы абсолютные величины общей численности бактериопланктона, конечно, неодинаковы, но закономерности его пространственно-временного распределения сохраняются.

В весенний период чрезвычайно важную роль в распределении бактериопланктона по акватории играет явление термического бара, свойственное всем большим озерам умеренной зоны (Тихомиров, 1968; Rodgers, 1965). В это время акватория озера делится на теплоактивную (прибрежье) и теплоинертную (пелагическая часть) зоны. Максимальная численность бактерий в этот период отмечается в теплоактивной зоне, особенно в зонах влияния крупных притоков (Волхов, Свирь и Вуокса), минимальная — в теплоинертной зоне в глубоководной части Ладоги, что совпадает с распределением фитопланктона (Петрова, 1982). Такой тип распределения микроорганизмов объясняется повышенной концентрацией биогенных элементов и более высокими температурами воды в прибрежье по сравнению с пелагической частью озера. В разные годы общая численность микроорганизмов в теплоактивной зоне ($0,6\text{--}5,2 \times 10^6$ кл. мл⁻¹) превышает таковую в теплоинертной зоне ($0,22\text{--}1,1 \times 10^6$ кл. мл⁻¹) в 3–6 раз в зависимости от срока отбора проб и климатических особенностей отдельных лет. Показано, что основными факторами, детерминирующими численность микроорганизмов в различных зонах весной, являются: концентрация легкоокисляемого органического углерода в мелководной термически стратифицированной зоне; температура воды в глубоководных (гомותרмических) районах, где диапазон температур в это время равен 1,3–3,5 °С (Капустина, 1992). Пространственное распределение бактерий, растущих на рыбопептонном агаре (РПА), в весенний период практически совпадает с таковым общего количества бактериопланктона и бывает повышенным в более прогретых, подверженных влиянию притоков и паводковых вод районах. В теплоактивной зоне численность этой группы микроорганизмов изменяется от 0,07 до $3,5 \times 10^3$ кл. мл⁻¹. Высокие концентрации сапрофитов отмечаются только в приустьевых участках крупных притоков и вблизи берегов, что, по-видимому, обусловлено влиянием

терригенного стока. Часто по повышенной численности этих бактерий на отдельных горизонтах можно проследить распространение вод крупных притоков в озере. На основной части акватории озера численность бактерий, растущих на РПА, невысока и изменяется от 0,01 до $0,61 \times 10^3$ кл. мл⁻¹.

Максимальный уровень развития микроорганизмов по всему озеру отмечается в июле – первой половине августа с общей численностью бактерий в прибрежном районе — $1,1–8,0 \times 10^6$ кл. мл⁻¹, а в эпи- и гипolimнионе глубоководных зон — $0,5–5,0 \times 10^6$ кл. мл⁻¹ и $0,45–1,1 \times 10^6$ кл. мл⁻¹, соответственно. В это время наблюдается гораздо более равномерное, чем весной, пространственное распределение бактериопланктона, во многом обусловленное интенсивными гидродинамическими процессами, происходящими в озере. Обычно к концу лета численность микроорганизмов выравнивается по всей акватории, а иногда наблюдается превышение концентрации бактерий в глубоководных районах. Такие же закономерности отмечаются в распределении летнего фитопланктона (Петрова, 1982), который развивается в пелагической части Ладоги не менее интенсивно, чем в прибрежье. Максимальные величины общей численности бактериопланктона всегда отмечаются в эпилимнионе и превышают аналогичные величины в гипolimнионе в 1,3–4 раза. При этом концентрация микроорганизмов в гипolimнионе год от года колеблется незначительно вследствие малой вариабельности температур воды на больших глубинах (обычно 2–3 °С). Наблюдается прямая зависимость концентрации микроорганизмов в эпилимнионе от температуры воды (Капустина, Каурова, 2002). Установлено, что в летний период основные изменения общей численности бактериопланктона происходят в верхнем десяти-пятнадцатиметровом слое воды и определяются, в основном, температурой воды эпилимниона. Годовой максимум численности бактерий, растущих на РПА на основной акватории Ладожского озера (до $6,1 \times 10^3$ кл. мл⁻¹), как правило, отмечается также летом (в профундальном и ультрапрофундальном районах иногда осенью, в сентябре или даже в начале октября). По-видимому, пик численности этой группы бактерий приурочен к отмиранию летних комплексов фитопланктона и высоким температурам воды. Максимальные концентрации сапрофитных бактерий обычно наблюдаются в мелководных районах, особенно в зонах впадения крупных притоков, но иногда наиболее значительные численности этих бактерий обнаруживаются в глубоководных частях озера в связи с интенсивным развитием здесь летнего комплекса фитопланктона.

Осенью (сентябрь – октябрь) обычно наблюдается более равномерное по сравнению с летом пространственное распределение бактериопланктона, отражающее высокую интенсивность гидродинамических процессов в Ладожском озере в этот период. Особенно это касается вертикального распределения микроорганизмов, связанного с заглублением слоя скачка и, соответственно, с более равномерным распределением органического вещества в

столбе воды. Во время осеннего отбора проб ни один район озера еще не охлаждался до 4 °С, поэтому не было выявлено типичное осеннее распределение бактерий, когда наличие термического бара ведет к повышенной численности бактериопланктона в глубоководных, медленнее остывающих частях озера. Обычно осенью концентрация микроорганизмов как в прибрежных, так и в глубоководных районах снижается по сравнению с летом примерно в 1,5–2 раза (Капустина, 1992). В эпилимнионе разница между летними и осенними значениями этого параметра обычно более заметна, чем в гиполимнионе.

Характер распределения бактерий, растущих на РПА, в целом совпадает с таковым общего количества бактериопланктона. Количество микроорганизмов этой физиологической группы колеблется в осенний период от $0,02 \times 10^3$ кл. мл⁻¹ в придонных слоях основной водной массы до $2,4 \times 10^3$ кл. мл⁻¹ в прибрежной зоне. Как правило, в осенний период численность бактерий, растущих на РПА, также как общая численность микроорганизмов, снижается по всей акватории озера по сравнению с летом примерно в 2 раза. Однако в некоторые годы количественный рост этих бактерий в пелагической части озера осенью (сентябрь, начало октября) может продолжаться (до $2,3 \times 10^3$ кл. мл⁻¹), что, по-видимому, определяется особенностями сезонной динамики фитопланктона и спецификой термического режима озера в эти годы.

Вертикальное распределение бактериопланктона в Ладожском озере во многом обусловлено сезонными особенностями гидрофизического режима озера. Обнаружено три основных типа вертикального распределения бактерий:

1. Практически равномерное распределение микроорганизмов от поверхности до дна. Наблюдается обычно весной, летом и осенью в прибрежных районах и в весенний период в глубоководных районах. Летом в прибрежных районах иногда регистрируется небольшое увеличение количества микроорганизмов у дна: видимо, за счет взмучивания донных отложений.

2. Повышенные концентрации бактериопланктона в верхнем слое воды (как правило, в слое 5–15 м, иногда только в поверхностном горизонте), а затем резкое уменьшение (в 1,5–3 раза) численности микроорганизмов ниже 15–20 м вплоть до дна. Такой тип обычно встречается в пелагической части озера в период температурной стратификации водных масс озера (лето, ранняя осень). В отличие от мелководных районов, где колебания численности микроорганизмов затрагивают весь столб воды, в глубоководных зонах существенные изменения численности бактериопланктона происходят лишь в верхнем пятнадцатидвадцатиметровом слое, так как его распределение, в основном, определяется распределением фитопланктона как источника органического вещества.

3. Вертикальное распределение, определяющееся существующей в данный момент локальной гидродинамической ситуацией. В зависимости от конкретной ситуации концентрация микроорганизмов может повышаться в различных слоях воды. Этот тип обычно наблюдается летом в относительно мелководных районах (глубины до 25–30 м) и может быстро меняться. Более ранние эпизодические исследования (Родина, Кузьмицкая, 1963; 1968) выявили те же закономерности вертикального распределения бактериопланктона. Характер вертикального распределения бактерий, растущих на РПА, практически совпадает с таковым общей численности микроорганизмов. Однако эта группа бактерий более чувствительна к изменениям концентрации легкоокисляемого органического вещества в воде, источником которого является фитопланктон, сосредоточенный в верхних слоях воды, и температуры воды. Поэтому в пелагической части озера обычно наблюдаются более резкие колебания численности сапрофитов по сравнению с аналогичными изменениями общей численности бактериопланктона. Как правило, уже на глубине 10 м концентрация этих бактерий в 3–20 раз ниже, чем в поверхностном горизонте. В нижележащих слоях воды численность этой физиологической группы бактерий в пределах вегетационного сезона изменяется незначительно.

Морфологический состав бактериопланктона стабилен и представлен, в основном, кокками (42,1–47,8%) и палочковидными формами (52–57,6%). Встречаются также азотобактероподобные клетки (до 1,5%) и дрожжи (до 1,2%). В устьях крупных притоков, а также в этрофированных и загрязненных районах наблюдается большее, по сравнению с основной водной массой, разнообразие бактериальных морфотипов. Процент палочковидных форм достигает 65,4–86,1%, встречаются палочки длиной до 25–30 мкм. Отмечаются извитые формы, кластридии, колониальные формы. Средняя многолетняя величина бактериальной клетки в Ладожском озере равна 0,19 мкм³. Однако есть районы, где размеры клеток микроорганизмов значительно больше вышеуказанного значения. Так, например, в устье реки Волхов средний объем бактериальной клетки составляет 0,35 мкм³, а в районе Приозерского целлюлозного завода (залив Щучий), работавшего до 1987 г., это значение составляло в среднем 2,25 мкм³. В настоящее время, в отсутствие загрязнения, среднее значение объема бактериальной клетки в заливе Щучий приближается к среднему значению по озеру (0,24 мкм³). Достоверных сезонных изменений объема бактериальных клеток не выявлено.

Достаточно информативным показателем активности бактериального сообщества является интенсивность темновой ассимиляции углекислоты бактериями, отражающая активность микроорганизмов за счет природных органических соединений. Можно считать, что в Ладожском озере темновая фиксация углекислоты практически полностью осуществляется за счет гетеротрофных процессов. За время исследований значения темновой ассимиляции

углекислоты бактериями изменялись от незначительных величин (на грани чувствительности метода) до $11 \text{ мкг С л}^{-1} \text{ сут}^{-1}$, что характерно для мезотрофных водоемов (Сорокин, 1973; Копылов, Косолапов, 2007). Сезонная динамика вышеуказанных значений в общих чертах совпадает с таковой общей численности бактериопланктона. Так, весной (май – начало июня), несмотря на колебание абсолютных значений темновой ассимиляции год от года, максимальные ее значения всегда наблюдаются в мелководной теплоактивной зоне (рис. 6.4.1). В глубоководной части озера интенсивность темновой фиксации углекислоты в это время обычно очень низкая. Летом абсолютные значения этого показателя во всех районах повышаются и выравниваются по всей акватории, но максимальные значения, как правило, отмечаются в прибрежном и деklinальном районах (рис. 6.4.2). Характер пространственного распределения значений темновой ассимиляции углекислоты осенью практически совпадает с летним, но абсолютные значения несколько снижаются. Бактериальная продукция рассчитывалась из значений гетеротрофной (темновой) ассимиляции углекислоты (Романенко, 1964, 1974; Overbeck, 1972, 1979) и изменялась от крайне низких значений в холодноводном гипolimнионе до $170 \text{ мкг С л}^{-1} \text{ сут}^{-1}$ в эпилимнионе летом. Среднее за вегетационный сезон значение бактериальной продукции существенно варьирует год от года. При этом максимальные ($23,3 \text{ мкг С л}^{-1} \text{ сут}^{-1}$) отличаются от минимальных ($2 \text{ мкг С л}^{-1} \text{ сут}^{-1}$) на порядок.

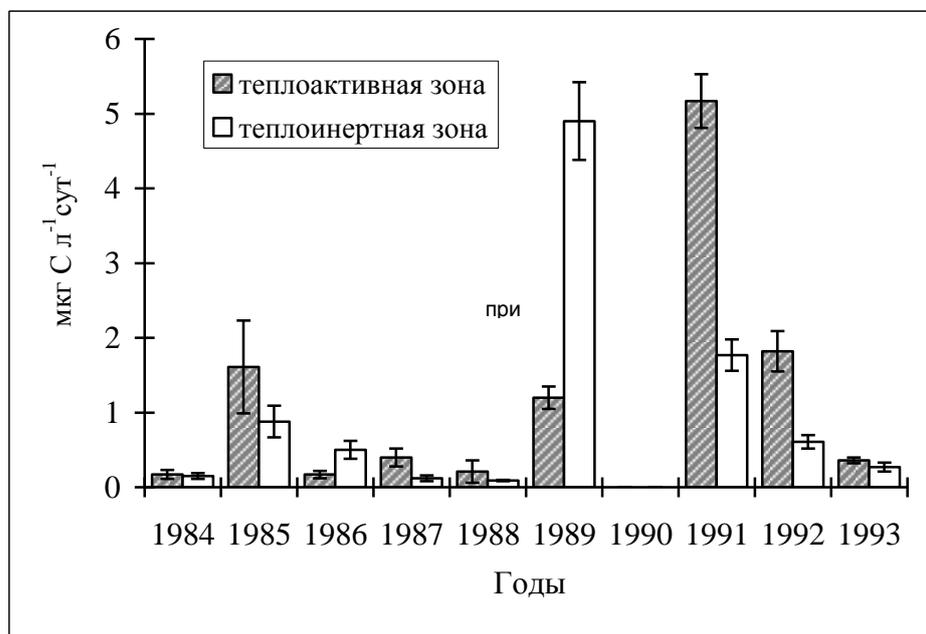


Рис. 6.4.1. Распределение значений гетеротрофной ассимиляции углекислоты ($\text{мкг С л}^{-1} \text{ сут}^{-1}$) в различных районах Ладожского озера в весенний период.

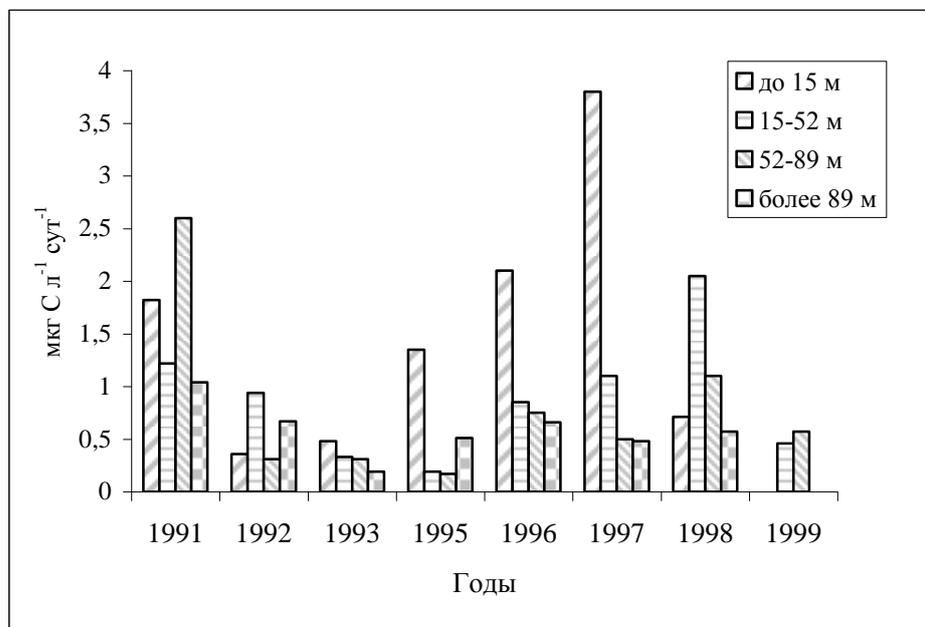


Рис. 6.4.2. Распределение значений гетеротрофной ассимиляции углекислоты ($\mu\text{г С л}^{-1} \text{сут}^{-1}$) в различных районах Ладожского озера в летний период.

Их колебания соответствуют показателям первичной продукции за тот же период в разные годы (Петрова, 1987), т. е. минимальные и максимальные значения бактериальной и первичной продукции приходятся на одни и те же годы. В расчете на весь объем озера за вегетационный сезон показатели бактериальной продукции были соизмеримы со значениями первичной продукции, а в отдельные годы за счет прироста бактериальной биомассы создавалось больше органического вещества, чем в процессе фотосинтеза, что для озер не характерно. По-видимому, такое соотношение вышеуказанных параметров наблюдается в Ладожском озере в связи с поступлением в этот водоем с притоками значительного количества аллохтонного органического вещества, которое примерно равно, а часто превышает уровень первичной продукции за вегетационный период (Трегубова, Кулиш, 1987).

Мерой гетеротрофной активности природных бактериальных популяций является интенсивность потребления микроорганизмами различных органических соединений. В течение нескольких лет (1995–1999 г.г.) в Ладожском озере определялась максимальная скорость потребления глюкозы (V_{max}) микроорганизмами. Известно, что значение этого показателя, как правило, возрастает с увеличением уровня трофии водоема. Наиболее низкие значения получены для олиготрофных водоемов — $0,001\text{--}0,084 \text{ мкг глюкозы л}^{-1} \text{ час}^{-1}$, в мезотрофных водоемах V_{max} может достигать $8,3 \text{ мкг глюкозы л}^{-1} \text{ час}^{-1}$, а в эвтрофных доходить до $15 \text{ мкг глюкозы л}^{-1} \text{ час}^{-1}$ (Драбкова и др., 1990; Rai, Hill, 1982; Kuparinen, 1984). Максимальная скорость потребления глюкозы бактериопланктоном в Ладожском озере изменялась от $0,013$ до $0,585 \text{ мкг глюкозы л}^{-1} \text{ ч}^{-1}$ (Капустина, Каурова, 2002). Эти значения

укладываются в пределы колебаний, характерных как для олиготрофных, так и для мезотрофных водоемов. Время оборота глюкозы за исследованный период составило 3–736,3 часа, при этом минимальные значения всегда отмечаются в прибрежной зоне, а максимальные — в зоне самых больших глубин. Наиболее высокие значения V_{\max} для всего озера отмечаются в летний период, при этом максимальные абсолютные значения зарегистрированы в прибрежном районе. Разница в интенсивности усвоения глюкозы в относительно мелководной и глубоководной частях озера составляет 1,5–2 раза. Самых высоких значений V_{\max} достигает в Волховской губе — 0,15–0,59 мкг глюкозы л⁻¹ час⁻¹ (Таматорина, Каурова. 1999). Трудно связать это с высоким содержанием органического вещества в водах реки Волхов, так как концентрация субстрата в эпилимнионе глубоководных районов озера летом всегда выше, чем в прибрежном районе (Кулиш, 2002), а V_{\max} всегда ниже. По-видимому, в летний период органическое вещество не является лимитирующим фактором для бактерий, а интенсивность гетеротрофной активности микроорганизмов в большей степени связана с температурой воды. Осенью интенсивность потребления глюкозы в прибрежной зоне Ладоги уменьшается, в среднем, в 2,7 раза, оставаясь, тем не менее, максимальной по сравнению с другими зонами. В глубоководных районах наблюдается более существенное снижение V_{\max} — в 5,6–9,5 раз. В отличие от летнего периода, максимальные концентрации субстрата, как и максимальные V_{\max} отмечаются в прибрежном районе. Видимо, в условиях осенней выравненности температур воды по всему озеру, скорость потребления глюкозы бактериями зависит, прежде всего, от концентрации органического вещества.

Имеющиеся в литературе данные позволяют говорить о преобладающей роли микроорганизмов в процессах деструкции органического вещества в водных экосистемах. Скорость потребления кислорода бактериальным сообществом в эпилимнионе Ладожского озера в период открытой воды колеблется от 0,06 мг О₂ л⁻¹ сут⁻¹ осенью до 0,80 мг О₂ л⁻¹ сут⁻¹ летом в глубоководной части озера. Интенсивность дыхания микроорганизмов определялось кислородным методом (Tezuka, 1972). В гипolimнионе наблюдаются низкие величины бактериального дыхания (часто на грани чувствительности метода), хотя в ряде случаев дыхательная активность бактериопланктона увеличивается на границе с термоклином, что, по-видимому, связано с концентрацией в этой зоне легкодоступного органического вещества. Обычно максимальные значения потребления кислорода бактериопланктоном отмечаются в южном прибрежном районе. Значение дыхательного коэффициента (K_2) для бактерий за время исследований варьируют в пределах 0,09–0,54 и достаточно отчетливо различаются в весенний и летний период, что, по-видимому, в значительной степени обусловлено различным происхождением органического вещества (автохтонное и аллохтонное) в разные сезоны. Весной среднее значение этого коэффициента составляет $0,19 \pm 0,02$, а летом — $0,25 \pm 0,08$. В

эпилимнионе Ладожского озера в летний период доля бактериальной деструкции от общей изменяется от 45 до 92% и, в среднем, составляет 68% (Капустина, Каурова, 2002), что характерно для мезотрофных водоемов (Винберг и др., 1971; Драбкова, 1981). В Ладоге наблюдаются довольно низкие скорости минерализации органического вещества микроорганизмами. Средние за вегетационный период значения изменяются в различных районах в разные годы от 5,5 до 22,2 мг С м³ сут⁻¹. За время исследований в расчете на все озеро за вегетационный период бактериопланктоном минерализуется от 855,5 до 3375,2 тыс. т С. Максимальный вклад дают профундальный и ультрапрофундальный районы (вследствие огромных объемов водной массы), хотя абсолютные значения бактериальной деструкции здесь ниже, чем в прибрежном и декаринальном районах. В целом за вегетационный сезон в Ладожском озере бактериопланктоном минерализуется больше органического вещества, чем создается в процессе фотосинтеза, что свидетельствует о важной роли аллохтонной составляющей органического вещества в этом водоеме. Однако летом бактериальная деструкция всегда меньше первичной продукции. Таким образом, в летний период основным источником органического вещества для бактериопланктона является органическое вещество автохтонного происхождения, тогда как весной и осенью важную роль в продукционно-деструкционных процессах, по-видимому, играет аллохтонное органическое вещество, поступление которого в озеро в эти сезоны составляет: весной — около 40% годового, осенью — 23–26% годового (Трегубова и др., 1987). Такое превышение количественных характеристик деструкционных процессов над продукционными довольно обычно для крупных пресноводных водоемов, а также для морей и океанов (Сорокин, 1971; Сорокин, Федоров, 1969; Шушкина и др., 1980).

В развитии бактериального сообщества Ладожского озера в течение последних 30–35 лет можно выделить несколько этапов:

В начале 1960-х гг., когда впервые были проведены эпизодические микробиологические исследования Ладожского озера, это был типично олиготрофный водоем. Концентрация общего фосфора в озере в это время составляла около 10 мкг л⁻¹ (Расплетина, 1982). В озере отмечались очень низкие значения общей численности микроорганизмов (0,06–0,3 × 10⁶ кл. мл⁻¹) и наблюдалось практически равномерное пространственное распределение бактериопланктона. (Родина, Кузьмицкая; 1963; 1968). Исследования конца 1970-х гг. (1976–1980 гг.) показали значительное увеличение уровня развития бактериопланктона по сравнению с предыдущими наблюдениями (общая численность микроорганизмов до 3 × 10⁶ кл. мл⁻¹, темновая фиксация СО₂ до 11 мкг С л⁻¹ сут⁻¹, дыхание бактериального сообщества до 0,7 мг О₂ л⁻¹ сут⁻¹) и выявили гетерогенное пространственное распределение микроорганизмов (Александрова, Капустина, 1982). Концентрация бактерий увеличилась в 3 раза по сравнению с 1960–1961 гг. в южном

прибрежном районе, особенно в Волховской губе и почти в два раза в профундальном и ультрапрофундальном районах. К сожалению, не удалось проследить изменение интенсивности гетеротрофной ассимиляции CO_2 с 1960-х гг., так как этот параметр ранее не определялся. В конце 1970-х гг. значения микробиологических параметров изменялись в пределах, свойственных как олиготрофным, так и мезотрофным водоемам, а в южном прибрежном районе иногда достигали значений, характерных для эвтрофных водоемов. Эти изменения происходили на фоне резкого увеличения концентрации общего фосфора, которая к 1976 г. повысилась до 27 мкг л^{-1} (Расплетина, 1982).

Последующие исследования (1980-е – начало 1990-х гг.) выявили дальнейшее увеличение численности микроорганизмов, как в эпилимнионе, так и в гиполимнионе Ладожского озера (максимальные величины — до $5 \times 10^6 \text{ кл. мл}^{-1}$) (рис. 6.4.3). Значения темновой фиксации CO_2 не обнаруживали непрерывного роста, однако интенсивность этого процесса была достаточно высокой (мезотрофный уровень с чертами эвтрофии, максимальные величины до $21 \text{ мкг С л}^{-1} \text{ сут}^{-1}$). Эвтрофирование Ладожского озера привело к непрерывному увеличению численности бактериопланктона вплоть до начала 1990-х гг. прошлого столетия.

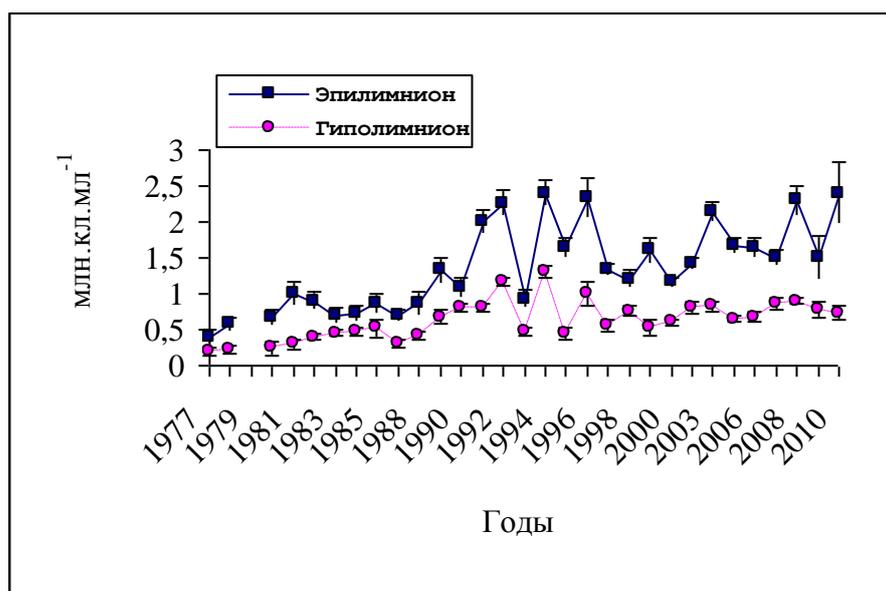


Рис. 6.4.3. Динамика средних значений общей численности бактериопланктона (млн кл. мл^{-1}) в эпи- и гиполимнионе Ладожского озера в летний период.

В начале 1990-х гг. наблюдается снижение концентрации общего фосфора до $19\text{--}22 \text{ мкг л}^{-1}$ (Niinioja et al., 1997; Drabkova, 1999), и с 1992 г. начинаются межгодовые колебания общей численности бактериопланктона (рис. 6.4.3), тогда как до начала 1990-х гг. наблюдался практически непрерывный рост количества микроорганизмов как в эпи-, так и в гиполимнионе. Значительные (58–61%) колебания этого показателя (как, например, в 1993–1994 и 1996–

1997 гг.) объясняются, по-видимому, экстремальными погодными условиями в эти годы (1994 и 1996 гг. — очень теплые, 1993 и 1997 гг. — аномально холодные). На фоне снижения фосфорной нагрузки летние величины темновой ассимиляции углекислоты за период 1992–1999 гг. демонстрируют отчетливую тенденцию существенного снижения по сравнению с периодом 1980-х г. (рис. 6.4.4). Средние летние значения темновой ассимиляции CO_2 за периоды 1981–1991 и 1992–1999 гг. составляют $1,92 \pm 0,6$ и $0,41 \pm 0,11$ $\text{мкг С л}^{-1} \text{сут}^{-1}$ соответственно, т. е. различаются почти в 5 раз, причем варибельность значений в 1992–1999 гг. очень невелика.

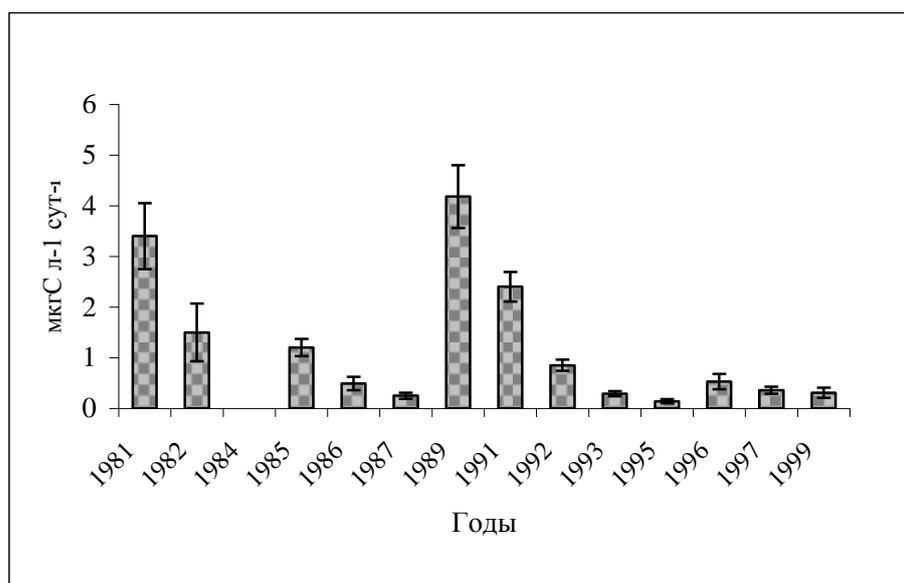


Рис. 6.4.4. Средние значения темновой ассимиляции углекислоты ($\text{мкг С л}^{-1} \text{сут}^{-1}$) в Ладожском озере в летний период.

В последние 10–15 лет характер пространственно-временного распределения микробиологических параметров практически не отличался от такового за предыдущий период исследований и определялся, в основном, особенностями гидрофизического режима и развития фитопланктона Ладожского озера. Наиболее репрезентативными в смысле выявления тенденций развития бактериального сообщества являются данные, полученные в летний период при максимальных температурах воды и наличии устойчивой температурной стратификации. Наиболее интенсивный уровень развития бактериопланктона в Ладожском озере по всем показателям наблюдается в летний период. При этом максимальные значения микробиологических параметров, как правило, отмечаются в прибрежном районе (особенно в зонах влияния крупных притоков), а самые низкие — в наиболее глубоководной части озера. В отдельные годы в эпилимнионе пелагической части озера наблюдается превышение

абсолютных значений этих параметров над таковыми в прибрежном районе, что, по-видимому, связано с отбором проб во время летнего пика развития фитопланктона именно в глубоководных районах. Межгодовые изменения среднелетних значений общей численности бактериопланктона в период с 2000 г. по настоящее время весьма незначительны по сравнению с предыдущим периодом исследований. Хотя отдельные годы, конечно, имеют свои особенности. Так, выделяется жаркий 2003 г., когда отмечались более высокие значения общей численности микроорганизмов (в основном, в гиполимнионе) по сравнению с предыдущими и последующими годами (рис. 6.4.3). В 2008 г. численность микроорганизмов также стала увеличиваться как в эпи-, так и в гиполимнионе. Однако в 2009 г. концентрация бактериопланктона возвращается к уровню 2007 г. По-видимому, это может быть связано с датой отбора проб (конец июля в 2008 г. и конец августа в 2009 г.). Как правило, максимальное развитие фитопланктона и, соответственно, наиболее высокие значения общей численности бактериопланктона наблюдаются в Ладожском озере как раз во второй половине июля — во время максимального прогрева воды. Вторую половину августа можно считать уже началом осеннего периода. Несмотря на естественные межгодовые колебания, вызванные различными причинами, можно сказать, что в последние 10–12 лет наблюдается стабилизация общей численности бактерий в Ладожском озере по сравнению с предыдущими годами. Особенно хорошо это заметно в гиполимнионе. Величины микробиологических параметров в Ладожском озере за этот период укладываются в интервал значений, свойственных мезотрофным водоемам (Сорокин, 1973; Дробкова, 1981; Копылов, Косолапов, 2007). Трофический статус озера по микробиологическим показателям изменяется от слабо мезотрофного в гиполимнионе профундального и ультрапрофундального районов до типично мезотрофного в южном прибрежном районе.

6.5. Зоопланктон

Исследования зоопланктона притоков Ладожского озера начаты только в 2012 г. К настоящему моменту объем собранной информации не позволяет провести ее серьезного обобщения.

Первые исследования зоопланктона самого Ладожского озера относятся к началу XX в. (Скориков, 1911). Характеристика зоопланктона южной части озера в 1920-е гг. была дана Соколовой (1930). Этот же автор позднее представил его первую количественную оценку (Соколова, 1956). Подробный список видового состава сообщества был опубликован в конце 1960-х гг. (Деньгина, Соколова, 1968). Цикл работ по зоопланктону Ладожского озера был

выполнен Смирновой (1982, 1982а, 1986, 1986а), ряд материалов опубликован сотрудниками ГосНИОРХ (Сергеева, 1988; Огородникова, 1995; Lavrentjeva et al., 1997). В 1990-е гг. исследования зоопланктона выполнены сотрудниками Института озераведения, некоторые из них — совместно с финскими коллегами (Андроникова, 1993; Andronikova, 1996; Andronikova, Avinsky, 1994; Avinsky et al., 2000; Karjalainen et al., 1996, 1999; Rahkola et al., 1998, 1999; Rasporov et al., 1996). Состояние зоопланктона в последние десятилетие прошлого века, сравнение уровней развития сообщества на отдельных участках водоема и многолетняя динамика зоопланктона даны Авинским (Авинский, 2002, 2006).

Ладожское озеро — крупнейшее в Европе, а среди самых крупных водоемов мира является самым северным. Последнее определяет особенности его радиационного и термического режима. Сложная морфометрия озера обуславливает формирование районов, контрастных по температурному режиму, что в свою очередь определяет пространственно-временную неоднородность лимнических процессов (Драбкова, 2002).

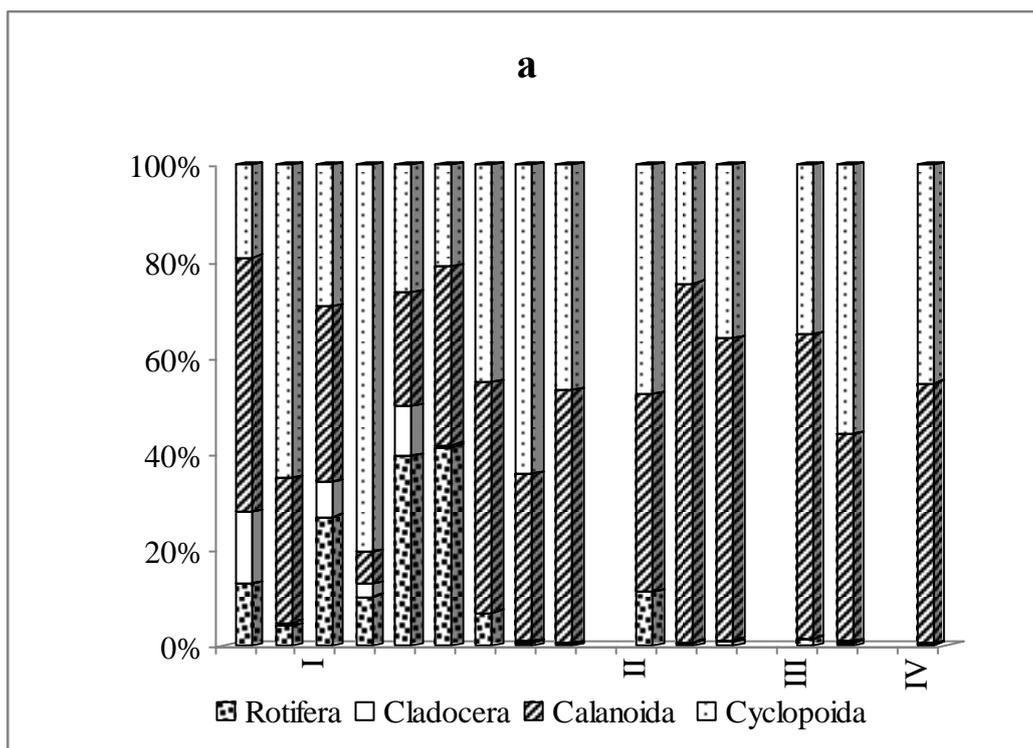
В настоящем разделе при анализе изменчивости характеристик зоопланктона использовано пространственное разбиение Ладожского озера на районы с равномерными средними уклонами дна, предполагающее, что для каждого из этих районов скорость прогрева и охлаждения, степень перемешивания водной толщи и темпы развития биологических сообществ имеют только им присущие величины (Науменко, 1995). Это мелководный район (диапазон глубин 0–18 м), переходный район (диапазон глубин 18–50 м), район озерного уступа (диапазон глубин 50–70 м), склоновый район (диапазон глубин 70–100 м), глубоководный район (диапазон глубин 100–140 м) и впадины, которые обособлены друг от друга и, занимая минимальные площади, сосредотачивают в себе в два раза больший объем воды, чем в мелководном районе.

В составе весеннего зоопланктона обнаруживается 66 видов, из которых: *Rotifera* — 27, *Cladocera* — 25, *Calanoida* — 5, *Cyclopoida* — 8. Наименьшее число видов (35) регистрируется в начале мая, в конце мая и начале июля количество найденных видов почти одинаково (46 и 48 соответственно). Ранней весной в зоопланктоне Ладожского озера доминируют науплии циклопид и калянид, *Notholca acuminata*, *N. caudata*, *N. cinetura*, *Limnocalanus macrurus*, *Cyclops strenuus*.

В начале мая основу зоопланктона по численности и биомассе составляют веслоногие рачки, структуру которых до 96% определяют науплии (рис.6.5.1). И только в Волховской губе и на юго-западе мелководного района коловратки составляют от 17 до 40% в общей численности зоопланктона. Ранней весной низкая температура воды и слабое развитие фито- и бактериопланктона определяют незначительное развитие зоопланктона. Численность зоопланктона колеблется от 1 тыс. экз. м⁻³ до 5,8 тыс. экз. м⁻³, а биомасса от 9,3 мг м⁻³ до 89,5

мг м⁻³. Максимальный прогрев воды и наибольшие величины биомассы зоопланктона фиксируются в Волховской губе. Горизонтальное распределение зоопланктона неравномерно и не зависит от термического режима (рис. 6.5.2). Здесь и далее на рисунках приняты следующие обозначения: I — мелководный район; II — переходный район; III — район озерного уступа; IV — глубоководный район; V — впадины.

В конце мая в мелководном районе доминируют: *Notholca caudata*, *Conochilus hippocrepis*, *Kellicottia longispina*, коловратки группы *Synchaeta*, *Eurythemora lacustris*, *Eubosmina longispina*. В переходном районе массовыми видами являются: *K. longispina*, *C. hippocrepis*, науплии. На остальной акватории озера доминируют науплии.



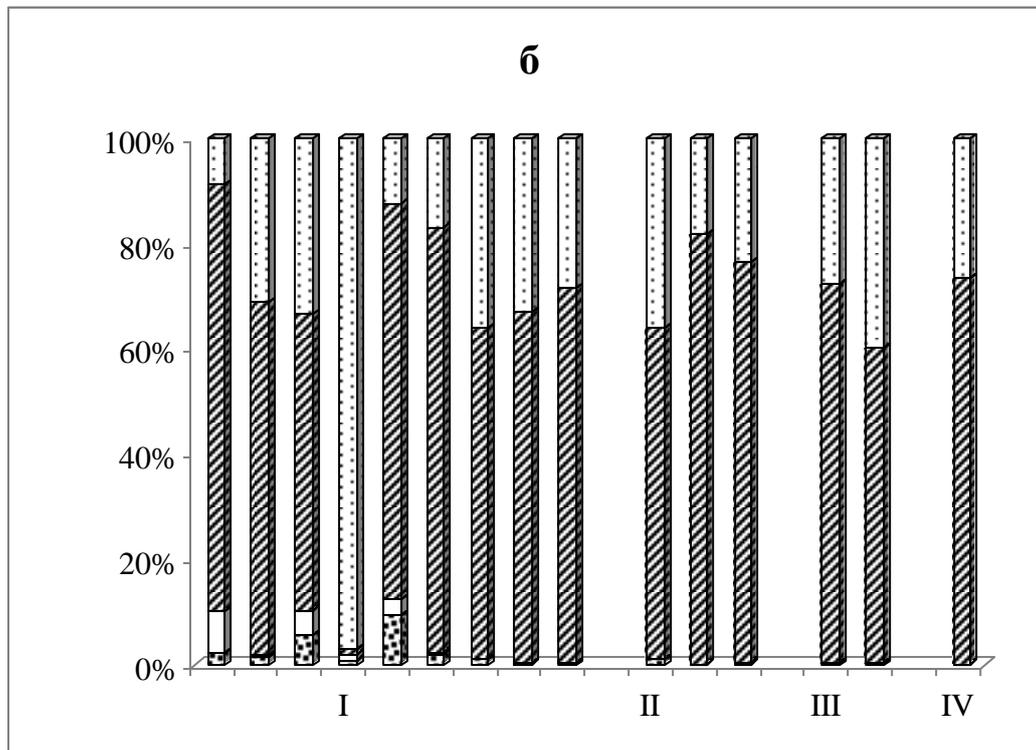


Рис. 6.5.1. Соотношение основных групп в общей численности (а) и биомассе (б) зоопланктона в мелководном районе и в эпилимнионе Ладожского озера в начале мая по районам.

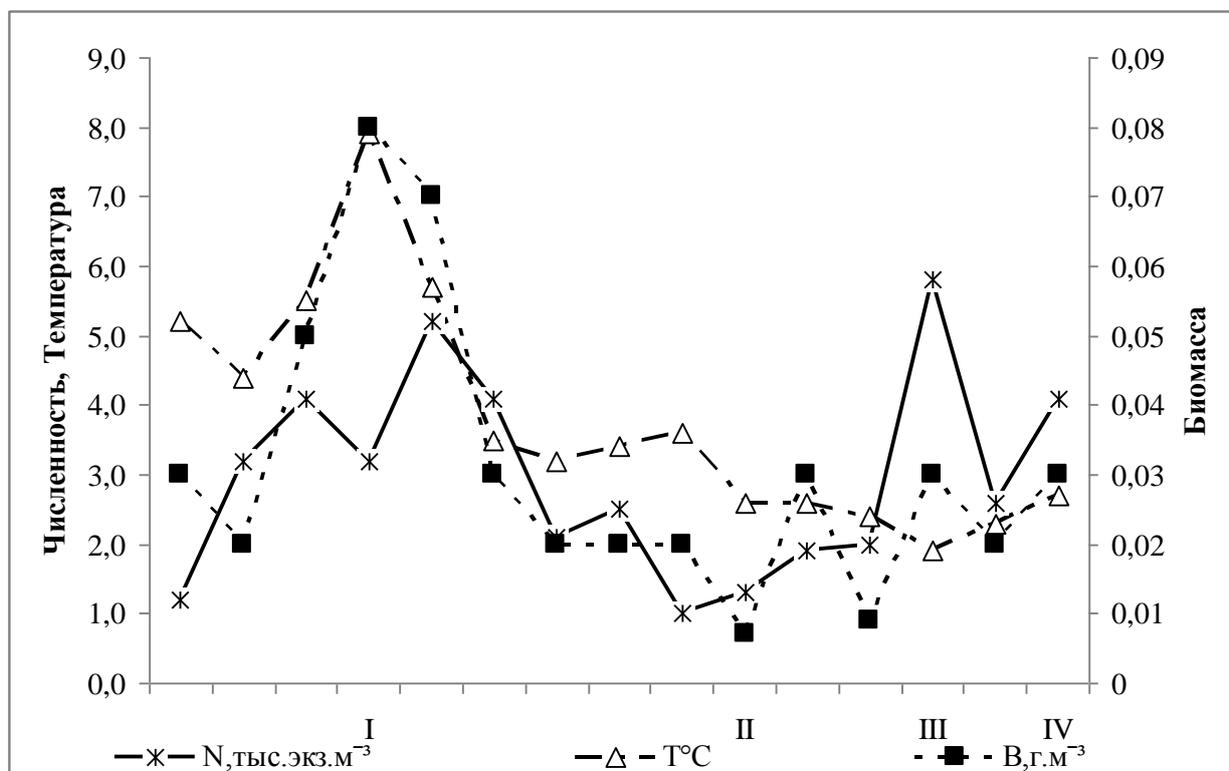
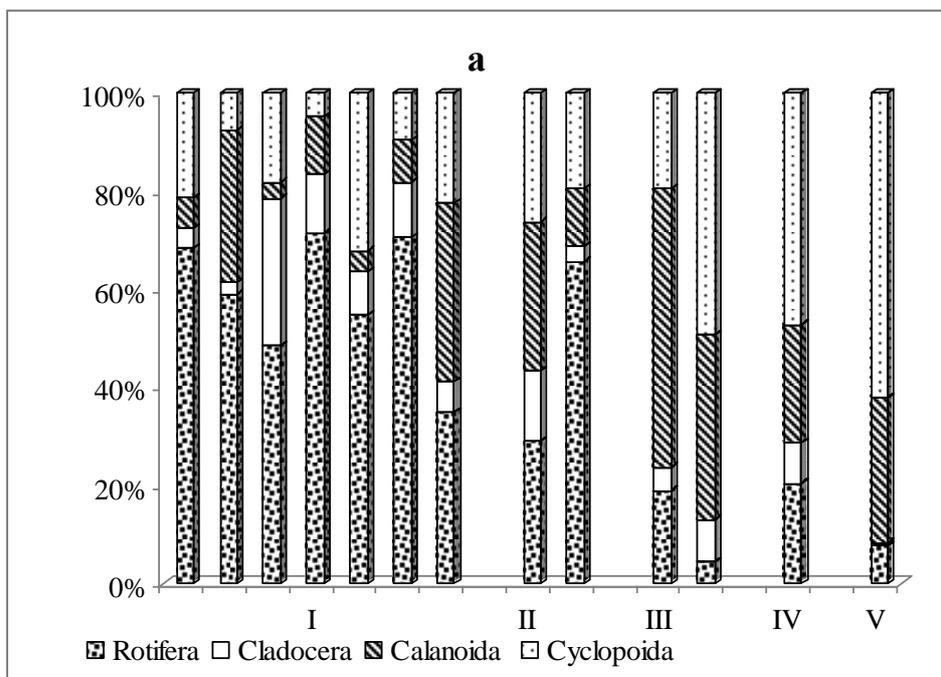


Рис. 6.5.2. Изменение количественных параметров зоопланктона и температуры воды в мелководном районе и в эпилимнионе Ладожского озера в начале мая по районам.

В конце мая в мелководном и переходном районах при прогреве поверхностных слоев воды от 7 до 15 °С, создаются благоприятные температурный и пищевой режимы для развития коловраток и ветвистоусых рачков. Вклад коловраток в общую численность зоопланктона наибольший — до 70%, доля ветвистоусых в общей биомассе зоопланктона на отдельных участках Волховской губы изменяется от 24 до 59% (рис. 6.5.3). Основу зоопланктона центральной части Ладожского озера составляют веслоногие рачки, среди которых численность определяют науплии, а биомассу — науплии и *Eudiatomus gracilis*. В этот период в пространственном распределении зоопланктона наблюдается большой диапазон количественных показателей между мелководным районом и пелагиалью, который составил 0,1–8,0 тыс. экз. м⁻³ по численности и 3,0–210,0 мг м⁻³ по биомассе. В конце мая прослеживается прямая зависимость ($r = 0,8$, $n = 13$) количественного развития и пространственного распределения зоопланктона от температуры воды (рис. 6.5.4).



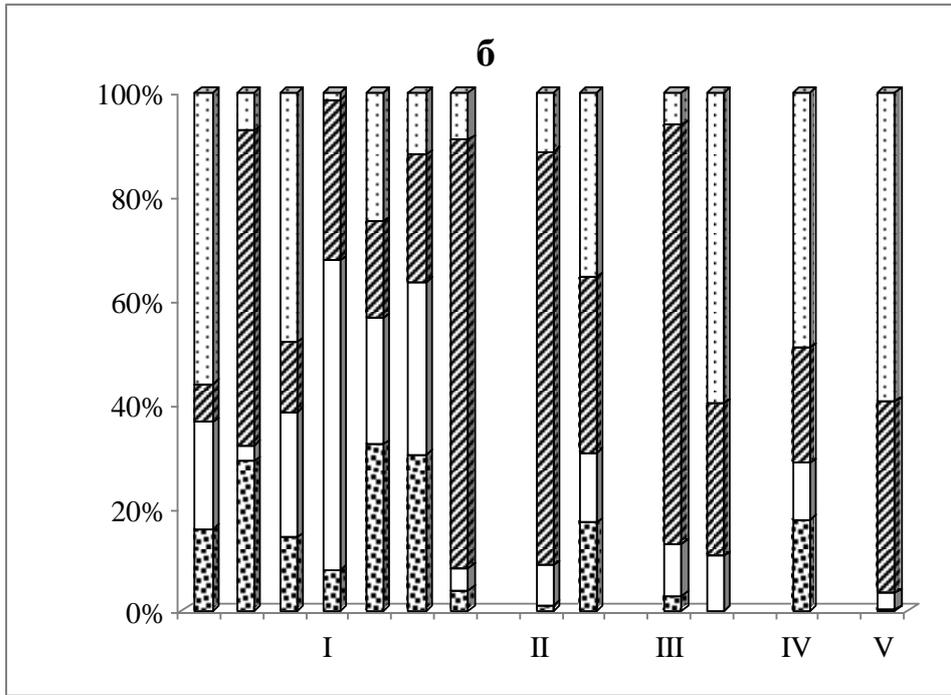


Рис. 6.5.3. Соотношение основных групп в общей численности (а) и биомассе (б) зоопланктона в мелководном районе и в эпилимнионе Ладожского озера в конце мая по районам.

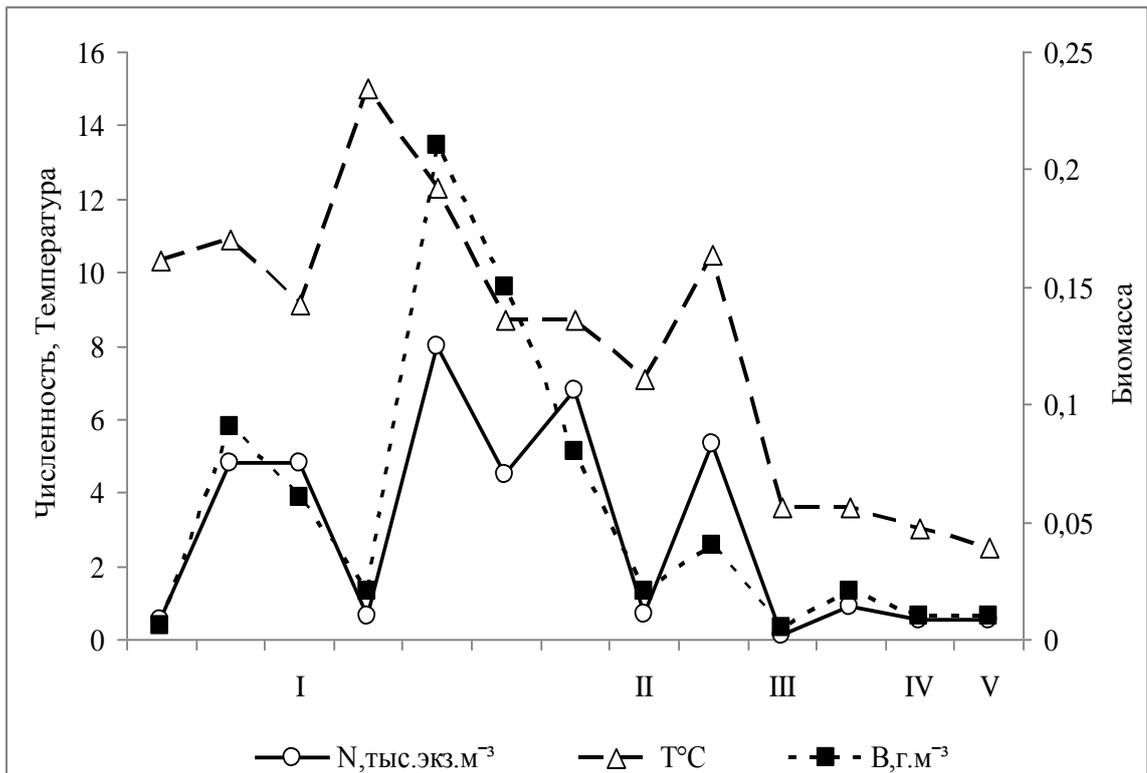
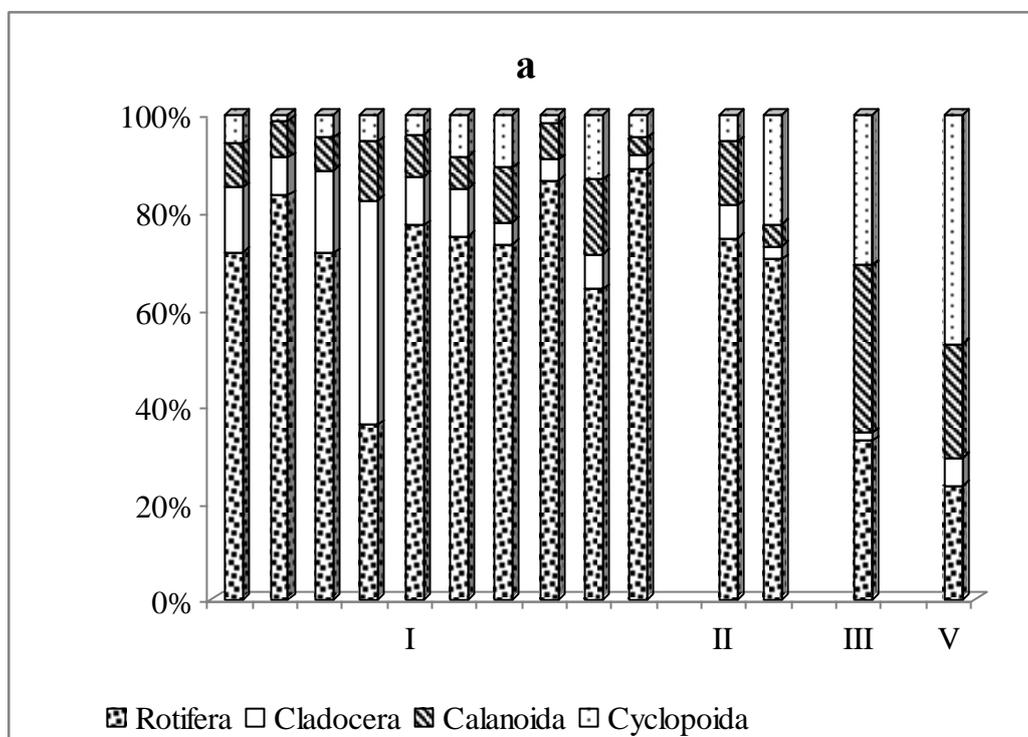


Рис. 6.5.4. Изменение количественных параметров зоопланктона и температуры воды в мелководном районе и в эпилимнионе Ладожского озера в начале мая по районам.

В конце июня доминируют *Notholca caudata*, *Conochilus hippocrepis*, *Kellicottia longispina*, *Asplanchna priodonta*. В это время температура воды достигает пороговых величин при которых начинают размножаться коловратки, и к началу биологического лета на всей акватории мелководного района они формируют численность и биомассу зоопланктона, а в пелагиале их роль значительно повышается (рис. 6.5.5). В мелководном и переходном районах наблюдается массовое развитие крупной хищной коловратки *A. priodonta*, доля которой в общей биомассе составляет от 42 до 80%. Только на станции 1, расположенной в устье реки Волхов, значимую роль в формировании численности (46%) и биомассы (78%) зоопланктона играют ветвистоусые рачки (рис. 6.5.5). Преобладание клadoцер над остальными группами зоопланктона в Волховской губе, особенно в летний период, считается характерной ее особенностью (Авинский, 2002; Соколова, 1956).



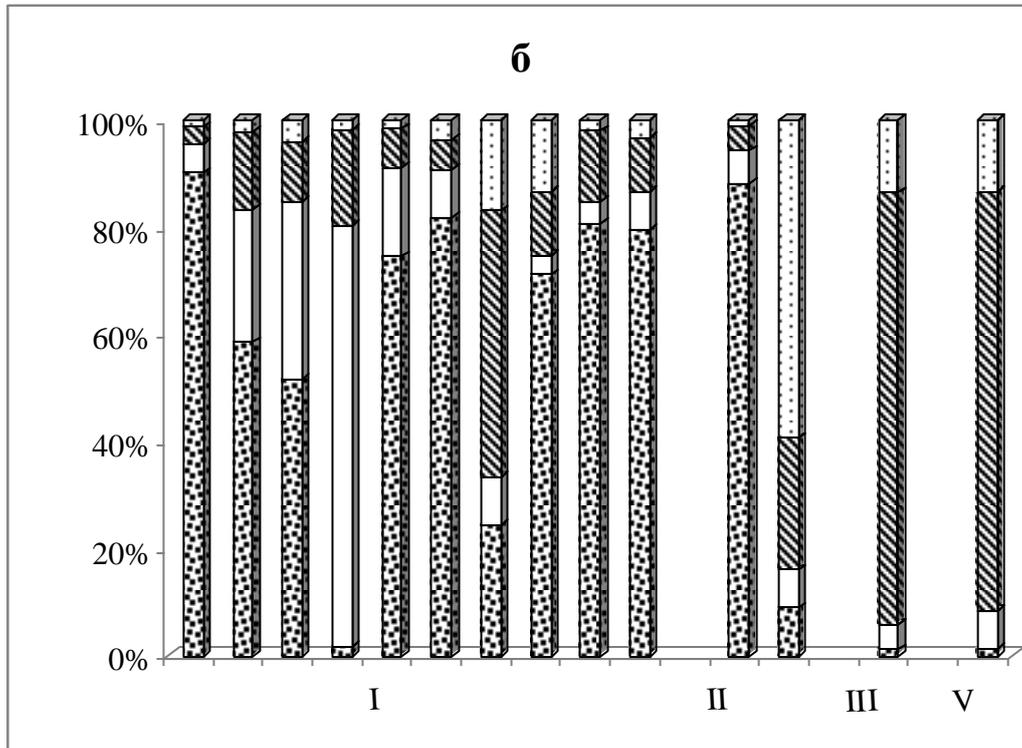


Рис. 6.5.5. Соотношение основных групп в общей численности (а) и биомассе (б) зоопланктона в мелководном районе и в эпилимнионе Ладожского озера в конце июня.

В районе озерного уступа (несмотря на значительный прогрев воды) и в районе впадин зоопланктон формируют веслоногие рачки. К началу биологического лета численность зоопланктона в Ладожском озере увеличивается в 2–25 раз и колеблется от 0,8 до 33,3 тыс. экз. м⁻³ по численности и от 0,01 до 2,2 г м⁻³ по биомассе. В это время распределение зоопланктона по акватории озера имеет пятнистый характер и в большей мере связано с гидродинамическими причинами, чем с температурой (рис. 6.5.6).

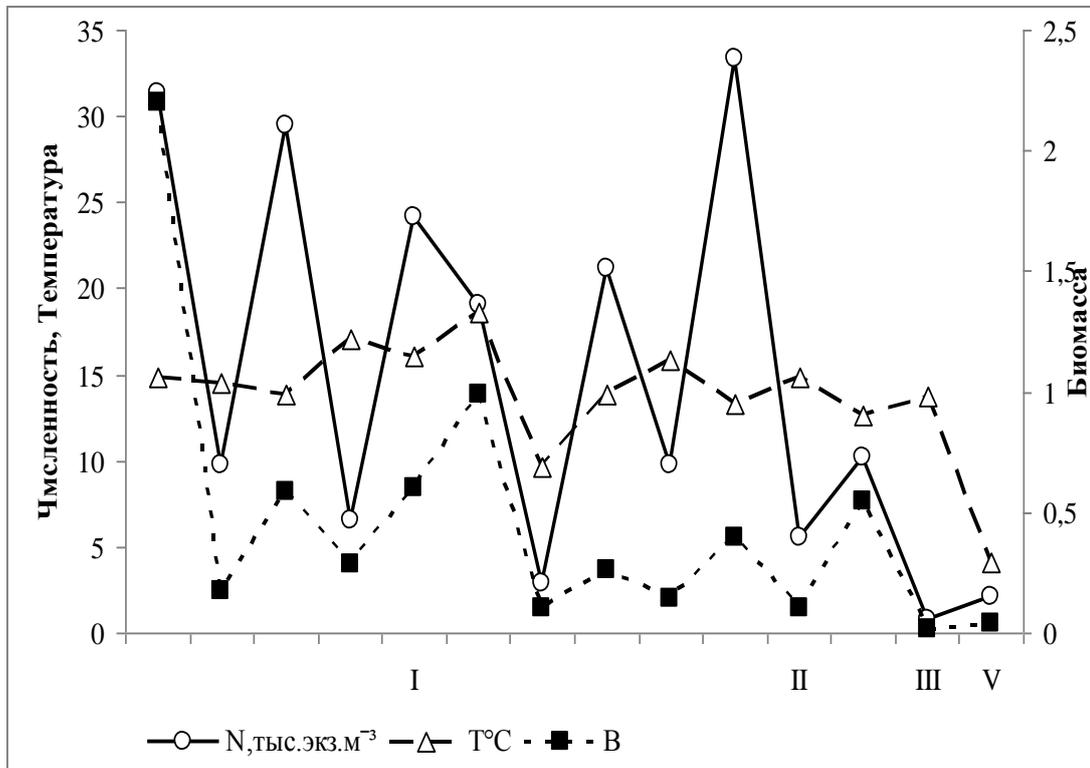


Рис. 6.5.6. Изменение количественных параметров зоопланктона и температуры воды в мелководном районе и в эпилимнионе Ладожского озера в июне.

Можно сделать вывод, что в формировании качественного состава и в количественном развитии весеннего зоопланктона основная роль принадлежит веслоногим рачкам и коловраткам. В начале мая распределение зоопланктона по акватории озера неоднородное, а его продуктивность низкая. В конце мая в мелководном и в переходном районах основным фактором, определяющим структурные перестройки и повышение продуктивности зоопланктона, является температура. Неоднородность в горизонтальном распределении зоопланктона, возможно, связана с влиянием сгонно-нагонных ветров и течений. В эпилимнионе района озерного уступа, глубоководного района и впадин до конца июня сохраняется низкая продуктивность зоопланктона.

Согласно выводам И.И. Николаева, изучавшего зоопланктон Онежского озера (Николаев, 1972), и В.А. Авинского (Авинский, 2002) вертикальное распределение зоопланктона в больших озерах соответствует термическому расслоению водной толщи. Распределение ладожского зоопланктона это подтверждает. В Ладоге температура поверхностного слоя изменяется от 14,2 до 22,5 °С, термоклин располагается на глубинах от 10 до 17,5 м, за исключением очень жаркого августа 2010 г, когда слой 0–5 м прогревался до 22 °С, а температура столба воды ниже 5 м равнялась 8 °С. Вертикальное распределение зоопланктона представлено на рис. 6.5.7.

Слой эпилимниона (0–10 м) характеризуется максимальной продуктивностью. Доминируют по численности, как правило, коловратки — *Kellicottia longispina*, *Conochilus hippocrepis*, *Polyarthra dolichoptera*, *Notholca caudata*, коловратки рода *Synchaeta*. В биомассе основная роль принадлежит *Eubosmina longispina*, мелким циклопам *Thermocyclops oithonoides* или крупным хищникам — *Bythotrephes longimanus*, *Leptodora kindti*. Доминирование в эпилимнионе в прошлом десятилетие крупной коловратки *Asplanchna priodonta* в последние годы не было столь выраженным. Только в августе 2009 г. ее вклад в биомассу составлял до 64%.

В 2007–2009 гг. диапазон количественных показателей был незначительным и составлял 22,5–34,1 тыс. экз. м⁻³ по численности и 217,5–338,2 мг м⁻³ по биомассе. В 2010 г. благодаря сильному прогреву воды здесь зарегистрированы максимальные величины численности (121,1 тыс. экз. м⁻³) и биомассы (701,9 мг м⁻³).

Слой металимниона (10–25 м) характеризуется значительно более низкими значениями численности (1,6–3,4 тыс. экз. м⁻³) и биомассы (17,6–201,9 мг м⁻³) зоопланктона. Исключение составил 2009 г., когда биомасса в слое эпилимниона (217 мг м⁻³) и металимниона (201,9 мг м⁻³) практически совпадали. По численности здесь часто доминируют коловратки (до 75%), *E. longispina* (до 52%). В формировании биомассы основная роль принадлежит *E. longispina* (до 61%), что является, как уже раньше отмечалось Авинским (2002), особенностью этого слоя.

В слое гипolimниона зоопланктон представлен исключительно копеподами *Cyclops lacustris* и *Limnocalanus macrurus*, биомасса которых, благодаря крупным размерам, значительна.

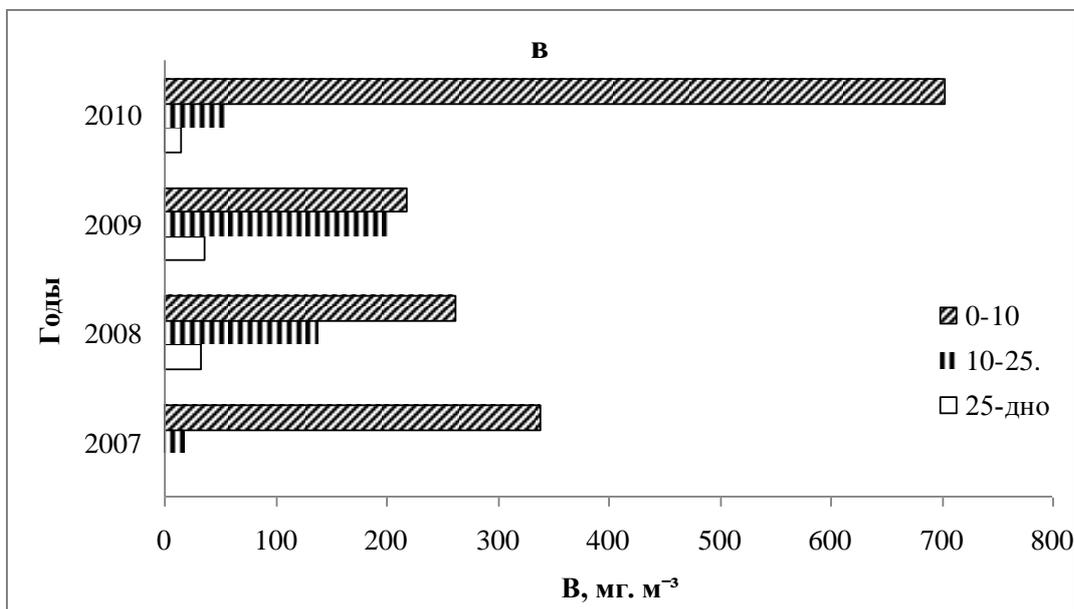
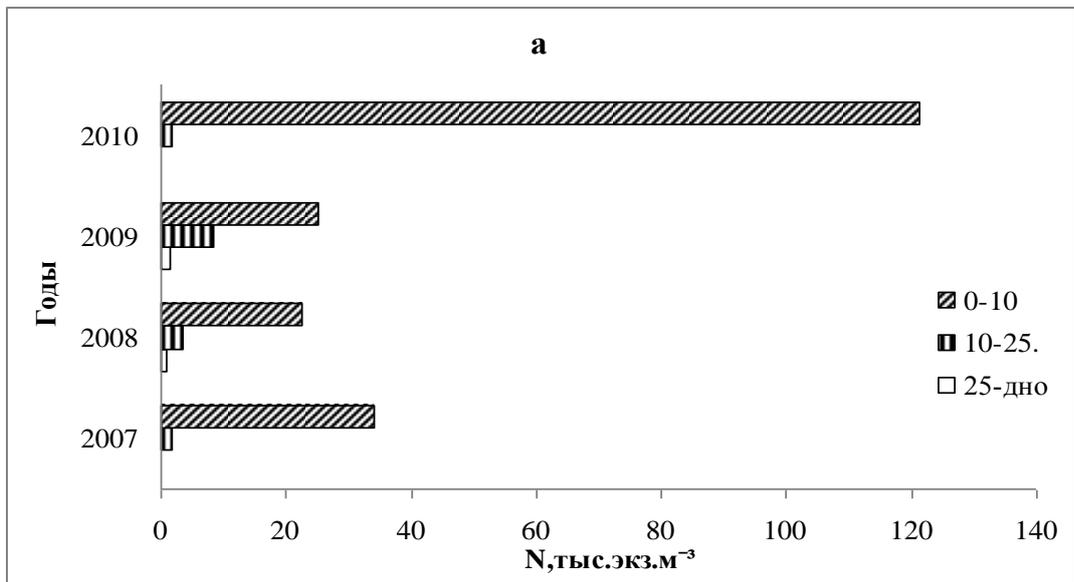


Рис. 6.5.7. Вертикальное распределение численности (а) и биомассы (б) зоопланктона центральной части Ладожского озера по годам.

Таким образом, зоопланктон пелагиали Ладожского озера обладает сложной вертикальной структурой, где хорошо выражено разделение в пространстве отдельных компонентов зоопланктона. Наиболее характерная особенность вертикальной структуры зоопланктона Ладожского озера — наличие максимума клadoцер в слое металимниона. Следует отметить уменьшение доли коловратки *A. priodonta* в численности и биомассе зоопланктона центральной части Ладожского озера, что, возможно, связано с определенной цикличностью в ее развитии.

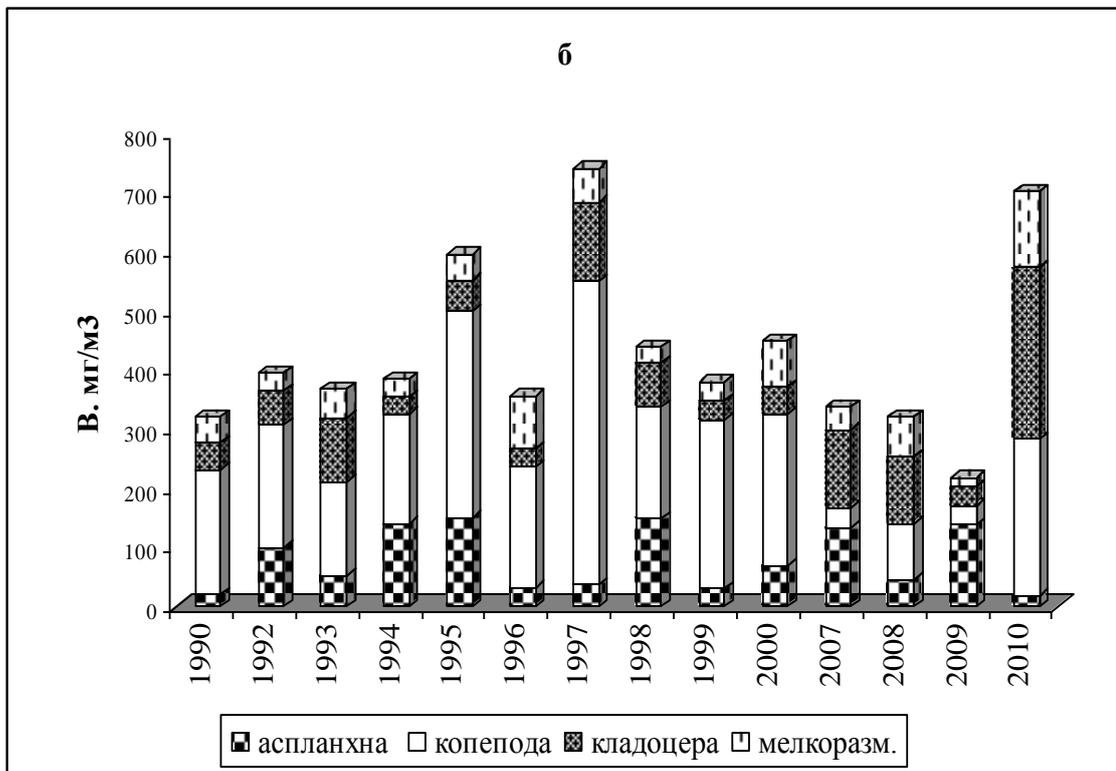
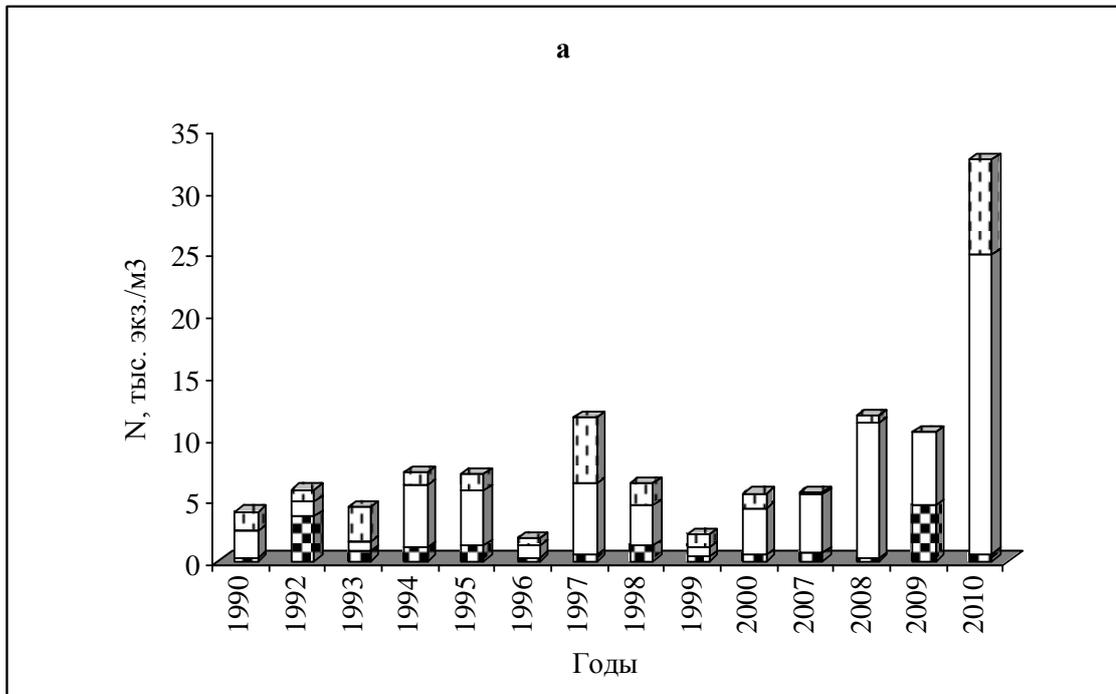


Рис. 6.5.8. Изменение численности (а) и биомассы (б) летнего зоопланктона центральной части Ладожского озера в многолетнем ряду.

Для оценки многолетних изменений зоопланктона выполнено сопоставление среднемноголетних значений за 1990-е гг. с данными за последние 4 года. Рассмотрение динамики зоопланктона центральной части Ладожского озера за 1990–2010 гг. не выявило выраженных тенденций ее изменений (рис. 6.5.8). В пелагиале глубоководной части

Ладожского озера, как правило, преобладают коловратки и копеподы. Для сетного планктона за 15 лет средние значения численности в слое 0–10 м составили 19 ± 4 тыс. экз. м^{-3} , а биомассы — 731 ± 140 мг м^{-3} . Как особенность зоопланктона в слое эпилимниона отмечается преобладание аспланхны (38% в общей биомассе). Однако в последние годы ее значение в биомассе не было стабильным и, наоборот, отмечается увеличение в общей биомассе доли босмины и крупных кладоцер (до 40%). Следует отметить высокую продуктивность зоопланктона в августе 2010 г.

Таким образом, за последние годы в структуре и количественном развитии зоопланктонного сообщества центральной части Ладожского озера не произошло каких-либо серьезных изменений, что позволяет по-прежнему оценивать рассматриваемый участок акватории Ладожского озера согласно принятым классификациям (Китаев, 1984; Андроникова, 1996) как слабomezотрофный (при олиготрофном характере гипolimниона).

6.6. Зообентос

6.6.1. Макрозообентос притоков Ладожского озера

Зообентос — организмы, обитающие в зоне контакта воды и донных отложений — представляет собой сообщество донных беспозвоночных, очень разнообразных по систематическому составу и образу жизни. Зообентос играет существенную роль в речных экосистемах, являясь важным кормовым элементом для рыбного населения и участвуя в трансформации органических веществ и передаче энергии. Кроме того, характеристики зообентоса могут служить хорошими показателями чистоты речных вод (Алимов и др., 1976; Алимов, Тесленко, 1988; Балушкина, 1987; Зинченко, 2004 и др.). Особенно это важно для оценки влияния притоков на экосистему Ладожского озера.

Исследования сообществ донных беспозвоночных проводились в сентябре 2004 и 2005 гг. в нижнем течении ряда притоков Ладоги, рек Морье, Авлога, Бурная, Вуокса, Хиитолан, Ийоки, Тохмайоки, Янисйоки, Уксунйоки, Тулемайоки, Видлица, Тулокса, Оять, Паша, Сясь, Волхов, Лава и Назия (Беляков, 2004; 2006).

Состав зообентоса исследованных рек объединяет в себе элементы фауны водоемов Фенноскандии (Яковлев, 1999) и Центральной России. Обнаружено более 60 видов зообентоса, которые представляют только основное ядро фауны. Среди групп зообентоса отмечены олигохеты, пиявки, моллюски, водяные клещи, клопы, поденки, веснянки, большекрылки, ручейники и двукрылые. Среди последних преобладали хирономиды (табл. 6.6.1). Количественно (как по численности, так и по биомассе) в большинстве водотоков преобладают хирономиды, олигохеты, моллюски, или ручейники (рис. 6.6.1). Степень заиленности грунта,

как правило, благоприятствует развитию представителей олигохет (*Isochaetides newaensis*, *Potamothrix hammoniensis*, *Limnodrilus hoffmeisteri*, *Tubifex ignotus*) и хирономид (*Polypedilum sp. sp.*, *Chironomus sp. sp.*), а большая скорость течения — развитию ручейников (*Molanna angustata*, *Leptocerus tineiformis*, *Chaetopteryx villosa*, *Cheumatopsyche lepida* и др.).

Изменение соотношения групп как по численности, так и по биомассе чаще связано именно со скоростью течения и характеристиками субстрата и в меньшей степени с гидрохимическими характеристиками воды и антропогенным воздействием. Тем не менее, в условиях загрязнения, как правило, преобладали олигохеты-тубифициды и хирономиды (таниподиды и мотыль), а в более чистых реках — моллюски и ручейники.

Заметно более высокая плотность и биомасса организмов зообентоса в некоторых из изученных рек может говорить об изменении кормовых условий зообентоса, в том числе и из-за увеличения антропогенной нагрузки (табл. 6.6.2).

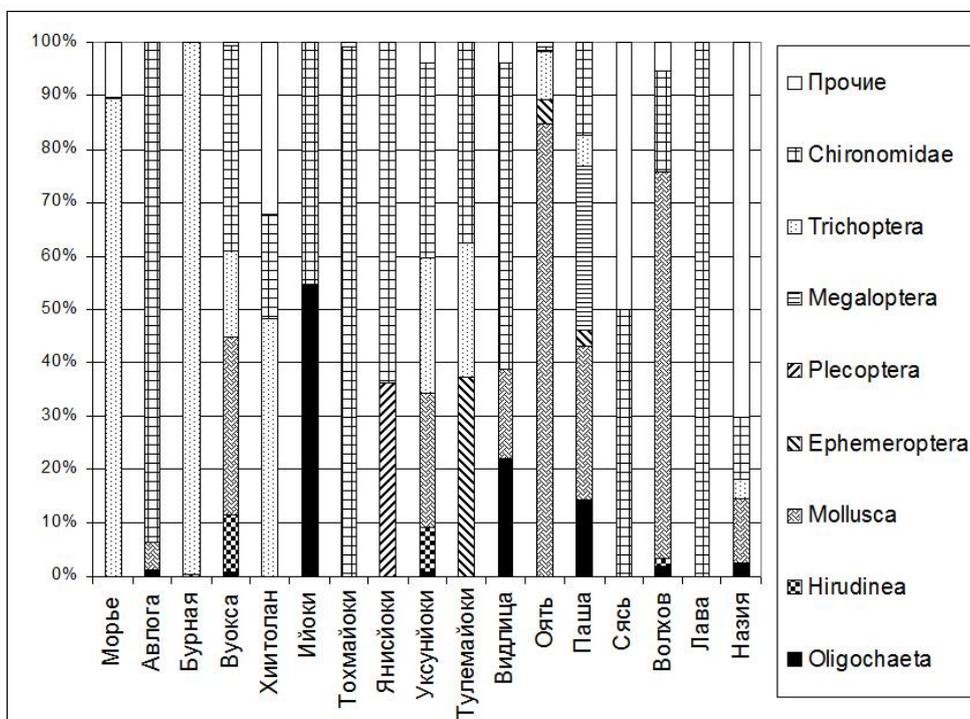


Рис. 6.6.1. Соотношение групп макрозообентоса по биомассе в притоках Ладожского озера.

Таблица 6.6.1

Список видов макрозообентоса притоков Ладожского озера

OLIGOCHAETA	COLEOPTERA	<i>Harnischia fuscimana</i>
<i>Spirosperma ferox</i>	<i>Haliplus ruficollis</i>	<i>Dicrotendipes nervosus</i>
<i>Isochaetides newaensis</i>	MEGALOPTERA	<i>Microtendipes pedellus</i>
<i>Potamothrix hammoniensis</i>	<i>Sialis lutaria</i>	<i>Tanytarsus medius</i>

<i>Limnodrilus hoffmeisteri</i>	EPHEMEROPTERA	<i>Polypedilum bicrenatum</i>
<i>Tubifex ignotus</i>	<i>Ametropus eatoni</i>	<i>Polypedilum tetracrenatum</i>
HIRUDINEA	<i>Heptagenia sulfurea</i>	<i>Chironomus plumosus</i>
<i>Erpobdella lineata</i>	<i>Caenis horaria</i>	<i>Glyptotendipes glaucus</i>
<i>Helobdella stagnalis</i>	PLECOPTERA	<i>Endochironomus albipennis</i>
MOLLUSCA	<i>Chloroperla sp.</i>	<i>Pseudochironomus prasinatus</i>
Bivalvia	TRICHOPTERA	<i>Stictochironomus crassiforceps</i>
<i>Euglesa suecica</i>	<i>Agraylea pallidula</i>	<i>Stenochironomus gibbus</i>
<i>Pisidium inflatum</i>	<i>Anabolia soror</i>	<i>Diamesa insignipes</i>
<i>Sphaerium nitidum</i>	<i>Molanna angustata</i>	<i>Cricotopus silvestris</i>
Gastropoda	<i>Leptocerus tineiformis</i>	<i>Orthocladius gr. saxicola</i>
<i>Anisus vortex</i>	<i>Chaetopterix villosa</i>	<i>Synorthocladius semivirens</i>
<i>Valvata ambigua</i>	<i>Cheumatopsyche lepida</i>	<i>Psectrocladius simulans</i>
<i>Valvata planorbulina</i>	<i>Cyrnus flavidus</i>	<i>Trissocladius potamophilus</i>
<i>Physa fontinalis</i>	<i>Hydropsyche angustipennis</i>	<i>Prodiamesa rufovittata</i>
<i>Viviparus contentes</i>	<i>Oligostomis reticulate</i>	<i>Ablabesmyia monilis</i>
<i>Borysthenia naticina</i>	<i>Mystacides longicornis</i>	<i>Procladius ferrugineus</i>
HYDRACARINA	<i>Neureclipsis bimaculata</i>	Rhagionidae
<i>Limnochares sp.</i>	DIPTERA	<i>Atherix sp.</i>
HETEROPTERA	Chironomidae	Simuliidae
<i>Sigara falleni</i>	<i>Paratanytarsus sp.</i>	<i>Simulium sp.</i>
<i>Notonecta glauca</i>	<i>Cryptochironomus defectus</i>	Ceratopogonidae
	<i>Demicryptochironomus vulneratus</i>	<i>Probezzia seminigra</i>

Таблица 6.6.2

Численность, биомасса и доля основных групп зообентоса в притоках Ладожского озера

Реки	Численность, экз/м ²	Биомасса, г/м ²	% от суммарной биомассы			
			олигохеты	хирономиды	моллюски	ручейники, поденки и веснянки
Морье	640	2,82	0,0%	0,2%	0,0%	89,6%
Авлога	2600	100,45	1,1%	93,7%	5,1%	0,0%
Бурная	1500	6,45	0,0%	0,0%	0,0%	100,0%
Вуокса	2160	9,00	0,9%	38,2%	33,3%	16,2%
Хиитолан	260	0,62	0,0%	19,4%	0,0%	48,4%
Ийоки	100	0,03	54,5%	45,5%	0,0%	0,0%
Тохмайоки	75	0,25	0,0%	99,1%	0,0%	0,0%
Янисйоки	100	0,06	0,0%	63,6%	0,0%	36,4%
Уксунйоки	225	0,30	0,8%	36,6%	25,2%	25,2%
Тулемайоки	200	0,16	0,0%	37,5%	0,0%	62,5%
Видлица	1680	3,62	22,1%	57,5%	16,6%	0,0%
Оять	290	0,99	0,0%	0,8%	84,8%	13,6%
Паша	800	2,08	14,4%	17,3%	28,8%	8,7%
Сясь	40	0,01	0,0%	50,0%	0,0%	0,0%
Волхов	340	0,96	2,0%	19,0%	72,5%	0,0%
Лава	180	0,05	0,0%	100,0%	0,0%	0,0%
Назия	2240	13,34	2,4%	11,6%	12,1%	3,6%

6.6.2. Бентос озера

Макрозообентос

В состав макрозообентоса (размером более 3 мм) входят и первичноводные (олигохеты, пиявки, моллюски, ракообразные и др.) и вторичноводные (личинки хирономид, поденки, ручейников и др.) организмы. Некоторые из них зарываются в грунт, другие обитают на его поверхности, а третьи — в придонном слое воды. Донная фауна участвует в круговороте веществ в водоеме, являясь промежуточным звеном в пищевых цепях. Беспозвоночные

макробентоса играют большую роль в обменных реакциях между донными отложениями и водой, переносят частицы седиментов, вентилируют более глубокие слои и способствуют минерализации грунтов. Обитая на дне водоемов, где часто складывается наиболее напряженная ситуация, организмы зообентоса являются хорошими индикаторами сложившихся здесь условий.

Первые сведения о донной фауне Ладожского озера относятся к 1819 г., когда Ламарк (Lamarck, 1819) опубликовал описание *Anodonta sulcata* Lam. из этого водоема. В работах Герда (1946), Иоффе (1948) и Стальмаковой (1968) подробно отражена история изучения бентоса вплоть до середины XX века. Многолетние исследования макробентоса, выполненные в Институте озероведения, охватывают 5 десятилетий. Изучению донного населения озера посвящено довольно большое количество статей, перечень которых содержится в работе Барбашовой и Слепухиной (2002).

Для характеристики макробентоса использованы результаты мониторинговых наблюдений 1994–2008 гг. Для их обобщения и анализа использовано районирование озера по морфометрическим признакам на 6 лимнических районов (Науменко, 1995).

Подробный список видов зообентоса опубликован в работах предыдущих исследователей. Герд (1946) приводит 403 вида и форм донных беспозвоночных. Стальмакова (1968) отмечает 385 видов донных организмов, причем 85% общего числа видов обитает в литоральной зоне озера.

По данным Института озероведения за период исследований с 1994 по 2008 г. в составе макробентоса открытых районов озера на глубинах от 4 до 230 м выявлено 118 таксонов донных беспозвоночных. Наиболее разнообразны по видовому составу *Chironomidae* (45 видов), *Oligochaeta* (37) и *Mollusca* (15 видов *Bivalvia* и 2 — *Gastropoda*). Зарегистрировано также 4 вида *Amphipoda*, 3 — *Hirudinea*, по 2 вида *Isopoda* и *Trichoptera*, по одному — *Hydridae*, *Mysidacea*, *Ephemeroptera*, *Coleoptera* и *Heleidae*. До вида не определялись *Turbellaria*, *Mermithidae* и *Hydracarina*: эти группы отмечались единично, и их количественное развитие незначительно.

Малощетинковые черви — самая распространенная группа животных. Они обитают в озере на всех глубинах и типах грунтов. Встречаемость олигохет составила 99%, хирономид — 87%, амфипод — 79%, моллюсков — 35%. Сравнивая наши материалы с базой данных за период 1976–1984 гг. (Меншуткин и др., 1987) можно отметить, что встречаемость основных групп и массовых видов макробентоса в целом не изменилась.

Среди олигохет обычны *Lamprodrilus isoporus* Svetlov, *Stylodrilus heringianus* Clap. и *Spirosperma ferox* Eisen. Хирономиды редко наблюдались на глубинах более 50 м. Наиболее

типичными представителями хирономид в центре озера являются *Trissocladius parataticus* (Tchern.) и *Paracladopelma camptolabis* (Kieffer).

Своеобразие фауне Ладожского озера придает наличие реликтовых ракообразных: *Monoporeia affinis* (Lindstrom), *Pallasiola quadrispinosa* (Sars), *Relictocanthus lacustris* (Sars), *Mysis oculata* var. *relicta* Loven и *Saduria entomon* (L.) (рис. 6.6.2). В литорали озера массовым видом амфипод является байкальский вселенец *Gmelinoides fasciatus* Stebb. (рис. 7.5.2), который проник в озеро в конце 80-х гг. прошлого столетия (Panov, 1996).

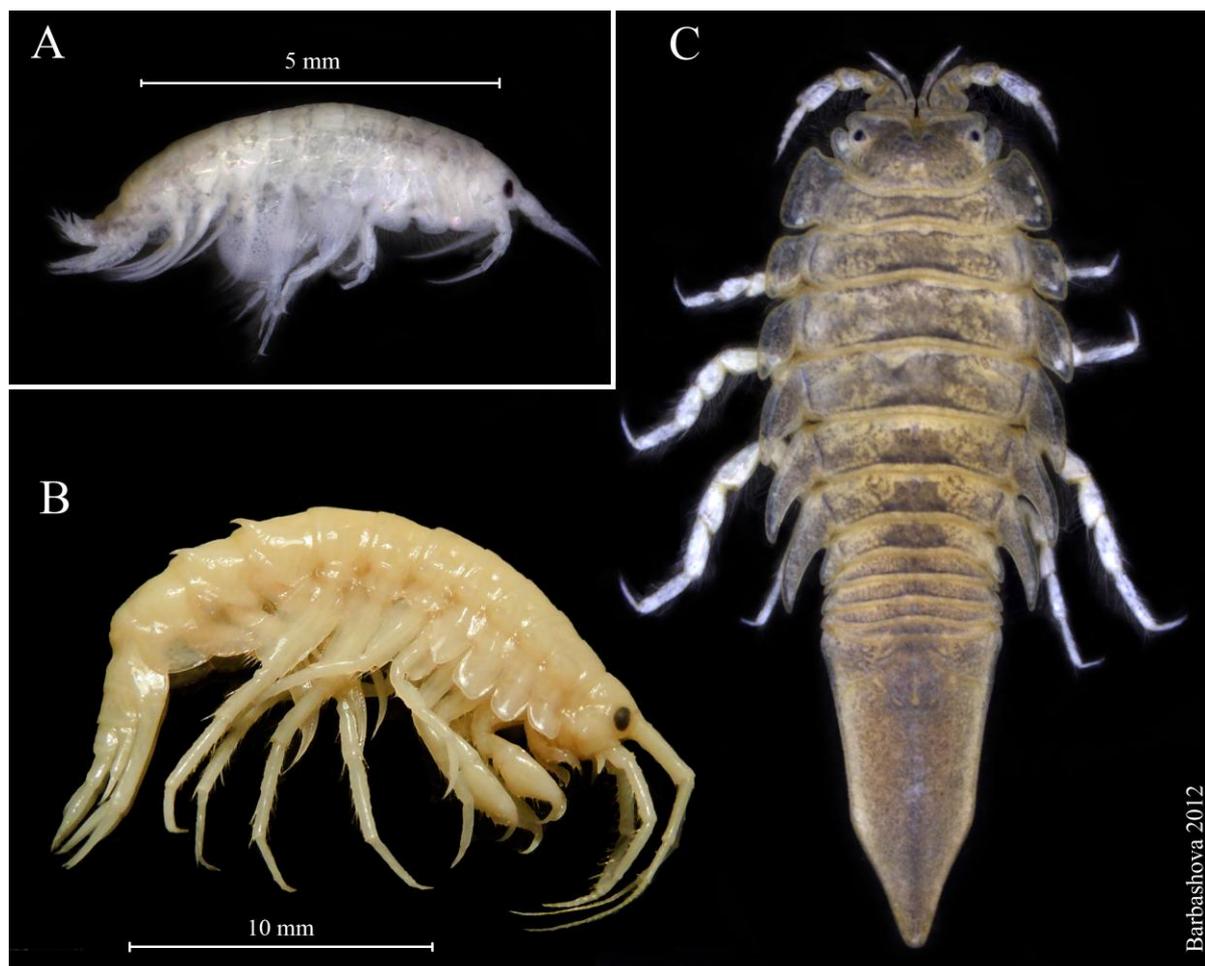


Рис. 6.6.2. Реликтовые ракообразные Ладожского озера (А — *Monoporeia affinis*; В — *Pallasiola quadrispinosa*; С — *Saduria entomon*).

Моллюски обитают в основном на глубинах 0–18 м. *Bivalvia* представлены мелкими видами семейства *Pisidiidae* (роды *Pisidium*, *Neopisidium*) и семейства *Euglesidae* (р. *Euglesa*). Среди *Gastropoda* обычны затворки р. *Valvata*. На глубинах более 50 м изредка попадаются двустворчатые моллюски *Conventus conventus* (Clessin).

В мелководных южных бухтах, вдоль западного и восточного побережий эпизодически встречаются турбеллярии, мермитиды, гидры, пиявки, гидрокарины, изопода *Asellus aquaticus* L., личинки поденок, ручейников и хелеид. На глубинах более 50 м кроме основных групп макробентоса (олигохет, хирономид и амфипод) иногда отмечаются мермитиды и изопода *Saduria entomon* (L.).

Известно, что небольшой возраст (8–9 тыс. лет) больших северных ледниковых озер не позволил сформироваться в них специфическому глубоководному комплексу видов (Стальмакова, 1968). В озере отсутствуют эндемичные виды и исторически сложившиеся фаунистические различия между зонами литорали и профундали.

Число таксонов сокращается по мере увеличения глубины. Для открытых районов озера характерен бедный видовой состав донной фауны, особенно ниже изобаты 50 м, где обитает только 25 видов. Минимальное количество видов (11) обнаружено в глубоководном районе, максимальное (106) — в мелководном районе. Наибольшее видовое разнообразие отмечалось в Волховской губе (индекс Шеннона $3,13 \pm 0,09$ бит экз.⁻¹) и бухте Петрокрепость ($2,9 \pm 0,12$ бит экз.⁻¹).

Отдельные лимнические районы отличаются как по абсолютным значениям количественных показателей, так и по соотношению основных групп макробентоса. Основными факторами, определяющими качественный состав и уровень развития донных животных, являются структура донных отложений и глубина, с которой связаны температурный режим, освещенность, гидрохимический режим и количество поступающей из верхних слоев водоема органики.

Несмотря на то, что с увеличением глубины происходит постепенное уменьшение значений численности и биомассы макробентоса, в районе впадин (грунт — серый ил) эти величины выше ($40\text{--}1656$ экз. м⁻²; $0,04\text{--}3,76$ г м⁻²), чем в глубоководном районе (илистые грунты, $0\text{--}600$ экз. м⁻²; $0\text{--}1,97$ г м⁻²). В районе впадин наблюдается тенденция увеличения численности и биомассы бентоса, а также изменение структуры донных сообществ. На станциях с максимальными глубинами (до 230 м) раньше встречались только олигохеты (100%), виды олигосапробного и β-мезосапробного комплексов *L. isoporus*, *S. heringianus*, *S. ferox*. В 1990-е гг. возрастает роль α-мезосапробных видов олигохет *Limnodrilus* sp. и *Potamothrix hammoniensis* (Mich.), типичных представителей эвтрофных водоемов и загрязненных биотопов. Произошла замена видов олигосапробного комплекса видами мезосапробными. В настоящее время α-мезосапробные олигохеты составляют уже от 50 до 80% количественных показателей. С 1998 г. в донных биоценозах кроме олигохет появляются другие группы животных — хирономиды и амфиподы (единично отмечалась изопода *S. entomon*), хотя олигохеты по-прежнему преобладают и составляют в среднем 93%

численности и 95% биомассы (рис. 6.6.3). Возможно, что изменение структуры макробентоса во впадинах, а также увеличение уровня развития донных сообществ свидетельствуют о постепенном накоплении здесь органического вещества в грунтах.

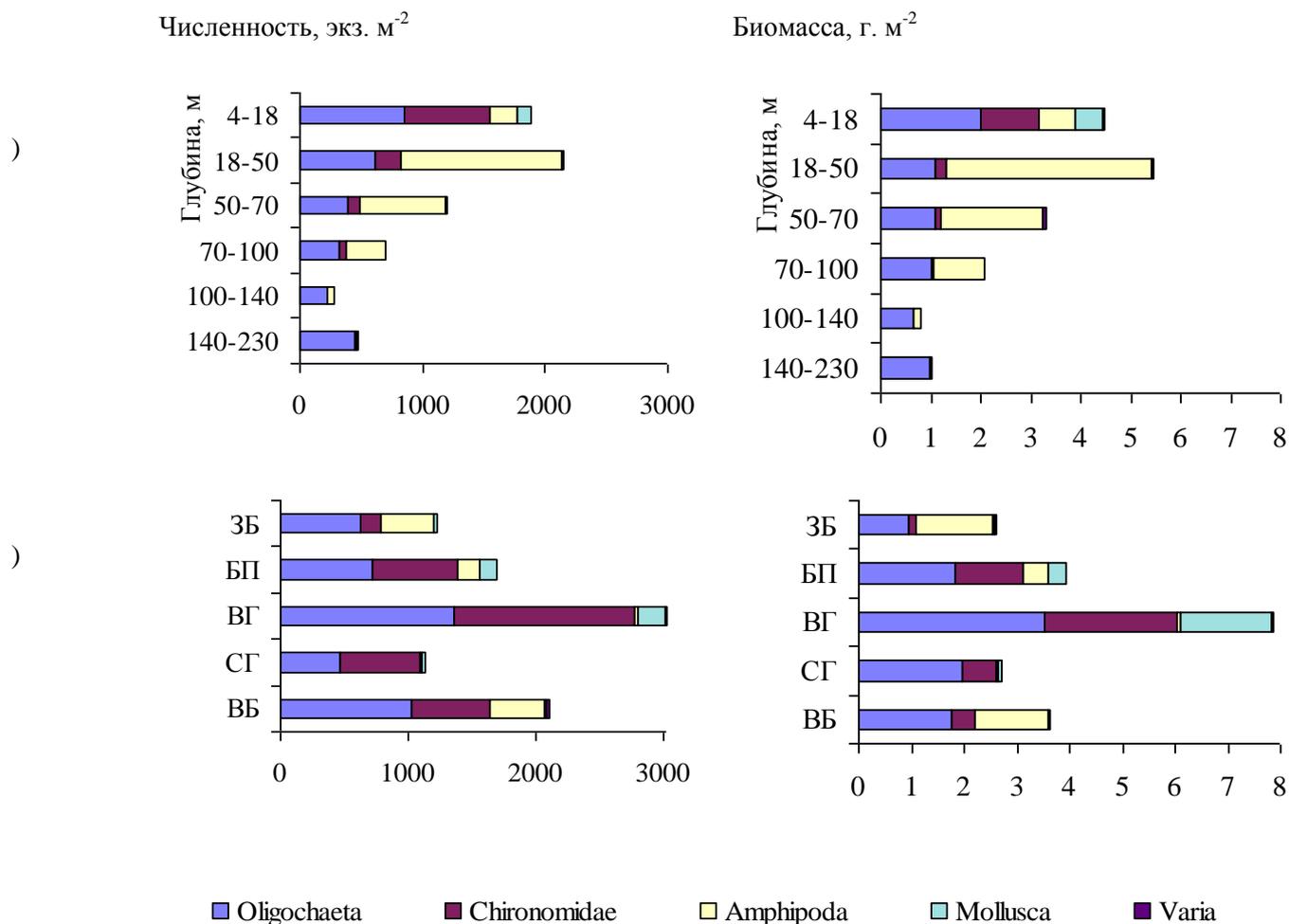


Рис. 6.6.3. Распределение численности (N), биомассы (B) макробентоса и его основных групп (усредненные данные за 1994–2008 гг.): а) по глубинам; б) участкам мелководного района (ЗБ — западный берег, БП — бухта Петрокрепость, ВГ — Волховская губа, СГ — Свирская губа, ВБ — восточной берег).

В склоновом районе (серые и коричневые илы) пределы изменения численности составили 40–2180 экз. м⁻², биомассы — 0,04–8,78 г м⁻². В районе озерного уступа (глинисто-алевритовые осадки) численность варьировала от 140 до 6140 экз. м⁻², а биомасса от 0,36 до 15,06 г м⁻². Если на глубинах более 100 м преобладают олигохеты, то с уменьшением глубин

возрастает роль амфипод. Так, в склоновом районе эта группа уже составляет 46% численности и 49% биомассы макробентоса, а в районе озерного уступа — 59 и 62% соответственно. *M. affinis* — единственный вид амфипод, который обитает в настоящее время ниже изобаты 60 м.

В районах глубоководном, склоновом и озерного уступа сообщества макробентоса состоят из ограниченного числа видов беспозвоночных, характерных для олиготрофных и слабо мезотрофных условий обитания. Здесь практически отсутствуют виды α -мезосапробного комплекса (редко и единично встречается *Limnodrilus* sp.). Видовой состав донных биоценозов, их доминирующий комплекс и соотношение основных групп остаются достаточно стабильными на протяжении длительного периода времени. Низкая изменчивость глубоководных биоценозов сохраняется благодаря большому объему водной массы и инерции всех лимнологических процессов. Однако можно отметить устойчивый рост количественных показателей макробентоса по сравнению с 60-ми гг. XX столетия.

В переходном районе (алевриты, алевритовые пески) наблюдается наиболее высокий уровень количественных показателей макробентоса (пределы колебания: 220–11440 экз. м⁻², 0,2–31,38 г м⁻²), что связано с массовым развитием в этой зоне реликтовых амфипод (прежде всего *M. affinis*). Амфиподы составляют 61% численности и 75% биомассы донных беспозвоночных. Максимальное скопление *Monoporeia* (6400 экз. м⁻², 28,56 г м⁻²) отмечено на глубине 29 м в 2000 г.

Бокоплав *P. quadrispinosa* встречается значительно реже *Monoporeia*, но его вклад в биомассу бывает довольно высок. Так, в 2000 г. в юго-восточной части озера на глубине 33 м биомасса этого рачка достигала 12,8 г м⁻² при численности 120 экз. м⁻². *Pallasiola* предпочитает глубины 18–50 м (численность 41 ± 9 экз. м⁻² и биомасса $2,19 \pm 1,07$ г м⁻²). Еще один представитель ледникового комплекса, *R. lacustris*, наблюдается крайне редко. В последний раз он регистрировался в 2000 г. на глубине 47 м в северо-восточной части озера. В 2000-е гг. у восточного и западного открытых берегов все чаще на глубинах 20–50 м отмечается ледниковый реликт — изопода *S. entomon*, средняя численность которого составила 20 экз. м⁻², а биомасса — 0,83 г м⁻².

Мелководный район характеризуется нестабильными природными условиями (разнообразие грунтов, сезонный и суточный ход изменений температуры воды, повышенная динамика вод, колебания физико-химических параметров), а отдельные участки озера также отличаются по интенсивности антропогенного воздействия, что обуславливает неоднородность распределения донных биоценозов. В этом районе увеличивается доля хирономид (в среднем 37% численности, 26% биомассы). Вдоль открытого западного и восточного побережья значительна роль амфипод (27 и 47% соответственно). Численность макробентоса изменяется в достаточно широком диапазоне от 20 до 10060 экз. м⁻², биомасса от 0,01 до 28 г м⁻².

В прибрежье озера на глубинах до 15 м обитает байкальский вселенец *G. fasciatus*. В открытых районах озера (глубины 4–15 м) его количественные характеристики невелики (160 ± 54 экз. м^{-2} , $0,25 \pm 0,07$ г м^{-2}) в отличие от литорали озера, где в зарослях макрофитов биомасса *Gmelinoides* может достигать 50,75 г м^{-2} .

Уровень развития макробентоса в бухте Петрокрепость невысок: численность беспозвоночных варьировала от 180 до 5180 экз. м^{-2} , а биомасса — от 0,22 до 19,8 г м^{-2} , — и соответствует продуктивности бентоса в олиготрофных и слабо мезотрофных водоемах. Доминирующим видом олигохет является *Lamprodrilus isoporus*. Из хирономид наиболее многочисленны виды чистых вод — *Pseudodiamesa bathyphila* Kieff, *Heterotrissocladius grimschawi* Edw., *Polypedilum scalaenum* Schr., *Cladotanytarsus mancus* Walk, *Micropsectra praecox* (Miegen).

Макробентос Волховской губы отличается от донных сообществ других участков прибрежной зоны озера высоким уровнем количественного развития. В южную бухту впадают две крупные реки: Волхов и Сясь, что определяет природные особенности и значительную антропогенную нагрузку этого участка озера. Численность бентоса изменяется от 560 до 10060 экз. м^{-2} , биомасса — от 0,98 до 28,00 г. м^{-2} . Из олигохет наиболее обильны *Tubifex newaensis* (Mich) и *Limnodrilus hoffmeisteri* Clap; из хирономид — виды *Chironomus*, *Procladius* и *Microtendipes pedellus* (De Geer). Амфиподы отмечаются единично. Согласно существующим в настоящее время классификационным шкалам (Китаев, 1984) и особенностям таксономической структуры, сообщество макробентоса губы в целом характерно для типично мезотрофных вод.

Таким образом, изменения структуры и количественного развития макробентоса (увеличение количественных показателей), особенно в самых глубоководных районах озера, свидетельствуют о повышении трофического статуса донных биотопов. Сообщества бентоса в открытых районах озера: глубоководном, склоновом и озерного уступа, — характеризуются стабильностью. Продукционные показатели развития зообентоса низки в северных глубоководных участках Ладожского озера и на порядок выше в южных, в частности в Волховской губе. В целом, видовой состав с середины XX в. не претерпел существенных изменений, за исключением роста доли α -мезосапробных видов олигохет в профундали озера, особенно во впадинах, а также инвазии и развития байкальской амфиподы *G. fasciatus* в литорали озера.

Мейзообентос

Мейобентос является существенным компонентом бентосных биоценозов Ладожского озера. Это небольшие подвижные животные, которые обитают (в огромных количествах) на

поверхности грунта и в донных отложениях (некоторые поднимаются и в придонный слой воды) всех водоемов и часто играют ключевую роль в этих экосистемах (Giere, 1993).

По происхождению состав любого мейобентического сообщества не однороден. Можно выделить следующие группы организмов:

1) постоянные компоненты мейобентоса (нематоды, остракоды, гарпактициды, донные циклопы, тардиграды и др.), весь жизненный цикл которых протекает в размерно-весовых границах мейобентоса;

2) младшие возрастные стадии организмов макробентоса (олигохеты, хирономиды, моллюски и др.), которые находятся в размерно-весовых границах мейобентоса на ранних стадиях жизненного цикла;

3) донные стадии видов, основным местом обитания которых может считаться пелагиаль водоема (например, копепоидитные стадии планктонных циклопов), входящие в состав мейобентоса на определенном этапе жизненного цикла.

В связи с этим целесообразно подразделять всю совокупность мейобентических животных на «эвмейобентос» и «псевдомейобентос». Термины были предложены Численко (1961) для выделения постоянных и временных компонентов в составе морского мейобентоса. При этом в эвмейобентос включаются все организмы, которые во все время своего пребывания в донном биотопе остаются в размерно-весовых границах мейобентоса. При такой трактовке копепоидитные стадии планктонных циклопов также будут относиться к эвмейобентосу. В псевдомейобентос включаются младшие возрастные стадии организмов макробентоса.

В мейобентосе Ладоги встречаются животные следующих систематических групп: *Nematoda*, *Oligochaeta*, *Turbellaria*, *Tardigrada*, *Bivalvia*, *Gastropoda*, *Rotatoria*, *Gastrotricha* (классы), *Ostracoda* (подкласс), *Cladocera*, *Cyclopoida*, *Harpacticoida*, *Acari*, *Ephemeroptera*, *Plecoptera* (отряды), *Chironomidae*, *Ceratopogonidae* (семейства). Из этих групп массовыми и наиболее часто встречающимися являются *Nematoda*, *Cyclopoida*, *Harpacticoida*, *Oligochaeta*, *Ostracoda*, *Cladocera*, *Chironomidae*. Всего выявлено 324 видов и форм беспозвоночных, из которых 13 относится к *Nematoda*, 2 — к *Turbellaria*, 52 — к *Acari*, 51 — к *Oligochaeta*, 8 — к *Tardigrada*, 35 — к *Cyclopoida*, 15 — к *Harpacticoida*, 30 — к *Ostracoda*, 50 — к *Cladocera*, 68 — к *Chironomidae*. Реальное число видов мейобентоса озера, конечно же, значительно больше, так как некоторые группы донной мейофауны очень слабо изучены в фаунистическом отношении (например, нематоды, турбеллярии) или не изучены (например, коловратки, гастротрихии).

Развитие мейобентоса в открытых районах Ладожского озера можно условно разбить на 3 периода: период естественного и близкого к естественному состоянию мейобентоса (примерно до середины 90-х гг. XX в.; период дестабилизации озерной экосистемы (до 2007 г.) и пост-

мезотрофный период (настоящее время). Особенности состава и структуры сообщества описаны ниже, в Разделе 7.4, в связи с обсуждением оценки состояния озера по биологическим показателям. В этом же Разделе дано описание особенностей количественного развития мейобентоса в озере.

На уровень количественного развития донной мейофауны оказывают влияние различные факторы, в том числе глубина биотопа и биотические взаимодействия, прежде всего с организмами макробентоса. Для оценки достоверности влияния этих факторов на мейобентос Ладоги использовались материалы двух бентических съемок Ладожского озера (1983 и 1986 гг.), в которых пробы мейо- и макробентоса отбирались синхронно, т. е. в одном месте и в одно время, что особенно важно при рассмотрении соотношения этих двух размерных группировок бентоса. Этими съемками были охвачены все диапазоны глубин озера и типы грунтов (за исключением каменистых).

При помощи дисперсионного анализа была произведена оценка достоверности влияния на количественные показатели мейо- и макробентоса факторов глубины и биомассы макробентоса (влияние только на мейобентос) (табл. 6.6.3). Оказалось, что это влияние высокослабозначимо ($P < 0,0001$). Наиболее интересен анализ биомасс мейо- и макробентоса, так как численность животных мейобентоса во всех биотопах существенно превышала численность макробентоса, и их сравнение не столь показательно, хотя изменение численности мейобентических животных, сильно связанное как с фактором глубины, так и с биомассой макробентоса, достоверно (табл. 6.6.3).

В период естественного состояния мейобентоса доля мейобентоса в биомассе бентоса в четырех выделенных естественных лимнических зонах Ладоги (Современное состояние..., 1987) была не одинакова (табл. 6.6.4). Средние биомассы как мейобентоса, так и макробентоса снижались от прибрежной к ультрапрофундальной зоне с $2,32 \text{ г м}^{-2}$ и $4,40 \text{ г м}^{-2}$ до $0,15 \text{ г м}^{-2}$ и $0,62 \text{ г м}^{-2}$. Снижались и соотношения биомасс мейо- и макробентоса со 156% в прибрежной зоне до 19,7% в ультрапрофундальной, а также относительная значимость мейобентоса в общей биомассе бентоса с 47,8% в прибрежной зоне до 15,3% в ультрапрофундальной. Примечательно, что сравнение только средних показателей биомасс не дает объективной картины значения мейобентоса в выделенных зонах. Так, например, доля биомассы мейобентоса в общей биомассе бентоса в прибрежной зоне, рассчитанная по средним показателям биомассы, равнялась 34,5%. В действительности эта величина, рассчитанная по значениям относительной значимости в каждом конкретном биотопе, равнялась 47,8%. Причиной этого является неравномерность распределения и неоднозначность взаимосвязи биомасс мейо- и макробентоса, о чем свидетельствуют коэффициенты вариации приведенных величин. Менее всего варьировала биомасса мейобентоса в профундальной зоне ($V = 0,62$), а

макробентоса — в профундальной и ультрапрофундальной ($V = 0,73-0,75$). Наиболее постоянно отношение $V_{ме}/V_{ма}$ в профундальной зоне ($V = 0,72$), а наиболее вариабельно в деклинальной ($V = 1,35$). Наиболее постоянной ($V = 0,48$) и высокой (47,8%) была доля мейобентоса в общей биомассе бентоса в прибрежной зоне, а наиболее вариабельной ($V = 0,83$) — в деклинальной.

Таблица 6.6.3

Оценка достоверности влияния на численность мейобентоса ($N_{ме}$), биомассу мейобентоса ($V_{ме}$), макробентоса ($V_{ма}$) и их соотношения факторов глубины и уровня развития макробентоса по результатам однофакторного дисперсионного анализа в Ладожском озере

Показатель	Факторы							
	Глубина				Биомасса макробентоса			
	$F_{фак}$	$F_{ст}$	P	H, %	$F_{фак}$	$F_{ст}$	P	H, %
$N_{ме}$	18,07	4,0	< 0,0001	35,4	10,34	3,3	< 0,0001	34,8
$V_{ме}$	12,93	4,0	< 0,0001	28,2	9,02	3,3	< 0,0001	31,7
$V_{ма}$	8,17	4,0	< 0,0001	19,8	—	—	—	—
$V_{ме}/V_{ма}$	9,37	4,0	< 0,0001	22,1	8,66	3,3	< 0,0001	30,9
$V_{ме}/(V_{ме} + V_{ма})$	10,57	4,0	< 0,0001	24,3	6,93	3,3	< 0,0001	26,3

Примечание: $F_{фак}$ — фактическое значение критерия Фишера; $F_{ст}$ — критическое значение критерия Фишера при $P = 0,01$; P — уровень значимости; H — сила влияния фактора.

Таким образом, деклинальная зона характеризуется наиболее высокой вариабельностью по обсуждаемым показателям, что, возможно, объясняется наибольшим разнообразием донных биотопов в ней: от чистых и различной степени заиленных песков до илов, — в то время как в прибрежной зоне преобладают различные песчаные биотопы, а в двух других глубоководных зонах донные отложения представлены илами.

Начиная с 1990-х гг. в озере не проводилось специальных крупномасштабных съемок мейобентоса, поэтому в описании количественных показателей мейобентоса в озере использовались данные, полученные на точках стандартного разреза через все озеро, которые выбраны в типичных местообитаниях и фактически характеризуют собой все зоны озера.

Таблица 6.6.4

Средние значения биомассы мейо- ($B_{ме}$) и макробентоса ($B_{ма}$), их соотношения, относительная значимость мейобентоса в общей биомассе зообентоса ($B_{ма}+B_{ме}$) и их коэффициенты вариации (V) в различных зонах Ладожского озера (по данным 1983–86 гг.)

Зоны (глубины)	$B_{ме}, \text{г м}^{-2}/V$	$B_{ма}, \text{г м}^{-2}/V$	$B_{ме}/B_{ма}, \%/V$	$B_{ме}/(B_{ма}+B_{ме}), \%/V$
Прибрежная (до 15 м)	$2,32 \pm 0,46 /1,11$	$4,40 \pm 1,29 /1,17$	$156,0 \pm 45,3 /1,13$	$47,8 \pm 5,9/0,48$
Деклиналичная (15–52)	$1,07 \pm 0,14 /0,84$	$7,12 \pm 1,42 /1,13$	$50,5 \pm 11,4/1,35$	$25,1 \pm 3,5/0,83$
Профундальная (52–89)	$0,33 \pm 0,04 /0,62$	$1,55 \pm 0,21 /0,75$	$43,0 \pm 9,1/1,22$	$24,5 \pm 2,9/0,68$
Ультрапрофундальная (более 89)	$0,15 \pm 0,03/0,80$	$0,62 \pm 0,11 /0,73$	$19,7 \pm 3,5/0,72$	$15,3 \pm 2,4/0,63$

В период дестабилизации озерной экосистемы одновременно с изменением структуры мейобентоса (см. Раздел 7.4.) наблюдались и существенные изменения в его количественных характеристиках развития, что не могло не сказаться на показателях соотношения с макробентосом (табл. 6.6.5). Из приведенной в качестве примера количественного развития мейобентоса в эти годы табл. 6.6.5 видно, что биомасса мейобентоса (в основном за счет диапаузирующих копеподитов планктонных циклопов) на всех станциях (во всех зонах озера) была очень высокой, существенно выше, чем в предыдущий период, сопоставима везде с биомассой макробентоса, а иногда значительно выше. Особенно резко изменились соотношения биомасс мейо- и макробентоса в глубоких зонах озера, где биомасса мейобентоса всегда была ниже таковой макробентоса. Показатели численности мейобентоса в этот период были крайне высоки (табл. 6.6.5) и сопоставимы, например, с численностью мейобентоса на аналогичных глубинах в верхнем озере Констанц (Курашов, 2004), экосистема которого была трансформирована в результате интенсивного антропогенного эвтрофирования.

Увеличение скоростей трансформации вещества и энергии в донных биотопах Ладоги в этот период все же было не таким значительным, как увеличение показателей численности и биомассы мейобентоса, поскольку интенсивность обменных процессов у диапаузирующих циклопов (за счет которых в основном и наблюдалось увеличение количественных показателей мейобентоса) в несколько раз ниже, чем у недиапаузирующих особей.

Таблица 6.6.5

Значения численности (тыс. экз./м²) и биомассы (мг/м²) мейо- ($N_{ме}, B_{ме}$) и макробентоса ($N_{ма}, B_{ма}$), их соотношения (%), и относительная значимость мейобентоса в общей численности и биомассе зообентоса (%) на различных станциях в Ладожском озере (август 2003 г.)

Станции/ глубина,м	$N_{ме}$,	$B_{ме}$,	$N_{ма}$,	$B_{ма}$,	$N_{ме} /$ $N_{ма}$,	$N_{ме} /$ ($N_{ме} + N_{ма}$)	$B_{ме} / B_{ма}$	$B_{ме} /$ ($B_{ме} + B_{ма}$)
ст. 1/6м	146,4	5300	5,86	12160	2498,3	96,2	43,6	30,4
т. G/6,5м	56,4	4040	3,3	9660	1709,1	94,5	41,8	29,5
ст. 8/10м	87,6	2840	0,84	1280	10428,6	99,1	221,9	68,9
ст. 4/13м	278,8	6040	1,84	1700	15152,2	99,3	355,3	78,0
ст. 25/35м	103,8	1420	1,76	2820	5897,7	98,3	50,4	33,5
ст. 82/67м	128,5	2630	0,7	2730	18357,1	99,5	96,3	49,1
ст. 55/68м	424,0	5560	0,28	1210	151428,6	99,9	459,5	82,1
ст. 105/210м	56,8	2880	0,66	1260	8606,1	98,9	228,6	69,6

Таблица 6.6.6

Значения численности (тыс.экз./м²) и биомассы (мг/м²) мейо- ($N_{ме}$, $B_{ме}$) и макробентоса ($N_{ма}$, $B_{ма}$), их соотношения (%), и относительная значимость мейобентоса в общей численности и биомассе зообентоса (%) на различных станциях в Ладожском озере (август 2009 г.)

Станции/ глубина,м	$N_{ме}$,	$B_{ме}$,	$N_{ма}$,	$B_{ма}$,	$N_{ме} /$ $N_{ма}$,	$N_{ме} /$ ($N_{ме} + N_{ма}$)	$B_{ме} / B_{ма}$	$B_{ме} /$ ($B_{ме} + B_{ма}$)
ст. 1/6м	21,7	350	1	1520	2170,0	95,6	23,0	18,7
ст. C/6,5м	85,2	2650	0,24	510	35500,0	99,7	519,6	83,9
ст. E/7м	88,4	3590	2,82	4420	3134,8	96,9	81,2	44,8
ст. 17/8м	19,1	80	0,84	880	2273,8	95,8	9,1	8,3
ст. 8/10м	44,3	1150	0,6	600	7383,3	98,7	191,7	65,7
ст. 4/13м	51,1	4180	1,32	1900	3871,2	97,5	220,0	68,8
ст. 76'/18м	6,3	160	0,4	1640	1575,0	94,0	9,8	8,9

ст. 25/35м	19	190	2,26	6040	840,7	89,4	3,1	3,0
ст. P1/41м	4,8	55	4,12	7180	116,5	53,8	0,8	0,8
ст. 82/67м	8,4	540	0,34	840	2470,6	96,1	64,3	39,1
ст. 55/68м	24,8	360	1,3	3340	1907,7	95,0	10,8	9,7
ст. 96/84м	2,4	280	3	5480	80,0	44,4	5,1	4,9
ст. 94/101м	3,2	50	2,14	5820	149,5	59,9	0,9	0,9
ст. 106/170м	2,4	160	0,84	1010	285,7	74,1	15,8	13,7

В табл. 6.6.7 представлены производственные показатели мейобентоса на ст. 55, являющейся маркерной для центральной части Ладоги. Видно, что если суммарная биомасса сообщества мейобентоса в период дестабилизации озерных процессов (2003 г.) увеличилась примерно в 7 раз по сравнению с предыдущим периодом (1986 г.), то дыхание сообщества возросло примерно в 6 раз, а продукция только в 2 раза. Для этого же периода были характерны наименьшие показатели удельной продукции сообщества и показатели P/R и K₂. В настоящее время (начиная с 2009 г.) производственные показатели на ст. 55 близки к тем, что наблюдались здесь в первый период развития мейобентоса.

Начиная с 2007 г. в озере наблюдалось сокращение или практически полное исчезновение в биотопах открытой Ладоги скоплений диапаузирующих циклопов, что означало возвращение планктонных циклопов к типу развития без длительной диапаузы в придонных слоях, т. е. исчезла их реакция на ухудшение озерной среды. Это, возможно, является убедительным свидетельством о переходе озера в более благоприятное экологическое состояние, его стабилизацию в протекании озерных процессов (см. Раздел 7.4). Изменение структуры мейобентоса привело и к снижению показателей мейобентоса и возвращению соотношений с макробентосом (табл. 6.6.6) к значениям, близким к наблюдавшимся до середины 90-х гг. XX в. Если в период дестабилизации озера после его сильного эвтрофирования на долю мейобентоса во всех биотопах приходилось свыше 95% суммарной численности и не менее 30% суммарной биомассы донных организмов бентоса, то в настоящее время (постмезотрофный период) эти показатели варьирует в более широких пределах (табл. 6.6.6). Особенно характерно снижение соотношений биомасс мейо- и макробентоса.

Таблица 6.6.7

Показатели биомассы (В, Дж м⁻²), дыхания (R, Дж м⁻²сут⁻¹), продукции (P, Дж м⁻²сут⁻¹), удельной продукции (С, сут⁻¹), соотношения P/R и коэффициента К₂ сообщества мейобентоса на ст. 55 в разные годы

Группы	Годы	В	R	P	С	P/R	К ₂
Nematoda	1986	670	16,4	5,5	0,008	0,333	0,25
	2003	576	15,5	5,2	0,009	0,335	0,25
	2009	666	13,5	4,5	0,007	0,333	0,25
Haracticoida	1986	146	7,1	4,0	0,028	0,562	0,36
	2003	185	8,7	4,9	0,026	0,563	0,36
	2009	13	0,6	0,3	0,026	0,567	0,36
Oligochaeta	1986	124	5,3	1,8	0,014	0,333	0,25
	2003	1856	56,1	18,7	0,010	0,333	0,25
	2009	245	7,6	2,6	0,011	0,342	0,25
Ostracoda	1986	333	1,3	0,8	0,003	0,621	0,38
	2003	328	2,0	1,2	0,004	0,600	0,38
	2009	-	-	-	-	-	-
Cyclopoida	1986	396	31,2	7,8	0,020	0,250	0,20
	2003	11820	356,8	8,6	0,001	0,024	0,02
	2009	49	1,1	0,0	0,000	0,000	0,00
Cladocera	1986	18	1,4	0,3	0,017	0,218	0,18
	2003	—	—	—	—	—	—
	2009	—	—	—	—	—	—
Chironomidae	1986	—	—	—	—	—	—
	2003	283	9,3	7,6	0,027	0,817	0,45
	2009	—	—	—	—	—	—
Varia	1986	463	9,2	3,2	0,007	0,351	0,26
	2003	123	6,3	3,4	0,028	0,540	0,35
	2009	567	23,9	12,8	0,023	0,536	0,35
Весь мейобентос	1986	2150	72,1	23,4	0,011	0,325	0,25
	2003	15171	454,7	49,6	0,003	0,109	0,10

	2009	1540	46,7	20,2	0,013	0,433	0,30
--	------	------	------	------	-------	-------	------

На основе изложенного материала можно сделать вывод, что в озере в настоящее время происходит снижение абсолютных показателей участия мейобентоса в процессах трансформации вещества и энергии. В результате эффективность функционирования сообщества восстановилась до уровня, характерного для естественного периода состояния донной мейофауны в озере.

6.7. Виды-вселенцы в экосистеме озера

С проблемой сохранения биологического разнообразия неразрывно связана одна из наиболее актуальных и острых проблем современности, а именно проблема видов-вселенцев.

Инвазии чужеродных видов в водоемы бассейна Финского залива Балтийского моря становятся все более интенсивными (Leppäkoski et al. 2002; 2007; Panov et al., 2003; Orlova et al., 2006). В связи с этим изучение закономерностей биологических инвазий в водных экосистемах бассейна Финского залива, включая процессы проникновения чужеродных видов в экосистемы, создания устойчивых популяций этих видов и их воздействия на местные виды и сообщества, следует рассматривать как одно из приоритетных направлений исследований водных экосистем региона.

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 27 чужеродных видов, известных для восточной части Финского залива и эстуария Невы (Orlova et al., 2006; Berezina et al., 2007), многие из которых могли бы теоретически проникнуть в Ладожское озеро, в период до 2006 г в озере было отмечено обнаружение только одного вида, а именно китайского мохнаторукого краба *Eriocheir sinensis* H. Milne-Edwards, 1853 (Panov, 2006). Однако, натурализация его в водоеме не зафиксирована. Из этого списка мы не учитываем байкальскую амфиподу *Gmelinoides fasciatus* (Stebbing, 1899), которая проникла в 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 в. (акклиматизировался в них для повышения кормовой базы рыб) занял доминирующее положение в большинстве литоральных биоценозов (Panov, Berezina, 2002; Курашов и др., 2006).

Экосистема Ладожского озера в последние десятилетия была в значительной мере трансформирована, в том числе и в результате воздействий видов-вселенцев, из которых к настоящему времени наибольшее значение по экологической роли имеет байкальская амфипода *Gmelinoides fasciatus* (Stebb.). После вселения байкальского вида кардинальным образом изменилась структура сообществ бентоса литорали, в которых в настоящее время доминирует *G. fasciatus*. Произошла необратимая трансформация исходных биоценозов литорали Ладоги.

Установлено, что в Ладожском озере вид обладает ярко выраженной эврифагией и способен потреблять широкий спектр растительной и животной пищи (Барков, Курашов, 2011а, б). В результате анализа содержимого кишечника особей *G. fasciatus* выявлено, что спектр питания бокоплава представлен многими растительными и животными организмами литорали, однако значение их в питании неодинаково (Барков, Курашов, 2011а).

Из растений на первом месте по потреблению и частоте встречаемости в кишечниках стоят *Ulothrix zonata* (Web. et Mohr) и *Fontinalis antipyretica* L. Из животных в кишечниках бокоплавов во всех типах литорали чаще всего встречаются личинки хирономид. Второе место по уровню встречаемости занимают олигохеты.

Для определения количественных показателей питания *G. fasciatus* был проведен ряд экспериментов по определению суточных рационов при потреблении различных видов растительной и животной пищи. Данные экспериментов во многом совпали с результатами, полученными на основе анализа содержимого кишечника бокоплава.

При питании растительной пищей наибольшее ее суточное потребление наблюдается при питании *U. zonata* (до 12% массы тела) и *F. antipyretica* (до 11% массы тела). Потребление другого растительного корма (*Sphaeronostoc coeruleum* (Lyngb.), *Elodea canadensis* Michx., *Lemna trisulca* L., *Nuphar luteum* (L.), *Phragmites australis* (Cav.)) значительно ниже (1,4–5,2% массы тела). При питании животными организмами наибольшим суточным потреблением характеризуются олигохеты (до 53% массы тела хищника), ветвистоусые (до 44% массы тела хищника) и хирономиды (до 39% массы тела хищника).

Долговременные наблюдения за питанием бокоплава *G. fasciatus* показывают, что для нормального размножения, роста и развития *G. fasciatus* необходимо смешанное питание, присутствие в рационе как животной, так и растительной пищи.

Проведенные экспериментальные работы по росту, питанию, потреблению кислорода и полевые наблюдения на модельном участке в губе Петрокрепость Ладожского озера позволяют рассчитать поток энергии через популяцию *G. fasciatus* в этом литоральном местообитании (табл. 6.7.1).

На основании полученных данных можно сделать вывод, что популяция *G. fasciatus* в Ладожском озере достаточно эффективно использует поступающую энергию, что

свидетельствует, с одной стороны, о благоприятных условиях для жизни этой популяции, а с другой — о довольно полной утилизации энергии, поступающей с предыдущего трофического уровня. Возможно, с вселением *G. fasciatus* в Ладожское озеро возросла эффективность функционирования литоральных биоценозов или, согласно терминологии А.Ф. Алимова и Н.П. Финогеновой (1975), увеличился «коэффициент полезного действия» экосистемы в целом.

Поскольку *G. fasciatus* является типичным эврифагом, то в связи с этим представляет интерес оценить, какая часть рациона популяции *G. fasciatus* может быть удовлетворена за счет продукции организмов макрозообентоса. В табл. 6.7.2 представлены значения рационов *G. fasciatus*, а также суточная продукция сообщества макрозообентоса (без *G. fasciatus*) по типам биотопов. Данные из табл. 6.7.2 демонстрируют тот факт, что пищевые потребности амфиподы-вселенца в литорали Ладожского озера не могут быть удовлетворены за счет хищного питания. Из исследованных нами в 2006 г. 28 литоральных биотопов по всему периметру Ладожского озера, для 18 биотопов были получены результаты, показывающие, что более 90% (часто 98–99%) рациона *G. fasciatus* должны были удовлетворяться не за счет хищного питания.

Таблица 6.7.1

Поток энергии через популяцию *G. fasciatus* губы Петрокрепость Ладожского озера в 2004–2005 гг. (ккал/м²). (*B* — биомасса; *P* — эквивалент продукции, включающий соматическую, генеративную и экзувиальную продукцию; *R* — траты энергии на обменные процессы; *A* — ассимиляция; *F* — энергетическое выражение неусвоенной части рациона; *C* — рацион)

Месяц	N, экз./м ²	B	P	R	A	F	C	P/B	P/R, %	K ₂	A/B
V	2259	11,2 2	6,46	37,47	43,93	26,36	70,29	0,57 5	17,2	0,15	3,91
VI	2536	8,93	6,59	32,32	38,91	23,34	62,25	0,73 8	20,4	0,17	4,36
VII	1615	6,02	4,65	21,51	26,17	15,70	41,87	0,77 2	21,6	0,18	4,34
VIII	1660	5,06	4,46	18,95	23,40	14,04	37,44	0,88 2	23,5	0,19	4,63
XI	1918	5,20	4,41	20,03	24,45	14,67	39,11	0,84 8	22,0	0,18	4,70
X	1385	6,89	4,15	22,99	27,14	16,29	43,43	0,60 2	18,0	0,15	3,94
XI	1201	8,10	3,49	25,15	28,65	17,19	45,83	0,43	13,9	0,12	3,54

								1			
XII	1086	7,75	—	23,76	23,76	14,26	38,02	—	—	—	3,06
II	1048	7,91	—	23,93	23,93	14,36	38,28	—	—	—	3,02
III	1038	8,16	—	24,44	24,44	14,67	39,11	—	—	—	3,00
IV	986	8,05	2,39	23,90	26,29	15,77	42,05	0,29 7	10,0	0,09	3,27
Сред- нее за вегет. период	1895	7,22	—	—	—	—	—	—		0,17	
Сред- нее за год	1521	7,57	—	—	—	—	—	—		0,15	
Итого за вегетационный период			31,8	153,3	184,0	110,4	294,4	4,40	20,7	—	25,5
Итого за год			39,2	274,5	311,1	186,6	497,7	5,18	14,3	—	41,1

На основании всего спектра имеющихся данных для различных районов прибрежной зоны Ладожского озера можно рассчитать показатели годового рациона популяций вселенца, годовую продукцию макрофитов (расчеты сделаны для ассоциаций с преобладанием тростника) и их соотношения (табл. 6.7.3). Если предположить, что вся годовая продукция макрофитов, так или иначе, непосредственно и через микробиальные и детритные цепи утилизируется в озере в самой литорали и поступает в более глубокие зоны озера, то интересно приблизительно оценить ту долю, которая гипотетически может пойти на покрытие рациона популяции *G. fasciatus* в том или ином районе. В то же время надо учитывать то обстоятельство, что та большая часть рациона (иногда до 99%) этого вида, которая не включает животную пищу, может покрываться не только за счет макрофитов (непосредственное их поедание и использование макрофитного детрита), но и за счет перифитона и пищевого материала, поступающего с прилегающей береговой зоны. Хотя численно оценить роль этих источников (которая, конечно, может быть достаточно высока) в настоящее время не представляется возможным.

Таблица 6.7.2

Средние показатели рациона *G. fasciatus* (C_{Gmel} , ккал/м² сут) и суточной продукции сообщества макрозообентоса (без *G. fasciatus*) (P_{bent} , ккал/м² сут) в различных литоральных биотопах

Типы биотопов	C_{Gmel}	P_{bent}	$P_{bent}/C_{Gmel}, \%$
Валунная литораль	1,349	0,179	13,3
Скальная литораль с нитчатыми обрастаниями	0,345	0,032	9,4
Скальная литораль без нитчатых водорослей	0,070	0,0036	5,1
Песчаная литораль	0,806	0,050	6,2
Песчано-каменистая литораль с макрофитами	3,177	0,097	3,0
Заросли тростника	3,526	0,165	4,68

Из данных, представленных в табл. 6.7.3, видно, что соотношение рациона популяции *G. fasciatus* и годовой продукции макрофитов может изменяться от минимальных до довольно высоких величин (свыше 20%). В среднем же этот показатель составляет около 10%.

Увеличение количественных показателей бентоса биотопов литорали открытых побережий в Ладожском озере за счет *G. fasciatus* при достаточно стабильных численности и биомассе остального бентоса (табл. 6.7.4) свидетельствует о том, что популяция байкальского вселенца в Ладожском озере с очень высокими количественными показателями почти во всех типах литоральных биотопов использует те трофические ресурсы, которые ранее не использовались литоральными бентосными макробеспозвоночными, а их потребление и минерализация осуществлялась, очевидно, за счет бактериального звена и организмов микро- и мейобентоса, или происходила транспортировка этого органического материала в более глубокие зоны озера. Вселение *G. fasciatus* в Ладожское озеро привело к увеличению продуктивности бентосных сообществ и более эффективной утилизации энергии, поступающей в литоральную зону. Изученные особенности питания *G. fasciatus* позволяют прийти к заключению, что этот вид занял свободную экологическую нишу с использованием практически непотреблявшихся ранее трофических ресурсов, в частности различных макрофитов, широко распространенных в озере. Это отразилось на количественных показателях литорального бентоса, резко возросших за счет развития популяции вселенца, без уменьшения количественных показателей остального бентоса (табл. 6.7.4).

Таблица 6.7.3

Рассчитанные годовой рацион *G. fasciatus* (C_{Gmel} , ккал/м² год), годовая продукция макрофитов (P_{mph} , ккал/м² год) и их соотношение в различных участках литорали Ладожского озера

Местоположение	Координаты	C _{Gmel}	P _{mph}	C _{Gmel} /P _{mph} , %
Кобона	60°01,067' N; 31°32,0642' E	1056,96	9940	10,63
Дубно	60°13,271' N; 31°55,006' E	97,06	10780	0,90
Волховская губа	60°07,680' N; 32°19,417' E	83,52	12880	0,65
Вороново	60°16,353' N; 32°37,525' E	1218,53	5880	20,72
Свирская губа	60°31,449' N; 32°41,063' E	0,58	6580	0,01
Андрусовская б-та	60°58,735' N; 32°36,235' E	18,14	10080	0,18
о. Мантсинсаари	61°20,521' N; 31°39,832' E	542,02	8680	6,24
Питкяранта	61°33,954' N; 31°28,040' E	966,82	4900	19,73
Импилахти	61°37,276' N; 31°10,404' E	1609,92	7980	20,17
з-в Хауккалахти	61°38,121' N; 31°11,263' E	129,02	3080	4,19
п-ов Рауталахти	61°45,063' N; 30°52,716' E	42,34	2800	1,51
Валаам; оз. Сисьярви	61°22,840' N; 30°55,946' E	21,31	1820	1,17
Яккимварский з-в	61°29,159' N; 30°13,816' E	31,10	4480	0,69
о. Хаукасари	61°17,069' N; 30°08,891' E	508,03	2520	20,16
Тайполовский з-в	60°37,131' N; 30°31,712' E	264,67	5880	4,50
б-та Далекая	60°34,320' N; 30°40,552' E	1827,07	4340	42,10
южнее м. Боковец	60°22,555' N; 30°52,753' E	907,20	6720	13,50
м. Осиновец	60°06,662' N; 31°05,306' E	1215,94	4620	26,32
среднее		585,57 ± 147,11	6331,11 ± 764,47	10,74 ± 2,88

Вселение *G. fasciatus* можно рассматривать как один из важнейших факторов трансформации всей литоральной зоны Ладоги, изначальный облик которой навсегда утрачен. При этом функционирование популяции *G. fasciatus* в Ладожском озере значительно изменило перераспределение трансграничных потоков вещества и энергии между прибрежной береговой зоной, собственно литоральной зоной и открытой зоной озера, уменьшив, по всей вероятности, в литоральных биоценозах относительное значение бактериального звена и других мелких деструкторов из состава микро- и мейофауны, и таким образом сделав более доступным недоиспользуемый ранее трофический ресурс, в частности, для рыб. Тем самым в Ладожском озере, по-видимому, реализовалась цель, ради которой *G. fasciatus* вселялся в озера Карельского

перешейка, а именно, увеличение кормовой базы рыб. Наряду с этим можно говорить и о появлении в озере дополнительного кормового ресурса для водоплавающих птиц.

Несмотря на то, что под влиянием *G. fasciatus* произошло необратимое изменение литоральной зоны Ладоги, имеющиеся факты позволяют оценивать вселение этого вида в Ладожское озеро как положительное явление, подобно вселению *Nereis diversicolor* O. F. Müller в Каспийское море, где он стал важнейшим трофическим ресурсом для рыб, прежде всего для осетровых.

Таблица 6.7.4

Пределы изменения численности (N, экз./м²) и биомассы (B, г/м²) макрозообентоса разнотипных литоральных биотопов Ладожского озера в 1956–1963 гг. (Стальмакова, 1968), в 1980–1987 гг. (Распопов и др., 1990; Слепухина, 1991) и в 2002–2006 гг. (наши данные)

Типы биотопов	1956–1963 гг.		1980–1987 гг.		Наши данные	
	N	B	N	B	N/N (без <i>G. fasciatus</i>)	B/B (без <i>G. fasciatus</i>)
Скалы (с обрастаниями и без них)	20–55	0,5–1,0	—	—	$\frac{125-17460}{25-2320}$	$\frac{0,32-75,26}{0,01-3,14}$
Каменистая литораль	20–90	0,5–5,6	500–1040	0,7–2,2	$\frac{360-16750}{148-3362}$	$\frac{25,09-85,88}{4,01-26,78}$
Песчаная литораль	0–30	0–1	0–1890	0–5,8	$\frac{2220-11890}{62-818}$	$\frac{5,93-53,88}{0,63-9,73}$
С зарослями макрофитов	До 22000	До 12	1500-2100	5–12	$\frac{460-39780}{24-15900}$	$\frac{2,01-73,82}{1,09-57,60}$

Примечание: «—» — отсутствие данных

Таким образом, *G. fasciatus* в значительной степени формирует трансграничные потоки вещества и энергии в литоральной зоне Ладожского озера, а широкий спектр питания бокоплава позволяет литоральным сообществам донных макробеспозвоночных более полноценно использовать имеющиеся пищевые ресурсы прибрежной зоны озера, прежде всего энергию, аккумулированную продуцентами, и передавать ее на более высокие трофические уровни.

До середины 2000-х гг. среди амфипод в литорали озера преобладал упомянутый *G. fasciatus* — вселенец, который проник в Ладожское озеро в конце 80-х гг. прошлого столетия (Panov, 1996). В 2006 г. в месте впадения реки Волхов был впервые найден новый для озера вид — представитель понто-каспийского комплекса *Pontogammarus robustoides* G. O. Sars (Kurashov, Barbashova, 2008) (рис. 6.7.1). Понтогаммарус успешно акклиматизировался и обитает в акватории Финского залива, откуда, вероятно, с «балластными водами» судов он и проник в Ладожское озеро. В 2006 г. было зарегистрировано только 3 экземпляра данного вида: самец, самка и неполовозрелая молодь. Однако в 2009 г. было выявлено, что *P. robustoides* (рис. 6.7.2 Б) стал уже доминирующим видом амфипод в Волховской губе. На различных участках литорали его численность варьирует от 700 до 1300 экз/м², а биомасса от 3 до 14,5 г/м²

(средняя численность составляет 46% амфипод, средняя биомасса — 58%). На долю *G. fasciatus* (рис. 6.7.2 А) приходится 30% количественных показателей амфипод. Известно, что изменения, происходящие в зообентосных сообществах после вселения этих видов, выражаются в перераспределении энергетических потоков вещества и энергии; изменении количественных показателей видов животных и даже в вытеснении из сообществ некоторых чувствительных видов. Понтогаммарус, также как и гмелиноидес, обладает ярко выраженной эврифагией и способен потреблять широкий спектр растительной и животной пищи (Berezina, 2007). Однако *P. robustoides* может оказывать более значительный хищный пресс на зообентосные сообщества, чем *G. fasciatus* (Berezina, Panov, 2003), при этом он может потреблять и особей *G. fasciatus* (Berezina, 2007).

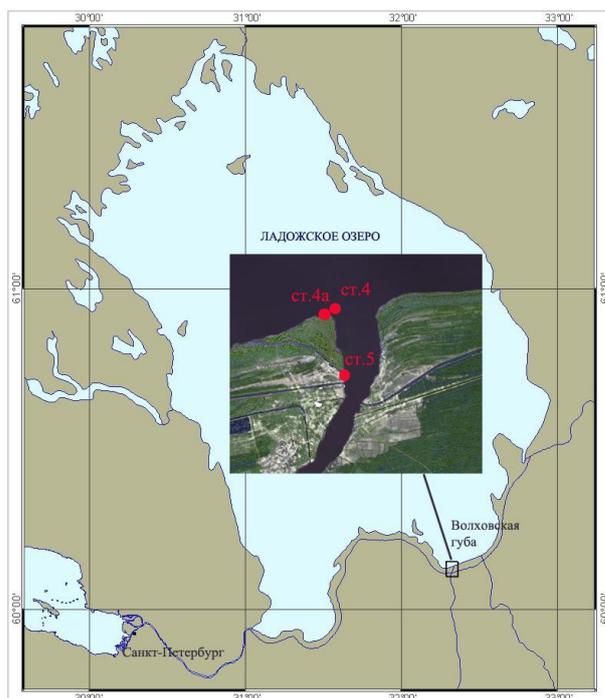


Рис. 6.7.1. Схема расположения исследованных станций в Волховской губе Ладожского озера: ст.4 (2006 и 2009 гг.), ст.4а, 5 (2009 г.), мест обнаружения новых видов-вселенцев *P. robustoides* и *C. curvispinum*.

В 2009 г. в Волховской губе Ладожского озера впервые обнаружен еще один чужеродный вид амфипод *Chelicorophium curvispinum* (G. O. Sars) (рис. 6.7.2 В) (Курашов и др., 2010). Численность *C. curvispinum* варьировала от 56 до 1480 экз./м², биомасса от 0,13 до 1,6 г/м², что в среднем составило 25% численности и 11% биомассы амфипод. Данный вид был представлен экземплярами всех возрастных стадий, включая самок с яйцами (Курашов и др., 2010). Этот факт свидетельствует о том, что *C. curvispinum* также уже акклиматизировался в Ладожском озере. Вероятным временем его проникновения в Ладогу можно считать 2007 или 2008 г., т. к. в 2006 г в обследованных биотопах в Волховской губе этот вид еще отсутствовал.

Обстоятельство обнаружения в Ладожском озере новых чужеродных видов вселенцев из числа наиболее агрессивных инвазивных видов амфипод, а именно *P. robustoides* и *C. curvispinum*, делает крайне необходимым дальнейшие подробные исследования распространения новых видов в Ладожском озере, поскольку в связи с этими новыми

инвазиями возникла угроза новых серьезных экосистемных перестроек в литоральной зоне крупнейшего европейского озера.

Выявлено, что из чужеродных видов высшей водной растительности в Ладожском озере наибольшее значение имеют элодея канадская (*Elodea canadensis* Michx.) и рдест гребенчатый (*Potamogeton pectinatus* L.).

Элодея канадская (*Elodea canadensis* Michx.), завезенная в Европу (Ирландия) из Северной Америки в 1836 г., в конце XIX в. широко расселилась в водоемах Евразии, в том числе и на территории России. В Ладожском озере по данным И.М. Распопова (1968, 1985) элодея канадская имеет довольно широкое распространение, в основном, в северном районе (включая Валаамский архипелаг). По результатам исследования 2006 г., охватывающего все три геоботанических района Ладожского озера (северный, южный и район открытых берегов), элодея канадская встречается на двух станциях северного района у и одной станции западного берега в районе открытых берегов. В северном районе элодея канадская получила развитие на литорали у г. Питкяранта и Валаамском архипелаге вблизи Никольского скита. На илистой литорали, сложенной серым илом, у г. Питкяранта монодоминантные сообщества элодеи канадской граничат с фитоценозами рдеста травяного и урути колосистой. Фитомасса элодеи канадской составляет 11 г/м^2 , относительное участие в проективном покрытии литорали — 14%. На литорали архипелага Валаам вблизи Никольского скита, сложенной темноцветными илами, элодея канадская входит в мозаичный комплекс погруженной растительности, представленной также рдестом травяным и урутью колосистой. Здесь фитомасса элодеи канадской не превышает 8 г/м^2 , а относительное участие в проективном покрытии литорали составляет 15%. В районе открытых берегов в бухте Владимирской на литорали, сложенной мелкопечаными грунтами, элодея канадская занимает большую площадь, входя в мозаичный комплекс погруженной растительности вместе с рдестом травяным и урутью очередноцветковой. В бухте Владимирской фитомасса элодеи канадской достигает 32 г/м^2 , относительное участие в проективном покрытии литорали составляет 12%.

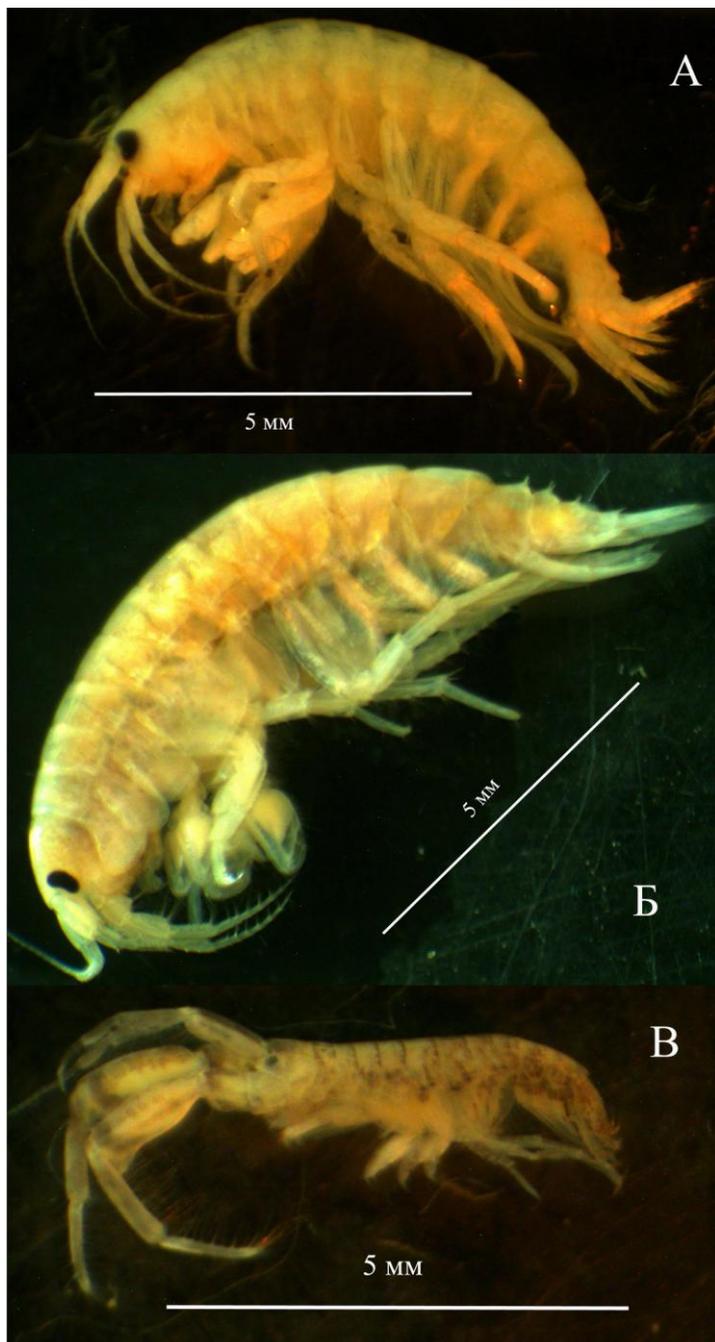


Рис. 6.7.2. Совместно обитающие в Волховской губе инвазивные виды амфипод *G. fasciatus* (А), *P. robustoides* (Б) и *C. curvispinum* (В).

Степень развития и особенности пространственного распределения элодеи канадской на литорали Ладожского озера обусловлены, прежде всего, морфологическими особенностями побережий, 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. На прибойных участках каменисто-песчаной литорали элодея канадская не встречается. Сравнительный анализ современной пространственной структуры гидрофильной растительности с литературными данными (Распопов, 1968, 1985) показывает, что элодея канадская не оказывает значительного влияния на аборигенную растительность.

Рдест гребенчатый (*Potamogeton pectinatus* L.) может рассматриваться как чужеродный инвазивный вид, ранее не встречавшийся в водной флоре Ладожского озера. По результатам исследования 2006–2009 гг. рдест гребенчатый был представлен монодоминантными пятнами небольшой площади на литорали южного района в Волховской губе и у деревни Дубно. В 2009 г., в период резкого подъема уровня воды, рдест гребенчатый в Волховской губе не отмечался. Учитывая, что рдест гребенчатый является индикатором эвтрофирования (Sand-Jensen et al. 2000), требуется дальнейшее изучение распространения и оценка влияния этого вида на водные фитоценозы озера.

В составе мейобентоса Ладожского озера выявлен один инвазивный вид — представитель гарпактицид (*Crustacea Copepoda*) *Nitocra spinipes* (Boeck). Причем обнаруженная в Ладоге форма сочетает в себе признаки *N. spinipes* и *N. lacustris* и требует специального рассмотрения с точки зрения систематики.

N. spinipes — солоноватоводный вид, распространенный по всему миру; он найден во многих регионах Европы, Азии и Африки (Дудакова, 2011). Этот вид играет важную роль в пищевых цепях Балтийского моря, являясь кормовым объектом для мальков и молодых рыб (Дудакова, 2011). На современном этапе его общая роль в пищевых и энергетических потоках морских мейобентосных сетей количественно учтена плохо. Известно (Дудакова, 2011), что часто этот вид массово развивается и является доминирующим в мейобентосе Балтийских солоноватоводных приливных водоемов. Являясь эвригалинным видом, *N. spinipes* имеет широкий ранг устойчивости к солености воды. Она способна к гипоосмотической и, вероятно, к гиперосмотической регуляции; не проявляет поведенческой реакции избегания при смене солености воды. Возможность проникновения нитокры в пресноводные озера, в том числе в Ладожское, связана с этим ее свойством. Предполагается, что рачок был привнесен с балластными водами судов через реку Неву из Финского залива.

К пищевым ресурсам рачок неприхотлив и достаточно неразборчив, потребляя растворенное и нерастворенное органическое вещество, бактерии, микроводоросли, простейших и некоторые мелкие виды копепод. Этот факт увеличивает вероятность расселения рачка по всему озеру и говорит о незначительной конкуренции с другими видами за пищевые ресурсы. Наиболее предпочтительными местами обитания для рачка являются песчаные грунты и растительные ассоциации. Все места локализации вида в Ладожском озере приурочены к литорали; на центральных глубоководных станциях он не был встречен.

Онтогенез *N. spinipes* включает 6 непелагических науплиальных стадий и 6 копеподитных стадий. Генеративное время составляет 10–14 дней при температуре 25–27 °С. Число яиц на выводок варьирует от 15 до 30 с 1–3 выводками на одно оплодотворение (Weiss et al., 1996; Дудакова, 2011).

Первые данные о присутствии нитокры в Ладожском озере были получены нами в 2004 г. В августе 2006 г., при подробном обследовании всей литорали озера, было локализовано два места его обитания в восточной (у острова Мантсинсаари) и в южной частях (Волховская губа) озера. В 2008 г. при проведении сезонных работ вид встречался в районе бухты Петрокрепость в южной части озера в осенний период. В 2009 г. нитокра была вновь встречена на восточном побережье озера. Таким образом, в распределении этого вида на современном этапе имеется привязка к южной и восточной частям озера.

N. spinipes не является в настоящее время серьезным конкурентом для других видов мейобентосных сообществ озера. Как правило, он встречается одновременно с другими аборигенными видами гарпактицид, не вытесняя их и не доминируя.

Следует продолжить наблюдения за состоянием популяции вселенца. Имеется высокая вероятность дальнейшей экспансии рачка по озеру, роста численности популяции и более серьезного влияния на структуру и функционирование мейобентосных сообществ в силу того, что данный вид способен обитать в широком диапазоне минерализации воды, имеет широкий спектр питания и неприхотливость к условиям среды, характеризуется высокой плодовитостью и коротким временем генерации.

Во второй половине XX столетия и в начале 2000-х гг. в бассейне восточной части Финского залива отмечались многочисленные случаи появления новых видов рыб, которые регистрировались в самом заливе, Ладожском и малых озерах и искусственных водоемах (прудах садоводств и парков). Причины этого явления разнообразные, но, в основном, сводятся к двум типам: естественным и антропогенным, связанным с хозяйственной деятельностью (Богуцкая и др., 2004).

К числу естественных причин относятся обычные случайные расселения рыб, нередко возникающие при пульсациях ареалов в связи с нерегулярными и не поддающимися предвидению изменениями природных факторов (течений, температурного и солевого режимов и т. п.). Такой тип появления вселенцев обычен для восточной части Финского залива, в которой новые виды рыб регистрируются изредка единичными экземплярами без последующей натурализации (морская минога *Petromyzon marinus* Linnaeus, европейский анчоус *Engraulis encrasicolus* (Linnaeus), бычок-цуцик *Proterorhinus nasalis* (de Filippi), белоперый пескарь *Romanogobio albipinnatus* (Lukash), морская щука *Belone belone* (Linnaeus).

В Ладожском озере появление новых видов рыб связано преимущественно с акклиматизационными и рыбоводными работами, а также авариями живорыбных садков. В озере в разное время встречались стерлядь *Acipenser ruthenus* (Linnaeus, 1758), байкальский осетр *Acipenser baerii baicalensis* A. Nikolski, ленский осетр *A. baerii chatys* Dryagin, радужная форель *Parasalmo mykiss irideus* (Gibbons, 1855), байкальский омуль *Coregonus migratorius*

(Georgi, 1775), пелядь *C. peled* (Gmelin, 1789), чукучан *Catostomus catastomus* (Forster, 1773), карп *Cyprinus carpio* (Linnaeus, 1758) (Ружин, 1987; Кудерский, 1999; Кудерский и др, 2002). Эти виды в уловах обычно обнаруживаются единично. Однако иногда после массового выпуска в озеро посадочного материала отмечаются случаи вылова большого количества вселенцев (Кудерский, Печников, 2002; Кудерский и др., 2002). В Ладожском озере к уникальным вселенцам необходимо отнести речную камбалу *Platichthys flesus* (Linnaeus), которая изредка вылавливается не только в южной, но и в северной частях (район острова Мантсинсаари) (Дятлов, 2002).

Длительность встречаемости каждого из новых видов в озере обычно кратковременна и зависит от продолжительности использования этих рыб в акклиматизационно-рыбоводных процессах. Перечисленные рыбы в условиях озера растут удовлетворительно, но их естественное размножение (натурализация) не отмечается, и они исчезают при достижении предельного возраста. Отсутствие натурализации не позволяет относить их, как и большинство новых видов бассейна Финского залива, к группе инвазивных форм. Это — лишь случайные вселенцы, появляющиеся в связи либо с природными (речная камбала), либо с антропогенными факторами.

Однако среди достаточно обширного перечня случайных вселенцев в бассейне восточной части Финского залива два вида оказались натурализовавшиеся. Один из них — ротан *Percottus glenii* Dybowski — вызывает особое опасение, поскольку не исключена его успешная инвазия в Ладожское озеро. Он был завезен аквариумистами и выпущен в малые водоемы, из которых проник в мелководную прибрежную зону залива (Дмитриев, 1971; Кудерский, 1982). В настоящее время ротан широко натурализовался не только в заливе, но и в малых озерах и многочисленных искусственных водоемах садоводств, куда нередко вселяется местным населением. Второй натурализовавшийся вид в регионе — американская малоротая паляя *Salvelinus fontinalis* (Mitchill). Эта рыба была завезена в рыбоводных целях в пруды Ропши в конце XIX столетия, но в результате ухода из них натурализовалась в местных ключах, где встречается по настоящее время.

В целом в бассейне восточной части Финского залива и, в том числе, в Ладожском озере инвазивные явления среди рыб не получили распространения, несмотря на большой объем рыбоводно-акклиматизационных работ и повышенную интенсивность (по сравнению со среднероссийскими показателями) хозяйственной деятельности, различные формы которой (например, судоходство) обычно сопровождаются саморасселением водных организмов.

Результаты исследования биологических сообщества Ладожского озера, их видового состава, особенностей распределения в озере, функционирования отражают их специфические

характеристики, которые исторически формировались в условиях действия сложного комплекса природных факторов крупного глубоководного холодноводного водоема, из которых прежде всего следует выделить температурный режим, сложную морфологию дна, значительные перепады глубин озера, низкую минерализацию воды, благоприятный кислородный режим и высокую прозрачность воды.

Высокое биологическое разнообразие флоры и фауны экосистемы Ладоги обусловлено в большой степени значительным разнообразием биотопов и условий существования гидробионтов. Наибольшей мозаичностью местообитаний характеризуется литоральная зона озера, за счет которой во многом формируется общее биоразнообразие водоема (Литоральная..., 2011). Но и в центральной зоне озера могут быть выделены своеобразные лимнические районы, достаточно обособленные водные массы, формирующиеся за счет особенностей морфологии озерной котловины и специфического температурного режима, для которых характерны специфические видовые комплексы и ассоциации гидробионтов. Вместе с тем, можно говорить не только о горизонтальной мозаичности и неоднородностях в распределении планктонных сообществ, но и сложной вертикальной структуре распределения в пространстве отдельных компонентов планктона.

Что касается бентосных сообществ, то их состав и количественное развитие в озере зависит прежде всего от таких факторов, как состав (гранулометрический и химический) донных отложений, температурный режим, освещенность, гидрологический режим и количество поступающей из верхних слоев водоема органики, что во многом определяется глубиной расположения местообитаний бентоса. Нельзя не упомянуть и о таком факторе, изменяющим в настоящее время биоценозы озера, как биологические инвазии (этот вопрос рассматривается в Главе 7).

Большое значение для формирования гидробиологического режима Ладожского озера, особенно в его прибрежной части, имеют притоки озера, биота которых характеризуется целым рядом специфических черт, отличающих их, в частности, от большинства европейских рек. Несмотря на то, что большинство притоков озера (за исключением реки Волхов и некоторых других притоков южной части озера) являются продукционно бедными, видовой состав планктона (особенно фитопланктона) весьма богат, и биосток рек увеличивает биоразнообразие Ладожского озера.

Определенные изменения в биологических сообществах происходили в конце XX – начале XXI вв. в результате воздействия антропогенного фактора. Однако следует отметить, что природные процессы продолжают оставаться определяющими в формировании и функционировании биоценозов озера. Это происходит из-за того, что, являясь огромным глубоководным водоемом с весьма замедленным водообменом, Ладожское озеро по природе

своей обладает высокой устойчивостью к внешним воздействиям. Гомеостаз озерной экосистемы также поддерживается за счет внутренних структурных перестроек сообществ гидробионтов, что в целом приводит к стабильному состоянию озерной биоты. Характерные изменения сообществ гидробионтов под воздействием антропогенного фактора наиболее сильно проявляются в зонах, прилегающих к источникам повышенной антропогенной нагрузки (об этом сообщается в Главе 7). В этих случаях характеристики развития водных организмов могут выступать надежными критериями оценки экологического состояния озера.

Глава 7. Оценка экологического состояния Ладожского озера и качества его вод

Понятие «экологическое состояние» является одним из ключевых в современной экологии. Состояние экологической системы можно определить как всю совокупность ее характеристик на определенном этапе ее развития и функционирования. Тогда для того, чтобы описать/оценить экологическое состояние водной экосистемы, необходимо выявить характерные черты и параметры развития всех основных сообществ водных организмов, а также химические и физико-химические показатели состояния данного водоема. Знание качественных и количественных характеристик развития отдельных компонентов экосистемы позволяет понять природу ее экологического состояния. Однако наибольший экологический смысл подобные оценки приобретают, если они соотносятся с определенной точкой отсчета. Тогда исследователь может прийти к заключению об экологическом статусе водной экосистемы. Определив экологический статус экосистемы для различных временных интервалов ее развития можно выявить направление (вектор) ее изменения (или отсутствие значимых изменений, стабильность состояния). Определение трофического статуса водной экосистемы по характеристикам развития автотрофного звена является совершенно необходимым элементом оценки ее экологического статуса. В случае огромного Ладожского озера можно говорить как о трофическом статусе водоема в целом, так и о трофическом статусе отдельных зон.

Точкой отсчета для определения экологического состояния (статуса) может служить и некоторое экологическое состояние, характеризующее «норму», «экологическое здоровье» или «идеальное состояние» для данной экосистемы. В качестве такой нормы может выступать состояние системы в прошлом или, при невозможности его определения, желаемое (гипотетическое) состояние. Примером такого состояния являются референтные условия (*reference conditions*), используемые в Водной Рамочной Директиве Европейского Союза (WFD), принятой в 2000 г. (Directive..., 2000). Историческим предшественником этого документа является Британская система RIVPACS (River Invertebrate Prediction and Classification System, 1984 г.) (Assessing..., 2000).

Таким образом, при проведении исследований пресноводных экосистем и их мониторинга следует различать два подхода к оценке их состояния:

- 1) подход, основанный на оценке экологического состояния водного объекта по

сравнению с экологической «нормой» («здоровьем», «природным состоянием») для данного водоема;

2) подход, основанный на оценке качества воды водного объекта, характеризующего ее пригодность для конкретных видов водопользования.

Первый подход, основанный на оценке степени отклонения состояния среды водоема от «нормального», естественного, являясь действительно экологичным, был предложен в качестве методологии биомониторинга озерных экосистем еще в 1989 г. (Курашов, 1989). Он был успешно применен при оценке состояния Ладожского и Онежского озер на основе анализа сообществ мейобентоса с использованием оригинальных биоиндикационных индексов (Курашов, 1994; Kurashov, Gorichenskiy, 1992). Сходный подход к экологическому нормированию и мониторингу предлагался и другими отечественными авторами (Пузаченко, 1992; Погребов, Шилин, 2001).

В настоящее время, как отмечено выше, похожий принцип реализуется в странах ЕС в рамках Водной Рамочной Директивы. В соответствии со Статьей 2 WFD, «экологическое состояние обозначает выражение качества структуры и функционирования водных экосистем, связанных с поверхностными водами и классифицированных в соответствии с биологическими, а также гидроморфологическими, химическими и физико-химическими показателями, дополняющими биологические». Таким образом, приоритетными в оценке экологического состояния являются биологические критерии, а остальные показатели считаются вспомогательными. Экологическое состояние (экологический статус) водных экосистем в зависимости от значений элементов качества классифицируется по пяти градациям: высокое, хорошее, среднее, низкое, плохое. Так, например, для вод, имеющих высокое качество, характерно отсутствие или очень незначительные антропогенные изменения значений физико-химических и гидроморфологических элементов качества поверхностного водного объекта данного типа в сравнении со значениями, обычно ассоциируемыми с данным типом водного объекта в условиях отсутствия каких-либо воздействий, а значения биологических элементов качества объекта соответствуют значениям, характерным для объектов данного типа при отсутствии воздействий, и не обнаруживают или обнаруживают очень незначительные признаки искажения. Качество вод, обнаруживающих признаки критических изменений значений биологических элементов качества для данного вида поверхностного водного объекта, и в которых значительные части соответствующих биологических сообществ, обычно ассоциируемых с данным видом поверхностного водного объекта в условиях отсутствия каких-либо воздействий, отсутствуют, следует классифицировать как плохое.

Биоиндикационные индексы, которые могут использоваться в ходе применения первого подхода, могут быть как традиционными, так и специально разработанными, учитывающими

специфику конкретного исследуемого водного объекта. Хорошим примером являются индексы для оценки экологического состояния больших озер на основе анализа мейобентоса (Курашов, 1994). Биоиндикаторы, применяемые в рамках данного подхода для оценки экологического статуса, по возможности должны представлять все основные трофические звенья в водной экосистеме, что делает возможным наиболее полно охватить весь экологический спектр сообществ и, таким образом, получить наиболее достоверную оценку экологического состояния и выявить тенденции его изменения.

Второй подход к оценке состояния водных экосистем позволяет определить качество воды, под которым в целом понимается характеристика ее состава и свойств, определяющая ее пригодность для конкретных видов водопользования (ГОСТ 17.1.1.01–77). Показатели или критерии качества — это перечень свойств воды, численные значения которых сравнивают с нормами качества воды. В свою очередь, нормами качества являются установленные значения показателей качества воды для конкретных видов водопользования. Таким образом, понятие «качество воды» лежит в чисто практической плоскости и представляет интерес главным образом для потребителей, заинтересованных использовать водоем в конкретных практических целях.

В настоящей главе представлены материалы, характеризующие все основные сообщества гидробионтов озера и необходимые для понимания современного экологического состояния Ладоги; при этом специфика характеристики некоторых сообществ, например, бактериопланктона, позволяет давать и прямые оценки качества воды в различных районах озера, в том числе с точки зрения ее использования для питьевого водоснабжения. Химические и физико-химические показатели состояния биологической системы также характеризуют экологическое состояние озера, а сравнение их численных значений с санитарно-гигиеническими нормативами дает оценку качества воды. Поскольку Ладожское озеро используется в различных целях, в том числе для рыболовства, в качестве нормативов взяты предельно допустимые концентрации (ПДК_в) в воде рыбохозяйственных водоемов, как наиболее жесткие из существующих в России систем нормативов качества вод.

7.1. Оценка экологического состояния озера и качества его вод по гидрохимическим показателям

Анализ пространственно-временной изменчивости гидрохимических показателей позволяет дать оценку природно-ресурсного потенциала озера, его трофического статуса, выделить районы повышенного экологического риска. В данном параграфе оценка экологического состояния и качества воды Ладожского озера и его притоков дается на основе

анализа значений следующих гидрохимических показателей: минерализации и содержания главных ионов, водородного показателя (рН), содержания растворенного кислорода, биогенных элементов, органического вещества, металлов, фенолов и нефтяных углеводородов. Как показывает анализ имеющихся данных, еще в начале 60-х гг. прошлого века антропогенное воздействие практически не оказывало влияния на функционирование экосистемы озера. Поэтому в качестве «экологической нормы», состояния, близкого к природному, можно принять его экологическое состояние, характерное для того периода существования экосистемы, а соответствующие значения гидрохимических показателей — за точку отсчета.

Водам Ладожского озера и его водосборного бассейна свойственны невысокая минерализация, гидрокарбонатно-кальциевый состав, превышение содержания сульфатных ионов над хлоридными. Основной вклад в содержание главных ионов вносят природные факторы. Воды рек, водосборы которых сложены преимущественно кристаллическими породами Балтийского щита, перекрытыми толщей четвертичных отложений небольшой мощности, характеризуются наименьшей минерализацией — это реки Свирь, Бурная и ее северный рукав, р. Вуокса, а также реки северного, северо-восточного и восточного побережья — Янис, Уксун, Тулема, Видлица, Тулокса, Олонка. Водам рек юго-восточного и южного побережья (Волхов, Паша, Оять, Сясь, Авлога), водосборы которых сложены осадочными породами, свойственна повышенная минерализация. В целом минерализация воды притоков озера возрастает с севера на юг от 25–40 до 200–300 мг л⁻¹ (межень), при этом амплитуда ее сезонных колебаний увеличивается в 3–5 раз. Определенный вклад в величину минерализации речных вод южной части водосбора вносит и антропогенный фактор, поскольку эта территория является наиболее развитой в хозяйственно-экономическом отношении.

Водосбор рек Волхов и Сясь сложен мощной толщей четвертичных отложений, залегающей на палеозойских осадочных породах, зарегулированность стока невелика, поэтому в течение года величина суммы главных ионов может изменяться в 2,5–3,5 раза для Волхова и 3,5–5,0 раз для Сяси. При такой амплитуде колебаний минерализации трудно выделить изменения в ионном составе воды, которые происходят в результате высокой степени хозяйственной освоенности бассейнов этих относительно крупных рек. Однако для небольшой реки юго-западного побережья Авлоги, минерализация которой также характеризуется высокой годовой изменчивостью, было отмечено увеличение $\Sigma_{и}$ в 1,5–2,0 раза в 2004–2005 гг. по сравнению с 1959–1960 гг. При этом произошел рост содержания ионов SO_4^{2-} (в 2 раза) и Cl^- (в 6 раз), при сохранении концентрации HCO_3^- на прежнем уровне. Причиной подобных изменений в соотношении содержания главных ионов является сброс в реку значительного объема хозяйственно-бытовых сточных вод.

Бассейн реки Вуокса также характеризуется высокой степенью освоенности. В г. Иматра (Финляндия) расположен сталелитейный завод, крупнейшим источником точечной нагрузки является Светогорский ЦБК, в г. Каменногорске находится фабрика офсетных бумаг, в г. Лесогорске — завод искусственного волокна. В реки и озера бассейна Вуоксы сбрасываются сточные воды ряда городов, поселков, сельскохозяйственных предприятий. Кроме того, территория бассейна — популярное место отдыха и туризма. Сравнение минерализации и ионного состава воды реки в 1959–1961 гг. и в настоящее время указывает на повышение концентрации сульфатных и хлоридных ионов, а также ионов натрия, что связано с поступлением сточных вод целлюлозно-бумажных предприятий (повышение содержания SO_4^{2-}) и хозяйственно-бытовых сточных вод (рост содержания Cl^- и Na^+).

Основным фактором формирования химического состава воды Ладожского озера является речной сток, который и определяет среднюю минерализацию и пространственную неоднородность состава. Современная минерализация воды озера ($60\text{--}65 \text{ мг л}^{-1}$) близка к средней минерализации воды трех главных притоков озера — рек Свирь, Бурная и Волхов. В 1970-х – 1980-х гг. величина $\Sigma_{\text{и}}$ имела тенденцию к увеличению, достигнув максимума в 2001–2004 гг. Несмотря на некоторое снижение (до уровня 1990-х гг.) в последние годы, содержание главных ионов все же заметно превышает таковое в начале 1960-х гг. (55 мг л^{-1}). Антропогенное влияние на ионный состав воды озера, как и в случае рек, проявляется в изменении соотношения между концентрациями главных ионов. Возросший уровень хозяйственной деятельности на территории водосбора привел к увеличению доли Na^+ , K^+ , SO_4^{2-} и Cl^- в основном ионном составе воды озера в последние годы по сравнению с 1960 г., однако современные концентрации основных ионов не превышают значений ПДК_{вп}. Все же следует отметить, что слабоминерализованные воды, какими являются воды Ладоги и ее бассейна, гораздо более уязвимы по отношению к внешним воздействиям, чем сильноминерализованные воды.

Водородный показатель вод большинства притоков озера, в основном, находится в интервале значений, характерных для нейтральных вод ($6,5\text{--}7,5$), что связано прежде всего с природными особенностями речных водосборов. Хозяйственная деятельность на водосборах приводит к повышению концентрации биогенных веществ в водах притоков. В результате усиливается фотосинтетическая активность фитопланктона, следствием чего является рост значений pH, особенно в летний период. Сказанное в той или иной степени характерно для всех притоков Ладожского озера. Большие изменения в амплитудах колебания pH за последние 50 лет произошли в водах рек восточного и северо-восточного побережий (реки Тулемайоки, Тулокса, Олонка, Оять, Паша), а также малых рек северного и северо-западного (Иийоки и Уксунйоки), юго-восточного и юго-западного побережий (Лава, Назия, Морье и Авлога), что

является следствием высокой антропогенной нагрузки на их водосборы. Практически во всех реках заметно выросли как экстремальные, так и средние значения рН. Самые существенные изменения произошли в наиболее уязвимых из-за малого расхода воды реках, таких как Лава и Авлога, испытывающих сильное антропогенное воздействие — наибольшие значения рН в 60-е гг. прошлого века не достигают наименьших значений рН в 2000-х гг. Наименьшие изменения в интервалах значений рН произошли в водах рек Янисйоки, Вуокса, Бурная и Свирь.

В Ладожском озере в течение 2005–2009 гг. рН воды изменялось в пределах 6,7–9,0 при преимущественных значениях 7,0–7,30. Наибольшие значения рН отмечаются обычно в летний период в местах интенсивного развития фитопланктона в южной части озера — Волховской губе, а также в поверхностных слоях воды центральной глубоководной зоны. Наименьшие значения рН характерны для участков, подверженных влиянию рек Бурная и Вуокса. Осенью значение рН остается практически постоянным по всей толще воды и находится в пределах 7,1–7,4. В целом в настоящее время значения рН ограничены диапазоном, характерным для различных сезонов года для крупного глубоководного низкопродуктивного водоема.

Значения рН рыбохозяйственных рек ладожского водосбора, таких как Бурная и Вуокса, не выходят за пределы норматива (6,5–8,5), а для воды озера относительно высокие значения водородного показателя отмечаются лишь эпизодически.

Ладожское озеро является нормально аэрированным водоемом с высоким содержанием растворенного в воде *кислорода* в течение всего годового цикла. Особенности современного кислородного режима озера, впервые отмеченные в 1980-х гг., постоянно проявляются с 1990-х гг. и до настоящего времени. Весной в теплоинертной области относительное содержание кислорода по всему столбу воды составляет от 92 до 99% насыщения. Более высокие значения, отмечаемые в отдельные годы (например, до 132% весной 2009 г.), связаны с явлением гистерезиса, наблюдавшимся при быстром прогреве воды. Летом, даже при активном фотосинтезе, в поверхностных слоях воды содержание кислорода составляет 79–110%, в гипolimнионе — 76–105%. Осенью практически по всей акватории озера до глубины 50 м относительное содержание кислорода выравнивается и составляет 82–103%, на глубинах 150–200 м несколько ниже — 79–100% насыщения.

Для отдельных участков акватории озера, например, вблизи устья реки Волхов, характерно пониженное содержание кислорода (75–94%), что объясняется активным его потреблением на окисление органического вещества, в большом количестве приносимого речными водами.

В 60-е и до конца 70-х гг. прошлого века относительное содержание растворенного кислорода в озере не опускалось ниже 95%, а пересыщение в трофогенном слое, вызванное как

процессом фотосинтеза, так и явлением гистерезиса, не превышало 110–120%. Таким образом, за последние четыре десятилетия в кислородном режиме озера произошли некоторые изменения; однако и на современном этапе содержание кислорода в воде остается достаточно высоким и близким к насыщению.

Содержание *биогенных элементов*, главнейшими из которых являются фосфор и азот, определяет биологическую продуктивность водоема. Наиболее часто лимитирующим фактором для развития водных организмов является содержание фосфора. Уровень хозяйственного развития региона оказывает значительное влияние на режим биогенных элементов в озере, поскольку избыточное поступление их в водоем ведет к эвтрофированию и связанному с этим ухудшению качества воды. Поэтому оценка содержания биогенных элементов в воде и характера их распределения имеет большое значение при определении трофического статуса водоема.

Коренные породы, рыхлые отложения и подзолистые почвы, слагающие ладожский водосбор, бедны соединениями фосфора, поэтому речные воды бассейна Ладожского озера в естественном состоянии содержат мало фосфора. Особенно малы его концентрации в северной части в области развития кристаллических пород. Однако хозяйственная деятельность на территории водосбора привела к росту содержания фосфора в воде рек. По данным за период с 2001 г. повышенные концентрации общего фосфора наблюдаются в воде рек восточного побережья — Тулоксы (38–142 мкг Р л⁻¹) и Олонки (54–360 мкг Р л⁻¹), и юго-восточного побережья — Паши (16–79 мкг Р л⁻¹), Ояти (19–82 мкг Р л⁻¹) и Сяси (19–101 мкг Р л⁻¹), что, очевидно, обусловлено значительной сельскохозяйственной освоенностью территории, особенно бассейнов рек Олонка и Тулокса, и влиянием сточных вод Сясьского ЦБК. Фосфор в воду этих рек поступает в основном от рассеянных антропогенных источников. Малые реки южного и юго-западного побережья — Назия, Морье и, особенно, Авлога, испытывают наибольший антропогенный пресс, соответствующие концентрации Р_{общ.} в их водах изменяются в пределах 91–121, 78–275, 258–3250 мкг Р л⁻¹).

Вода реки Волхов — главный источник поступления фосфора в озеро с водосбора — всегда отличалась его высоким содержанием, что обусловлено как особенностями природных условий, так и наиболее развитым хозяйством в южной части Ладожского водосбора. В конце 60-х гг. прошлого века произошло изменение технологии производства на Волховском алюминиевом заводе (ОАО «Волховский алюминий»), что привело к резкому увеличению концентрации фосфора в воде реки. Наиболее высокие концентрации общего фосфора наблюдались в конце 70-х – середине 80-х гг. прошлого века. Со второй половины 1980-х гг. в результате снижения сброса фосфора со сточными водами комбината содержание его в реке снижалось и в 2007–2011 гг. уменьшилось до 57–83 мкг Р л⁻¹. Исключением явился 2005 г.,

когда активизировалась деятельность ОАО «Волховский алюминий», что привело к повышению содержания ТР в воде Волхова до 334–380 мкг Р л⁻¹.

Антропогенное воздействие на Ладожское озеро первоначально проявилось в увеличении поступления в него соединений фосфора с водосбора, которое к концу 70-х – началу 80-х гг. прошлого века выросло в 3,3–3,9 раза по сравнению с началом 1960-х гг. и составило 6–7 тыс. т фосфора в год. Это привело к повышению концентрации общего фосфора в воде озера в 2,0–2,6 раза, что, в свою очередь, способствовало развитию процесса антропогенного эвтрофирования озера и переходу его из олиготрофного состояния в мезотрофное. Если в среднем за 1976–1980 гг. содержание ТР в воде озера составляло 26 мкг Р л⁻¹, то уже с начала 1980-х гг. отчетливо прослеживается тенденция снижения концентрации. В последние годы (начиная с 2003 г.) среднегодовая концентрация ТР в Ладожском озере составляет 11–13 мкг Р л⁻¹, т. е. близка к нижней границе мезотрофии. Это позволяет определить трофический статус озера как слабomezотрофный. Отчетливый тренд снижения содержания фосфора в воде Ладожского озера с конца 1970-х гг., обусловленный уменьшением внешней фосфорной нагрузки, указывает на возможность сохранения благоприятного экологического состояния водоема в ближайшие годы.

Наибольшие концентрации фосфора отмечаются в воде прибрежной зоны, находящейся под прямым влиянием притоков, при этом максимальные значения относятся к Волховской губе, куда поступают обогащенные фосфором воды рек Волхов и Сясь. По данным 2006–2010 гг. содержание общего фосфора здесь не превышает 60–80 мкг Р л⁻¹. Максимальная в течение последнего десятилетия концентрация ТР (137 мкг Р л⁻¹), зафиксированная здесь в начале июля 2005 г., была связана со значительным повышением содержания фосфора в воде реки Волхов. Пространственное распределение и значение средней концентрации фосфора в Волховской губе определяются весной положением термического бара и во все сезоны — гидросиноптической обстановкой в озере. При ветрах северного направления Волховская губа заполняется озерными водами, и концентрация фосфора в ней мало отличается от средней по озеру. При ветрах южного направления содержание фосфора зависит от распространения по губе вод притоков. Повышенные концентрации фосфора отмечены также в заливах северной шхерной части озера — в районе г. Сортавала, в Якимварском заливе и др., где фосфор поступает в озеро с хозяйственно-бытовыми стоками.

Концентрация общего азота в воде притоков в 10–15 раз и более превышает содержание общего фосфора. Наряду с этим диапазон концентраций азота по водосбору значительно уже, чем фосфора. Межгодовые и сезонные изменения содержания общего азота невелики, концентрация его в воде зарегулированных рек мало отличается от значений в воде остальных притоков. Наибольшие концентрации ТN (4,3–5,0 мг N л⁻¹), как и ТР, зафиксированы в водах

реки Авлога. В период с 1976 по 2003 г. годовое поступление общего азота с водой притоков возросло в 1,6 раза с 41,5 до 66,8 тыс. т. В отличие от фосфора, тенденция снижения выноса азота в озеро прослеживается слабо.

Диапазон концентраций общего азота по акватории озера также гораздо уже, чем фосфора. Наибольшие значения превышают наименьшие примерно в 1,5 раза, отчетливого временного тренда в изменении содержания TN не прослеживается. Как и в случае фосфора, наибольшее содержание общего азота в воде озера наблюдается в Волховской губе.

Как показали наблюдения последних лет (2005–2008 гг.), нитритный азот в воде озера практически не обнаруживается. Содержание аммонийного азота преимущественно составляет 10–25 мкг N л⁻¹ и лишь в отдельных случаях достигает 50–80 мкг N л⁻¹. Доля аммонийного азота в воде озера достигает, как правило, не более 5% от TN. Неорганический азот находится преимущественно в форме нитратов, на долю которых приходится около 30% от общего содержания азота. В целом концентрации общего, нитратного, нитритного и аммонийного азота в озере существенно ниже соответствующих нормативов для водоемов рыбохозяйственного значения.

Одним из следствий антропогенного эвтрофирования можно считать и уменьшение концентрации минерального растворенного кремния в воде озера. Содержание его в природных водах определяется ландшафтными условиями водосбора и не зависит от хозяйственного освоения территории. Содержание растворенного кремния в воде притоков, а, следовательно, и вынос его с речным стоком в озеро сохранились на уровне 1960-х гг., при этом средняя его концентрация в озере понизилась с 0,90 мг Si л⁻¹ в начале 1960-х гг. до 0,40–0,50 мг Si л⁻¹ в настоящее время. В прибрежной зоне (бухта Петрокрепость, Волховская губа) в период развития диатомовых водорослей концентрации кремния снижаются до 0,10 мг Si л⁻¹. Очевидно, что это является следствием его интенсивного потребления диатомовыми водорослями, при этом запас кремния в озере не успевает пополняться за счет речного поступления. Таким образом, вследствие эвтрофирования концентрация кремния в водоеме может снижаться до значений, лимитирующих развитие диатомовых водорослей.

Высокие значения показателей *органического вещества* (цветности воды, концентрации общего и лабильного углерода) характеризуют в первую очередь природные особенности региона. Наименьшие концентрации органического углерода (6–17 мг С л⁻¹), как и цветности воды, характерны для рек с высокой озерностью водосбора — Свири и Бурной. На том же уровне (до 20 мг С л⁻¹) находится содержание ТОС в воде рек северной части бассейна (реки Янисйоки, Хиитолан, Уксунйоки, Ийоки, Тохма). В реках восточной и юго-восточной части водосбора содержание ТОС составляет 10–30 мг С л⁻¹, в малых реках южной части водосбора (Лава, Назия, Морье) оно может достигать 35–40 мг С л⁻¹.

Развитие процесса эвтрофирования способствовало усложнению видового разнообразия сообществ как продуцентов, так и деструкторов. Оборачиваемость фосфора в озере за счет потребления фитопланктоном и бактериями выросла на порядок по сравнению с олиготрофным периодом. Активность минерализации органического вещества в озере возросла благодаря массовому развитию водных грибов, способных к более глубокой трансформации наиболее консервативных его компонентов. Прижизненные выделения водорослей и других гидробионтов создавали значительный объединенный резерв органического вещества, не только легко минерализуемого, но и обладающего набором ферментов, способных воздействовать на биохимические процессы в озере. Все это определило значительные межгодовые изменения содержания общего органического вещества в воде озера. В период с 1956 до 1981 г. среднегодовая концентрация общего органического углерода оставалась практически постоянной — $8,3 \text{ мг С л}^{-1}$. Последующие годы характеризуются как сезонными колебаниями концентрации ТОС во всех зонах озера, так и периодами снижения и повышения общего запаса органического углерода. Начиная с 2005 г. концентрация ТОС в воде озера относительно стабилизировалась и составляет в последние годы около $7,0 \text{ мг С л}^{-1}$ ($6,6\text{--}7,3 \text{ мг С л}^{-1}$), что соответствует запасу органического углерода в водной массе озера от 6468 до 7154 тыс. т. Однако наблюдающаяся тенденция увеличения концентрации лабильного органического углерода и его доли в общем содержании углерода во всех лимнических зонах озера может свидетельствовать об усиливающемся дисбалансе накопления и минерализации органического вещества в экосистеме.

Общее содержание *металлов*, формы их существования в водной системе и особенно оценка доли свободных и связанных форм металлов позволяют оценить их реакционную способность, доступность и токсичность для водных организмов. Основным источником металлов в воде озера являются притоки, при этом наибольшую роль в поступлении металлов в озеро играют главные реки бассейна (Волхов, Свирь, Вуокса), которые поставляют Fe — 75%, Al — 86%, Mn — 83%, Cu — 82%, Pb — 86 % от общего речного поступления. В химическом составе вод притоков преобладающим среди металлов является железо, концентрации алюминия и марганца ниже, наименьшие концентрации у меди и свинца. Различия в содержании металлов обусловлены ландшафтными особенностями их миграции, различной водностью лет, а также различной антропогенной нагрузкой на водосборный бассейн. Водосборы Волхова и Сяси подвержены интенсивной хозяйственной деятельности и поэтому в воде этих двух рек самые высокие среднегодовые концентрации Al и Cu. Повышенным содержанием Fe и Mn по сравнению с другими реками выделяются Паша и Оять. Иногда значительные концентрации Fe и Mn отмечаются в воде реки Олонка.

В химическом составе воды Ладожского озера преобладающим в количественном отношении среди металлов является железо (до 182 мкг л⁻¹), в меньших концентрациях присутствуют алюминий (до 84 мкг л⁻¹) и марганец (20,1 мкг л⁻¹) (по данным 2008 г). Содержание этих элементов широко варьируется по акватории озера. Диапазон концентраций меди и свинца более узок. Неравномерность распределения микроэлементов в водной массе озера обусловлена местонахождением источников их поступления и гидродинамическим режимом водоема. Почти постоянно повышенными концентрациями железа, алюминия и марганца и наибольшей их изменчивостью характеризуются воды прибрежной зоны, находящейся под прямым влиянием притоков, а также промышленных и хозяйственно-бытовых сточных вод. Высокие уровни металлов в прибрежной зоне определяются, главным образом, поступлением сюда вод южных притоков, и, в первую очередь, Волхова. Поэтому на участках, примыкающих к устью Волхова, наблюдаются концентрации металлов, нередко превышающие нормативы. Например, в 2008 г. на ст. 1 в Волховской губе весной концентрация Fe составила 1180 мкг л⁻¹.

К числу приоритетных загрязняющих веществ относятся *фенолы и нефтепродукты*. Существенная часть фенолов в воде Ладожского озера и его притоков имеет вторичное происхождение. Соединения фенольного ряда выделяются как в процессе жизнедеятельности гидробионтов, так и образуются при микробиологической деструкции органического вещества. Причиной изменчивости их концентраций в ходе миграции по гидрографической сети помимо различного уровня внешнего поступления фенолов, является существование непрерывно протекающих процессов образования и разложения фенолов. Повышенное содержание фенолов в поверхностных водах некоторых участков прибрежной зоны Ладожского озера (до 34 мкг л⁻¹ при ПДК 1 мкг л⁻¹) может являться как результатом их избыточного поступления извне (антропогенное загрязнение), так и результатом образования соединений фенольного ряда в самом озере в результате трансформации органического вещества различного происхождения (вторичное загрязнение). В открытой части озера повышенное содержание фенолов имеет исключительно вторичное происхождение — это либо продукты жизнедеятельности фитопланктона, либо результат трансформации нефтяных углеводородов (НУВ), попавших в озеро в результате судоходства.

Выявленная в ходе наблюдений тенденция снижения предельных и среднегодовых концентраций фенолов в воде притоков озера со второй половины 90-х гг. XX в. до 1998–2003 гг., приведшая к уменьшению поступления фенолов в озеро, обусловлена как межгодовыми изменениями водного стока, так и спадом производства на территории водосбора озера. Снижение среднегодовых концентраций фенолов в Ладожском озере связано, в первую очередь, со снижением внешней фенольной нагрузки, а сезонный ход распределения фенолов в

значительной степени обусловлен процессами их вторичного образования и сезонной активностью биоты. В 2007–2008 гг. содержание фенолов в воде притоков и озера преобладало на уровне 1–2 ПДК. Однако это состояние не стабильно, любая дополнительная антропогенная нагрузка может нарушить сложившееся экологическое равновесие. Так, в зону экологического риска попадают бухта Петрокрепость, Волховская и Свирская губы и прилегающие к ним районы южной части озера. У западного берега неблагоприятная экологическая ситуация складывается в районе г. Приозерска и устья реки Бурная (Вуокса), на севере — в районе северных шхер.

В период исследований с 1991 по 2011 г. наблюдалось увеличение содержания НУВ в поверхностном слое воды озера от 9 мкг л⁻¹ до 104,4 мкг л⁻¹ (средневзвешенные значения концентрации) с абсолютным максимумом 135 мкг л⁻¹ в 2010 г. При этом до 1994 г. основная масса значений НУВ не превышала предельно допустимой концентрации в воде водоема, используемого для рыбохозяйственных целей (ПДК_{вр} 50 мкг л⁻¹), а самые высокие концентрации НУВ отмечались эпизодически в прибрежной зоне озера вблизи устьев рек и локальных источников загрязнения. После 1994 г. уровень концентраций НУВ, превышающих ПДК_{вр}, стал преобладающим для большей части акватории озера, а с 2001 г. превышение ПДК_{вр} наблюдается практически постоянно во всех лимнических зонах, включая глубоководные. В зоне экологического риска наиболее часто оказываются бухта Петрокрепость, Волховская губа с прилегающей к ним южной частью акватории озера, а также районы г. Приозерска с устьем реки Бурная (Вуокса), г. Питкяранты и северных шхер.

Выполненные исследования позволили квалифицировать состояние озера как близкое к равновесному в период 1981–2003 гг., когда диапазон долгопериодных изменений концентраций НУВ в поверхностном слое воды озера (13–87 мкг л⁻¹), ограниченных рамками 25–75 % квартилей, незначительно превышал диапазон сезонных колебаний (21–66 мкг л⁻¹). В последующий период увеличение верхнего предела диапазона долгопериодных изменений концентраций НУВ в поверхностном слое воды озера до 98 мкг л⁻¹ в 2006 г. и рост среднегодового средневзвешенного по озеру значения концентрации НУВ до 104 мкг л⁻¹ к 2011 г. свидетельствуют о возрастающей нестабильности экологического равновесия озерной системы.

Таким образом, анализ данных многолетних гидрохимических наблюдений и тенденций изменения гидрохимических показателей в течение последних пяти десятилетий в целом позволяет определить экологическое состояние Ладожского озера как достаточно высокое, несмотря на возросший уровень антропогенного воздействия как на водосборный бассейн, так и на само озеро. Со второй половины 70-х гг. прошлого столетия, после снижения внешней фосфорной нагрузки, тенденция уменьшения фосфорного запаса в водной массе озера

продолжает сохраняться, и в настоящее время среднегодовая концентрация общего фосфора уже практически приблизилась к нижней границе мезотрофии. Однако ряд прибрежных районов, наиболее подверженных антропогенному влиянию, характеризуется более высоким трофическим статусом и уровнем загрязнения. К ним относятся заливы северной Ладоги в районе населенных пунктов Приозерск, Лахденпохья, Сортавала, Ляскеля, Импилахти и Питкяранта, у устьев рек Сясь и Свирь, прибрежная зона в бухте Петрокрепость и Волховской губе. Качество вод озера можно охарактеризовать как хорошее и пригодное практически для всех видов водопользования.

7.2. Оценка экологического состояния озера и качества его вод по гидробиологическим показателям

7.2.1. Оценка трофического статуса Ладожского озера

Фитопланктон. Трофический статус водоема имеет ключевое значение для понимания функционирования экосистемы. В современной лимнологии основными показателями трофического статуса считаются первичная продукция и концентрация хлорофилла-а в планктоне (Винберг, 1960; Likens, 1975; OECD, 1982; Бульон, 1983; Китаев, 1984).

Определение трофического статуса крупных глубоководных озер, в частности Ладожского, имеет определенные трудности, связанные с особенностями морфометрии его котловины и гидрофизического режима. Основные факторы, лимитирующие развитие фитопланктона, — это наличие весной и осенью термобара, когда активная вегетация водорослей наблюдается только в мелководных прибрежных районах, занимающих лишь 20% общей площади и 3% водной массы (Гусаков, Тержевик, 1992), и постоянно существующего огромного гипolimниона, где вегетация водорослей из-за отсутствия света невозможна. Малая мощность эвфотного слоя, составляющего не более 10% всей водной массы озера, также ограничивает величину первичной продукции и, как следствие, легкоусвояемого органического вещества, создаваемого в процессе фотосинтеза.

Основной объем органического вещества, создаваемого в процессе фотосинтеза в Ладожском озере, продуцируется в период летней стратификации. Важной функциональной характеристикой озера является и отношение валовой первичной продукции к деструкции органического вещества (А/Д). Величина последнего показателя, особенно под м⁻² поверхности, дает представление о типе функционирования экосистемы в целом. В период развитой летней

стратификации озера скорость фотосинтеза в поверхностном (0–1 м) слое воды в течение всех лет наблюдений изменяется по акватории от 0,17 до 3,4 г O₂ м⁻³ сутки. Максимальные ее значения, как правило, отмечаются в пределах Волховской губы. Деструкция органического вещества колеблется от 0,12 до 1,92 г O₂ м⁻³ сутки, а ее максимальные величины наблюдаются в центральном и северном районах озера. Средние величины первичной продукции для озера, как правило, превышают деструкцию в поверхностном слое (табл. 7.2.1).

Таблица 7.2.1

Средние величины ($X \pm SE$) валовой первичной продукции (А) и деструкции органического вещества (Д) в поверхностном слое (0–1 м) воды (июль – август)

ГОД	г O ₂ м ⁻³ сутки ⁻¹		КОЛ-ВО	А/Д
	А	Д		
1993	0,54 ± 0,05	0,34 ± 0,02	10	1,6
1994	0,81 ± 0,08	0,48 ± 0,05	21	1,7
1995	0,67 ± 0,09	0,35 ± 0,05	20	1,9
1998	0,56 ± 0,08	0,26 ± 0,03	14	2,1
1999	1,18 ± 0,37	0,93 ± 0,28	7	1,3
2000	0,50 ± 0,03	0,24 ± 0,02	16	2,1
2001	0,54 ± 0,05	0,41 ± 0,04	14	1,3
2003	0,99 ± 0,20	0,32 ± 0,05	8	3,1

Для оценки трофического статуса озера и способности его вод к самоочищению необходима оценка первичной продукции и деструкции под м⁻² поверхности. По результатам всех лет наблюдений интегральная продукция по районам озера изменяется от 1,08 ± 0,10 до 1,64 ± 0,17, а деструкция от 1,19 ± 0,12 до 2,29 ± 0,24 г O₂ м⁻² соответственно. Расчет величин первичной продукции и деструкции в пределах гомотермного эвфотного слоя показал, что продукция по акватории меньше, чем деструкция. Максимальная интегральная продукция характерна для Волховской губы, несмотря на меньшую по сравнению с другими районами величину эвфотного слоя, но благодаря лучшей обеспеченности биогенными элементами. Напротив, интегральная деструкция органического вещества выше в северном районе (Летанская, 2004). Отношение валовой первичной продукции к деструкции в Волховской губе составляет 1,4, а в центральном и северном районах 0,6–0,7 соответственно. Известно, что деструкция превышает продукцию в олиготрофных и слабomezотрофных больших и малых озерах (Сорокин, Федоров, 1969; Романенко, 1974; Летанская, 1974, 1978; Трифонова, 1984; del Giorgio, Peters, 1994). Оценка соотношения первичной продукции и

деструкции органического вещества для Ладожского озера в целом, с учетом площадей соответствующих зон, показывает, что эта величина составляет 0,8 (Летанская, 2002), т. е. все новообразованное органическое вещество полностью минерализуется в пределах эвфотного слоя. Это заключение является принципиально важным, поскольку эвфотный слой, как упоминалось ранее, составляет всего 10% объема водной массы озера и для функционирования гетеротрофных организмов необходимы дополнительные источники вещества и энергии. По результатам исследований озера в середине 80-х гг. прошлого столетия количество органического вещества, разрушаемого бактериями в летний период, особенно в его глубоководных районах, значительно превышало первичную продукцию (Капустина, 1992). Аналогичная ситуация сохраняется до настоящего времени. Основным источником вещества и энергии для гетеротрофных организмов является аллохтонное органическое вещество, поступающее с обширного водосбора озера, которое вовлекается в деструкционные процессы и далее через бактериопланктон включается в общий метаболизм планктона. Все это свидетельствует о гетеротрофном типе функционирования экосистемы и высокой самоочистительной способности водоема.

Величина первичной продукции озера для летнего периода в пересчете на углерод колеблется от 200 до 600 мг С м⁻² сутки, что соответствует мезотрофному статусу (Likens, 1975). Мезотрофный статус подтверждается и концентрациями хлорофилла-а — от 4,1 до 8,6 мг м⁻³.

Сравнение результатов современных исследований первичной продукции с аналогичными данными периода антропогенного эвтрофирования водоема показывает, что величина первичной продукции в летний период в 1973–1974 гг. колебалась от 320 до 620 мг С м⁻² (Пырина, Трифонова, 1979) и соответствовала слабomezотрофному статусу. В 1978–1989 гг. величина первичной продукции в летний период изменялась от 150 до 1100 мг С м⁻² (Петрова и др., 1992). Судя по относительной устойчивости этого параметра — 0,1 (Алимов, 1989), ситуация в озере в 1980-е гг. была весьма нестабильна, и его трофический статус можно в разные годы оценивать либо как олиготрофный, либо как мезотрофный. Концентрации хлорофилла-а при этом были достаточно низки (0,7–3,7 мг м⁻³).

Относительная устойчивость этих параметров в последний период исследований озера значительно выше. Для первичной продукции (P_{min}/P_{max}) она составляла 0,3, а для хлорофилла-а — 0,5 соответственно. В период 1993–2003 гг. средняя величина первичной продукции летом составляла 400 мг С м⁻² сутки, а при продолжительности типично летних условий в водоеме не более двух месяцев она составила 24 г С м⁻². Если допустить, что за весну и осень создается примерно такой же объем органического вещества, то величина первичной продукции за сезон не превысит 50 г С м⁻². За предшествующий период эта величина в

среднем составляет около 60 г С м^{-2} , что соответствуют олиго-мезотрофному статусу (ОЕСД, 1982). В то же время концентрационные показатели первичной продукции в поверхностном слое воды (табл. 7.2.1) характерны для мезотрофных водоемов. Несмотря на относительно высокую продуктивность поверхностных вод озера летом по всей акватории, а весной и осенью в прибрежье (см. выше Раздел 6.3.2), уровень его общей продуктивности невелик и сравним с крупными глубоководными озерами олиготрофного типа, такими как Байкал, Иссык-Куль (Бульон, 1983), Верхнее, Гурон, Мичиган (Vollenweider et al., 1974).

Основные факторы, контролирующие уровень первичной продукции — прозрачность, температура и обеспеченность питательными элементами фитопланктона. За рассматриваемый отрезок времени (1974–2003 гг.), был выявлен лишь четкий тренд снижения концентраций соединений фосфора в воде озера с середины 80-х гг. прошлого столетия (Расплетина, Сусарева, 2002).

Анализ собственных и литературных данных показал, что, несмотря на меняющиеся условия среды в озере, четкого тренда в изменении уровня первичной продукции планктона (рис. 7.2.1) не наблюдается.

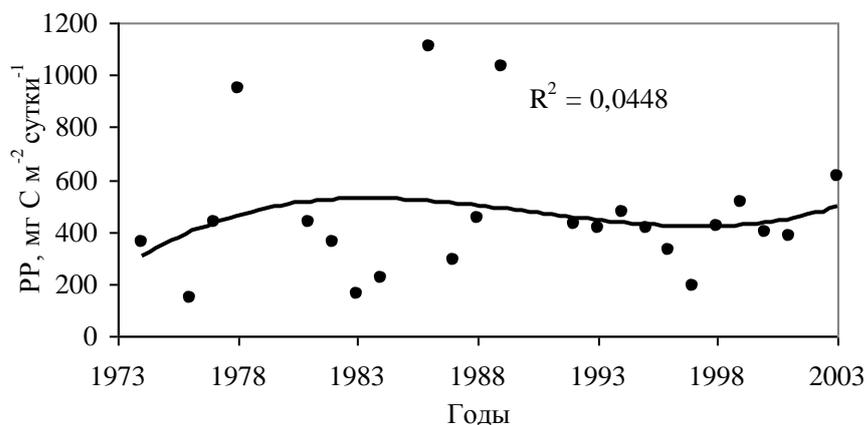


Рис. 7.2.1. Средние значения первичной продукции (PP) планктона в Ладожском озере (июль – август 1973–2003 гг.).

Исследования, проведенные на больших и малых водоемах разных географических зон, показали тесную связь между ростом соединений фосфора в воде и их трофией (ОЕСД, 1982). Появился ряд достаточно простых моделей, связывающих нагрузочные и концентрационные показатели этого элемента с трофией водоемов (Vollenweider, 1968; Dillon-Rigler, 1974; Chapra, 1980). Проблема интенсивного эвтрофирования и загрязнения водоемов и, как следствие,

ухудшение качества их вод, заставила в ряде стран предпринять энергичные меры по сокращению поступления антропогенных стоков. Проведенные после этого исследования показали, что скорость отклика структурно-функциональных показателей фитопланктона зависит от особенностей морфометрии водоемов и их гидрофизического режима. Ведущими факторами при этом являются средняя глубина, водообмен и исходный трофический статус водоема. Исследования североамериканских озер показали, что при сокращении антропогенной нагрузки и концентраций фосфора в воде вдвое озеро Эри перешло из эвтрофного в мезотрофное состояние лишь через 16 лет при водообмене 2,6 года (Gray et al., 1994). Озеро Онтарио перешло из мезотрофного в олиго-мезотрофный статус через 17 лет при водообмене 7,4 года (Johegen et al., 1994).

В Ладожском озере концентрации соединений фосфора в воде озера уже к началу 2000 г. сократились на треть, и эта тенденция продолжается, но изменений в величине первичной продукции и других показателях функционирования фитопланктона не наблюдается. Особенности гидрофизического режима, прежде всего замедленный водообмен (11–13 лет), тормозят отклик фитопланктона на снижение фосфорной нагрузки. Помимо абиотических факторов среды, поддерживающих стабильность трофического статуса в современных условиях, важным является и биотический. Последний заключается в смене доминантов летнего фитопланктона, когда наряду с синезелеными в массе развиваются криптофитовые водоросли, которые также способствуют поддержанию стабильности трофического статуса озера (Летанская, 2000).

Высшие водные растения. Видовой состав и структурные показатели сообществ водных растений традиционно используются для оценки различных видов антропогенного воздействия на водные экосистемы. Наиболее успешно по видовому составу высшей водной растительности можно судить о трофическом статусе литоральной зоны водоемов (Распопов, 2006).

Оценка трофического статуса отдельных участков литорали Ладожского озера по видовому составу высшей водной растительности проводилась с использованием трофического индекса (I), рассчитанного по формуле Зелинки и Марвана (Zelinka, Marvan, 1961). Для расчета экологических оптимумов видов макрофитов по отношению к концентрации $P_{\text{общ}}$ использовались данные о видовой структуре сообщества макрофитов на 24 литоральных станциях (Русанов, 2011). В соответствии со значениями оптимумов виды макрофитов объединяются в группы, различающиеся степенью «сродства» к биотопам разного уровня трофности. Выделяются четыре группы видов, предпочитающих олиготрофные (< 20 мкг P/л),

мезотрофные (21–40 мкг Р/л), эвтрофные (41–100 мкг Р/л) и гиперэвтрофные (> 100 мкг Р/л) условия (рис. 7.2.2).

Связь между трофическим индексом (I) и наблюдаемой концентрацией $P_{\text{общ}}$ описывается линейной зависимостью:

$$\text{Log } P_{\text{общ}} = -0.24 + 0.73 I \quad (r = 0.82; p < 0.001; n = 24).$$

Установленная зависимость может использоваться для прогнозирования уровня $P_{\text{общ}}$ по видовому составу макрофитов. В соответствии со значениями трофического индекса большинство исследованных литоральных станций характеризуются мезотрофным (ст. 8, 10, 12, 13, 15, 17, 19, 20, 22, 26 и 29) и эвтрофным (ст. 1–2, 3–7, 9, 23, 27, 28 и 30) трофическим статусом, и только две станции (ст. 18, 21) относятся к олиготрофным условиям (рис. 7.2.3).

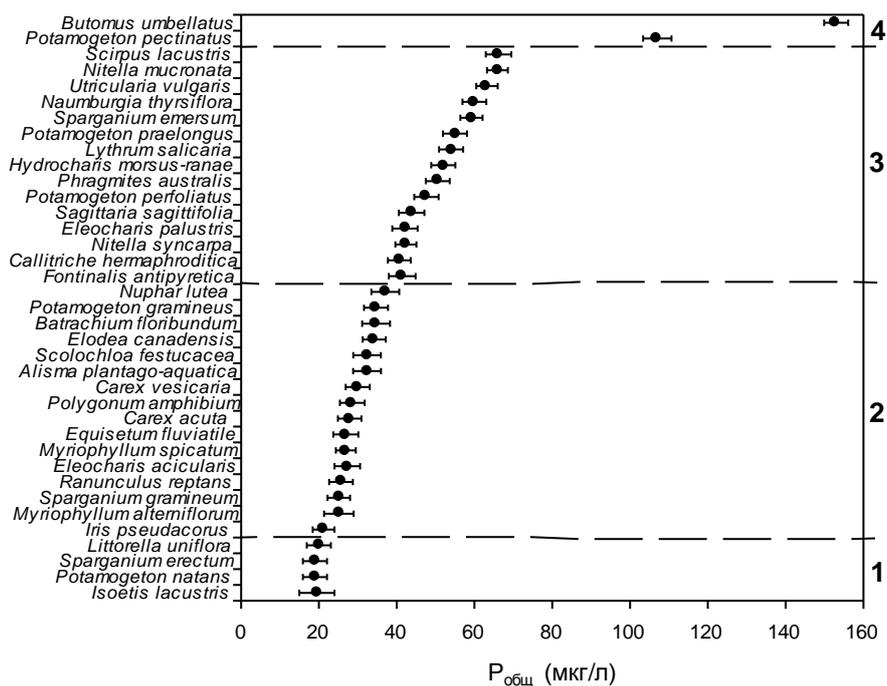


Рис. 7.2.2. Значения оптимумов и границ толерантности видов макрофитов по отношению к концентрации $P_{\text{общ}}$. 1–4 — значения индикаторной валентности видов, предпочитающих (1) олиготрофные (< 20 мкг P/л), (2) мезотрофные (21–40 мкг P/л), (3) эвтрофные (41–100 мкг P/л) и (4) гиперэвтрофные (> 100 мкг P/л) условия.

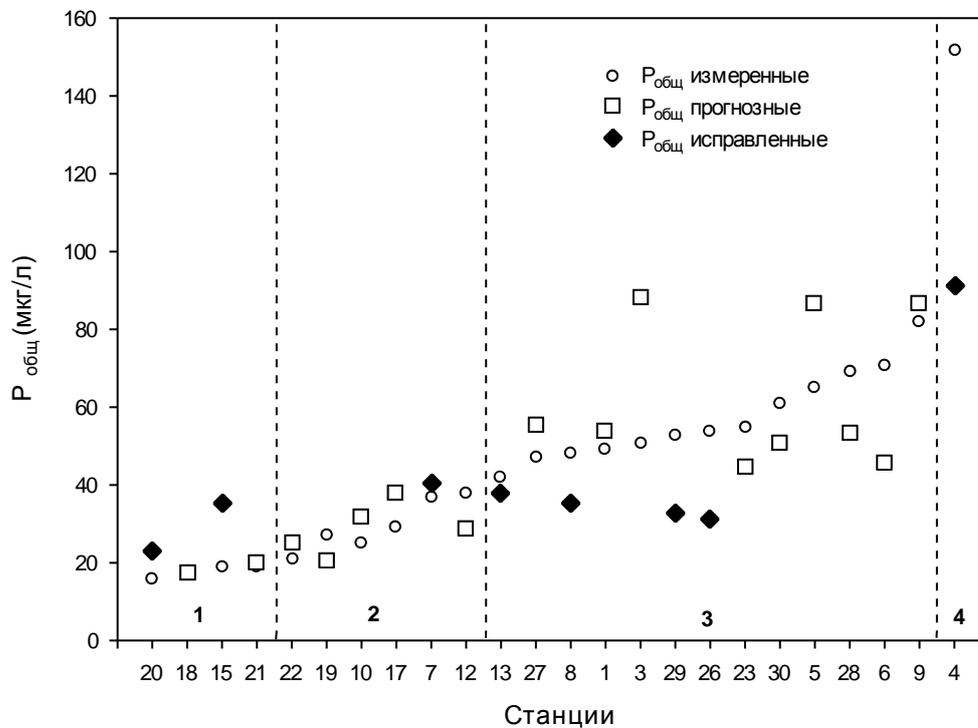


Рис. 7.2.3. Сравнение измеренных и предсказанных моделью значений концентрации $P_{\text{общ}}$. 1–4 — номера групп станций, соответствующих (1) олиготрофным (< 20 мкг P/л), (2) мезотрофным (21–40 мкг P/л), (3) эвтрофным (41–100 мкг P/л) и (4) гиперэвтрофным (> 100 мкг P/л) условиям по измеренным значениям $P_{\text{общ}}$.

На рис. 7.2.4 приводится схема станций описания высшей водной растительности Ладоги с указанием трофических условий, оценка которых проводилась по видовому составу макрофитов. Данная схема позволяет выявить пространственные закономерности в распределении высшей водной растительности в зависимости от трофического статуса

литорали. На схеме видно, что растительные сообщества, характерные для эвтрофных условий, преобладают в южном геоботаническом районе Ладожского озера. Эвтрофный статус района обусловлен влиянием реки Волхов, являющейся основным поставщиком фосфора в Ладогу, и преобладающими течениями, распространяющими воды притока в прибрежье района (Расплетина, 1982).

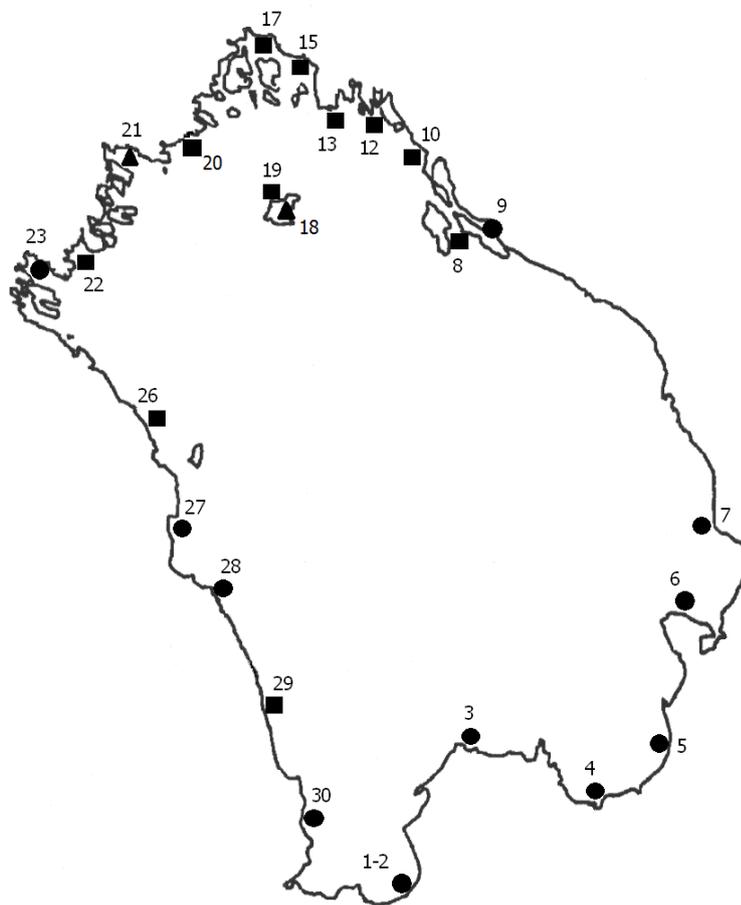


Рис. 7.2.4. Трофический статус литоральных станций (1–30) Ладожского озера, оцененный по видовому составу высшей водной растительности. Олиготрофные условия — треугольники, мезотрофные — квадраты, эвтрофные — кружки.

В растительных сообществах эвтрофного типа наиболее обильны и часто встречаются *Potamogeton perfoliatus*, *Eleocharis palustris*, *Sagittaria sagittifolia* и *Sparganium emersum*. Западное и восточное прибрежье района открытых берегов характеризуется эвтрофными и мезотрофными условиями, причем растительные сообщества эвтрофного типа встречаются как на станциях, испытывающих прямое антропогенное влияние от близлежащих промышленных объектов — ст. 23 (г. Приозерск), так и на станциях, находящихся под влиянием притоков — реки Уксун на ст. 9 (залив Уксунлахти) и реки Бурной на ст. 27 (залив Тайпаловский). Для

района северных шхер и архипелага Валаам характерны в основном растительные сообщества мезотрофного типа, в которых наиболее широко распространены *Potamogeton gramineus*, *Polygonum amphibium*, *Eleocharis acicularis*, *Ranunculus reptans* и *Sparganium gramineum*. Две станции в этом районе — ст. 18 (озеро Сисьярви, архипелаг Валаам) и ст. 21 (залив Якимварский) получают олиготрофный статус благодаря развитию видов-индикаторов олиготрофных условий *Isoëtis lacustris* и *Littorella uniflora*.

7.2.2. Качество воды Ладожского озера по микробиологическим показателям

Высокая скорость размножения и эффективность роста водных микроорганизмов предполагают, что продуцирование бактериальной биомассы представляет собой важное связующее звено между детритом, растворенным органическим веществом и более высокими трофическими уровнями в экосистеме водоемов (Pomeroy, 1974; Cole et al., 1988). Бактериопланктон играет основную роль в минерализации органического вещества в пелагических системах (Кузнецов, 1970; Wetzel, 1982; Cole et al., 1988). Исходя из вышесказанного, интенсивность микробиологических процессов обязательно должна приниматься во внимание при оценке качества воды. Некоторые микробиологические показатели (например, количество сапрофитных бактерий, процентное отношение количества сапрофитных бактерий к общему количеству бактерий, численность бактерий различных физиологических групп) могут также быть эффективны для оценки загрязнения водоемов как органическим веществом в целом (муниципальные стоки, сельскохозяйственные стоки), так и его отдельными группами (фенолы, нефть, целлюлоза и т. д.). Чаще всего для оценки качества воды используется процентное соотношение количества бактерий, растущих на рыбопептонном агаре (РПА) и общего количества бактерий (N). Практически во всех исследованных водоемах соотношение численности сапрофитов и общей численности бактерий колеблется в довольно узких пределах — от 0,003 до 3 (редко более). В зависимости от величины этого показателя можно отнести исследуемые воды к одной из условных групп: «особо чистые», «чистые», «грязные», «особо грязные». Считается, что:

- 1) в особо чистых водах это соотношение составляет 0,003 и менее;
- 2) в чистых водах — 0,003–0,3;
- 3) в грязных водах — 0,3–3;
- 4) в особо грязных — 3 и более (Романенко, 1979; Копылов, Косолапов, 2007).

Процентные соотношения численности сапрофитных бактерий и общей численности бактериопланктона в различных районах Ладожского озера рассчитаны за последние 20 лет.

Для каждого десятилетия эти величины рассчитаны отдельно с целью выяснения их динамики в различные временные периоды (табл. 7.2.2).

Очевидно, что во время всего исследованного периода значения соотношения РПА/Н во всех районах озера попадают в пределы, свойственные условной категории «чистые» и «особо чистые воды». Значения этого соотношения в 1990–2000 гг. мало чем отличаются от таковых в 2001–2009 гг., что говорит о стабильно высоком качестве вод Ладожского озера.

При определении качества воды важно выделять группы бактерий, свидетельствующих о наличии наиболее распространенного вида загрязнения — хозяйственно-бытового и в том числе фекального загрязнения, которое представляет особую опасность. Через воду передаются многие болезни, возбудители которых могут долгое время оставаться в воде жизнедеятельными. Болезнетворных бактерий немного и обнаружить их трудно, поэтому необходимо отслеживать вообще всякое фекальное загрязнение воды. При этом типе загрязнения в воде оказывается огромное количество бактерий, из которых значительную часть составляет *E. coli* (кишечная палочка) и схожие с ней бактерии, которые при определенных обстоятельствах могут вызывать кишечные инфекции. Эта группа бактерий (общие колиформные бактерии — ОКБ) является интегральным показателем степени фекального загрязнения, обладающим индикаторной надежностью в отношении возбудителей бактериальных кишечных инфекций (Медицинская микробиология, 1999).

Таблица 7.2.2.

Процентное соотношение численности бактерий, растущих на рыбобептонном агаре (РПА) и общей численности бактериопланктона (N) в различных районах Ладожского озера в летний период

Район	1990–2000 гг.	2001–2009 гг.
Прибрежный	0,005 ± 0,002	0,004 ± 0,002
Деклинальный	0,0004 ± 0,001	0,0005 ± 0,004
Профундальный	0,0004 ± 0,001	0,0003 ± 0,002
Ультрапрофундальный	0,0003 ± 0,001	0,0003 ± 0,002

В 2006–2008 гг. определялись значения этого показателя и изучалась их сезонная динамика в центральном и западном прибрежном районах Ладожского озера. Это было связано с возможностью использования водных масс этих районов в качестве альтернативного источника водоснабжения г. Санкт-Петербурга (табл. 7.2.3, 7.2.4, 7.2.5).

а) Таблица 7.2.3.

б) Величины численности общих колиформных бактерий (ОКБ, КОЕ*/л) в Ладожском озере в весенний период

Район	2006	2007	2008
Центральный	—	не обнаружено	не обнаружено
Западный прибрежный	—	160	70

а)

б) * КОЕ — колониобразующая единица, т. е. отдельная колония микроорганизмов,

а) Таблица 7.2.4

б) Численность общих колиформных бактерий (ОКБ, КОЕ/л) в Ладожском озере в летний период

Район	2006	2007	2008
Центральный	—	—	не обнаружено
Западный прибрежный	—	—	80

а) Таблица 7.2.5.

б) Численность общих колиформных бактерий (ОКБ, КОЕ/100 мл) в Ладожском озере в осенний период

Район	2006	2007	2008
Центральный	4	—	не обнаружено
Западный прибрежный	70	630	100

Для оценки качества воды водных объектов, используемых в различных целях, применяются различные классификации. Использована экологическая классификация, построенная на основе органолептических, токсикологических, санитарных и бактериологических показателей состояния водоема. Характеристикой состояния водного объекта служит степень его загрязнения по четырем градациям (Опекунов, 2001) (табл. 7.2.6).

Таблица 7.2.6.

Экологическая классификация водных объектов по бактериологическим показателям качества воды

Количество ОКБ (КОЕ/л)	Индекс загрязнения	Возможность использования водоема
$< 1 \times 10^4$	0	Для всех видов использования
$1 \times 10^4 - 1 \times 10^5$	1	Предварительная очистка воды перед использованием для питьевого водоснабжения
$> 1 \times 10^5 - 1 \times 10^6$	2	Запрет на использование для питьевого водоснабжения
$> 1 \times 10^6$	3	Полная непригодность для всех видов использования

а)

б)

Полученные результаты свидетельствуют, что качество воды в исследованных районах Ладожского озера во все сезоны по санитарно-микробиологическим показателям соответствует низшему классу загрязнения — нулевому, т. е. воды пригодны для всех видов использования, в том числе и для питьевого водоснабжения, а также для рекреации. Особой чистотой отличаются воды центральной части озера и воды на глубоководных станциях у западного побережья, особенно на нижних горизонтах.

7.2.3. Индикация экологического состояния Ладожского озера по зоопланктону

Подробный анализ структуры и функционирования сообщества зоопланктона разнотипных озер, по которым имелись данные за полный вегетационный период, позволили сделать вывод о высокой информативности структурных показателей зоопланктона и значительно дополнить набор показателей (Андроникова, 1996, 2007) (табл. 7.2.7, 7.2.8). Очевидно, что в указанных целях используются тест-системы биоценологического уровня. В качестве дополнительной информации возможно использование видов-индикаторов трофического типа водоема, т. е. показателей популяционного уровня. Также могут

использоваться и виды-индикаторы сапробности, которые, как правило, хорошо соотносятся с оценками трофического типа, причем это в равной степени относится к организмам как фито-, так и зоопланктона (Nakkarí, 1972; Макрушин, 1974; Трифонова, 1984). Для показателей эвтрофирования значение имеют не только абсолютные величины, но и тренд и скорость изменений, приводящая к новому рангу водоема в классификационных шкалах. Такие данные могут быть получены только при условии длительных рядов наблюдений.

В исследованиях Ладожского озера зоопланктон как биоиндикатор использовался для определения трофического статуса озера с учетом его районирования, связанного со сложной морфометрией водоема, идентификации процесса эвтрофирования и выявления наиболее загрязненных участков (или зон экологического риска) в прибрежных районах. В озере выделены семь лимнических районов (Науменко, Каретников, 2002). В мелководный район включается литоральная зона (до глубины 8 м), которая, в свою очередь, разделяется на четыре района, определяемые не только морфометрией, но и развитием высшей водной растительности (Прибрежно-водные экотоны..., 1998).

Показатели, на основе которых определен трофический статус отдельных районов, приведены в таблице 7.2.7. Более подробные сведения имеются в других публикациях (Andronikova, 1996; Андроникова, 2002). Центральный район, включающий максимальные глубины, неоднозначен по своему трофическому статусу, и его следует определять для двух слоев — эпилимниона, глубина которого колеблется в зависимости от прогрева водной массы, и гипolimниона. Эпилимнион оценивается как слабomezотрофный, гипolimнион — как олиготрофный. Следует отметить, что, если расчеты выполнены для всего столба воды и представлены как средневзвешенные величины, трофический тип пелагиали определяется как олиготрофный. Очевидно, что эта величина некорректна, т. к. каждый из слоев относится к разным трофическим типам.

Таблица 7.2.7.

Классификационные шкалы для определения трофического статуса озерных экосистем по показателям зоопланктона

Показатели	Автор	Трофический тип озера			
		олиготрофный	мезотрофный	эвтрофный	гипер-эвтрофный
V_z — средняя биомасса за летний сезон,	Китаев, 1984	< 0,5–1,0	1,0–4,0	4,0–16,0	> 16,0 ?

г/м ³					
N _z — средняя численность за вегетационный период, экз/м ²	Blancher, 1984	1x10 ⁵	3x10 ⁵	8x10 ⁵	≥ 10x10 ⁶
E — коэффициент трофии *	Мяэметс, 1979	< 0,2	0,2–1,0	1,0–4,0	> 4,0
E/O — показатель трофии **	Hakkari, 1978	< 0,5	0,5–1,5	1,5–5,0	> 5,0
Q _{BT} ***	Sladecsek, 1983	< 1,0	1,0–2,0	> 2,0	—
H _{бит} — индекс разнообразия Шеннона по биомассе	Обобщение литературных данных (Андроникова, 1996)	4,0–2,6	2,5–2,1	2,0–1,0	Близок к эвтрофному

Примечание:

* E = K (x + 1)/[(A + V)(y + 1)], где K — число видов *Rotatoria*, A — *Copepoda*, V — *Cladocera*; x — число мезо-эвтрофных видов, y — число олиго-мезотрофных видов

** E/O — отношение числа видов-индикаторов эвтрофного и олиготрофного типов

*** Q_{BT} — отношение числа видов рода *Brachionus* к числу видов рода *Trichocerca*

Районы открытой литорали западного и восточного берегов, а также южные заливы (Бухта Петрокрепость, Волховская и Свирская губы) относятся к мезотрофному типу. Северные шхеры характеризуются большим разнообразием трофических состояний — от олиготрофного типа до эвтрофного с преобладанием мезотрофных водоемов. Следует сказать, что сильно заросшие высшей водной растительностью участки с обильно развитым фитофильным зоопланктоном характеризуются очень высокими биомассами (до 164 г/м³), не отмеченными нигде более в Ладожском озере. Индексы разнообразия Шеннона характеризуют здесь особенности структуры сообщества, а не трофический тип водоема. Названные показатели не вписываются ни в какие классификационные шкалы, но очевидно, что биологическая продуктивность этих участков несопоставимо высока по сравнению с другими районами или участками водоема. Заросли макрофитов с обильной фитофильной фауной (планктон и бентос) представляют собой особую экосистему в экосистеме более высокого ранга, в данном случае озера или его

литеральной зоны. В целом северные шхеры имеют более высокий трофический статус по сравнению с открытой литоралью и эпилимнионом пелагиали и могут быть оценены как мезо-эвтрофные.

Таблица 7.2.8

Показатели сообщества зоопланктона, рекомендуемые для оценки процесса эвтрофирования в озерных экосистемах. 'n' — число озер, используемых для обобщения (по: Андроникова, 1996)

Показатели	n	Автор	Тренд показателя
Число доминирующих видов	16	Собственные данные	↓
Е/О	-	Наккари, 1972	↑
Е	-	Мяэметс, 1979	↑
Q _{в/т}	-	Sladecsek, 1983	↑
Индекс Шеннона по биомассе	120	Обобщение литературных данных	↓
Доля Rotatoria и Cladocera общей N	381	“ _ “	↑
В	246	“ _ “	↑
Доля Соперода общей N	381	“ _ “	↓
В	246	“ _ “	↓

Показатели	n	Автор	Тренд показателя
B_{Crust}/B_{Rot} (без Asplanchna)	59	“ _ “	↓
B_{Cycl}/B_{Cal}	15	“ _ “	↑
$N_{Cal}/N_{Clad+Rot}$	-	Gannon & Stemberger, 1978	↓
N	381	Обобщение литературных данных	↑
B	246	“ _ “	↑
$w = B/N$	75	“ _ “	↓
$B_{летн}/B_{зимн}$	59	“ _ “	↑
$B_{хищн}/B_{мирн}$	64	“ _ “	↓
R/B для сообщества в целом	79	“ _ “	↑
B_{zoo}/B_{phyto}	102	“ _ “	↓

Длительный ряд наблюдений, позволяющий проследить за процессом эвтрофирования Ладожского озера, охватывает период с 1948 г. по настоящее время. Собственные наблюдения завершились в 1990-е гг., их анализ относится к летнему сезону, когда зоопланктон достигает максимального развития в годовом цикле. Этот ряд разделен на четыре периода по

десятилетиям: 1950-е – 1960-е гг. (среднее), 1970-е, 1980-е и 1990-е гг. Анализ данных, полученный разными авторами, представлен в публикации Андрониковой (Andronikova, 1996). Современное состояние сообщества описано выше, в Разделе 6.5 настоящего сборника. Обобщение данных почти пятидесятилетнего периода не исключало сложности их сопоставления. Материал собирался в различные сроки летнего сезона планктонными сетями с разной ячейкой, не всегда указывались слои облова, наряду с величинами для м^3 приводились данные под м^2 без указания глубины станции и т. д. Имели место пропуски отдельных годов или ряда лет, когда Ладожская экспедиция работала на других водоемах. Несмотря на все сказанное, полученные цифры оказались удивительно стабильными. Так, диапазон численности для столба воды 0–70 м составлял от 11,1 до 16,4 тыс. экз./ м^3 , биомассы — от 214 до 298 мг/ м^3 , т. е. количественные показатели не выходили за пределы олиготрофного типа. Данные для эпилимниона (0–10 м) за три десятилетия — 1970-е, 1980-е и 1990-е гг., были несколько выше и составляли соответственно 70 ± 25 , 90 ± 20 , 53 ± 10 тыс. экз./ м^3 , биомасса — 1200 ± 460 , 930 ± 192 , 601 ± 217 мг/ м^3 , в среднем, 910 мг/ м^3 , что является граничной величиной между олиготрофным и слабomezотрофным типами (Китаев, 1984).

Попытка обратиться к показателям таксономической структуры, в частности соотношению основных таксономических групп для столба воды 0–70 м, не выявила закономерностей, характеризующих процесс эвтрофирования. Слабый тренд этого процесса прослеживался в эпилимнионе. К концу 1990-х гг. в по сравнению с 1970-ми гг. несколько увеличилась биомасса коловраток (45 против 33%), биомасса *Copepoda* уменьшилась (19 против 34%). *Cladocera* — основные представители эвтрофных водоемов — показали стабильность (33–35%). Отношение $N_{\text{Clad}}/N_{\text{Cop}}$ увеличилось от 0,40 до 0,53, $B_{\text{Cycl}}/B_{\text{Cal}}$ — от 1,0 до 1,4. Эти незначительные изменения показателей статистически не подтверждены. Более показательными оказались данные для *Limnocalanus macrurus*. Его численность для столба воды 0–70 м уменьшилась в 3 раза, для слоя гиполимниона — в 6 раз. Определить более информативные упомянутые выше показатели для гиполимниона не представляется возможным, т. к. *Cladocera* здесь отсутствуют, а *Copepoda* авторами публикаций не разделялся на п/отр. *Cyclopoida* и *Calanoida*.

Таким образом, имеющиеся данные не выявили глубоких изменений в сообществе за столь длительный период. По показателям зоопланктона водоем не приблизился к рангу эвтрофного типа не только по количественным показателям, но и по таксономическому составу, где среди массовых видов отсутствовали индикаторы эвтрофии. Статус пелагиали Ладожского озера, включающей мелководную зону с заливами и слой гиполимниона, по-прежнему определяется как олиго-мезотрофный, а эпилимнион центрального района следует отнести к слабomezотрофному.

Проблема техногенного и токсического загрязнения водоемов в последние десятилетия приобрела значительно большую актуальность по сравнению с эвтрофированием. Следует отметить, что ответная реакция сообщества на техногенное загрязнение носит принципиально иной характер по сравнению с действием избытка биогенных элементов или органического вещества, приводящего к эвтрофированию. Экосистема продолжает функционировать в ранге нового трофического статуса. В случае же действия техногенного загрязнения преобразования носят иной характер — наряду со значительными изменениями структурных характеристик наблюдаются глубокие нарушения функционирования сообщества, и его постепенная деградация, наконец, гибель в экстремальных условиях и образование «мертвых зон». В районах сильного загрязнения, где концентрация сточных вод значительно выше, ответные реакции зоопланктона проявляются более четко. Разнообразие этих реакций велико, соответствуя не только разнообразию загрязнителей, но и их непредсказуемым сочетаниям. Биоиндикация проявляется здесь на двух уровнях — биоценоотическом и организменном. В первом случае это сокращение видового состава, выпадение более крупных таксономических групп, несбалансированная таксономическая структура, резкое снижение количественных показателей и утрата основных функций в экосистеме.

Реакции зоопланктона на организменном уровне свидетельствуют о влиянии токсических веществ. У *Cladocera* это бледная окраска тела, раскрытые створки, выброс несформировавшейся молодежи, резорбция яиц в выводковых сумках; распавшиеся колонии *Conochilus*, лизис тканей *Asplanchna*, различные морфопатологии, например, двойной карапакс у *Crustacea*, изменение строения фурок или пятой пары ног у *Copepoda*, новообразования (различные опухоли) и, наконец, наличие мертвых особей. Подобные ответные реакции несвойственны для ситуаций, связанных с процессом эвтрофирования.

В результате многолетних комплексных исследований прибрежных районов Ладожского озера выявлены наиболее загрязненные участки, определяемые как «зоны экологического риска». Ярким примером является Щучий залив, который около 30 лет принимал стоки Приозерского ЦБК и превратился в полностью деградированную экосистему. В середине 80-х гг. прошлого века загрязнения из этой «мертвой зоны» двигались вдоль западного берега к истоку реки Невы. В 1986 г. ЦБК был закрыт. Мониторинг залива, продолжавшийся в течение 20 лет после закрытия комбината (1986–2006 гг.), позволил проследить становление новой экосистемы, где экологическая ситуация несколько раз изменялась в связи с перепрофилированием или началом работы новых предприятий (Андроникова, 1993, 2008, 2011; Andronikova, 1997; Прибрежно-водные экотоны..., 1998; Raspopov et al., 2003; Андроникова, Распопов, 2007).

Развитие сообщества чередовалось с его деградацией — сокращением видового состава, резким изменением таксономической структуры, снижением количественных показателей в десятки и сотни раз. Отмечены признаки морфопатологии и другие негативные изменения у особей кладоцер и коловраток. В условиях прекращения техногенного воздействия восстановление зоопланктона и выравнивание трофического статуса залива с примыкающей литоралью озера, относящейся к мезотрофному типу, произошло через 15 лет.

Среди зон экологического риска особо следует отметить Питкярантские шхеры, куда до конца 1990-х гг. поступали сточные воды крупного ЦБК. Показатели зоопланктона также свидетельствовали о негативном влиянии стоков, наблюдался обедненный видовой состав и резко деформированная таксономическая структура. На организменном уровне отмечена массовая гибель *Asplanchna priodonta* и опухолевые образования у особей *Limnocalanus macrurus* (до 30% от общей численности). В районе пос. Ляскеля обнаружена «мертвая зона» вблизи деревообрабатывающего предприятия. В зоопланктоне обнаружен единственный обитатель — *Thermocyclops oithonoides*. Состояние зоопланктона в Бухте Петрокрепость, Волховской губе и Сортавальской шхере подробно рассматривается в ряде публикаций (Андроникова, Распопов, 2007; Андроникова, 2011). Эти материалы позволили составить схему расположения зон экологического риска в Ладожском озере (рис. 7.2.5).

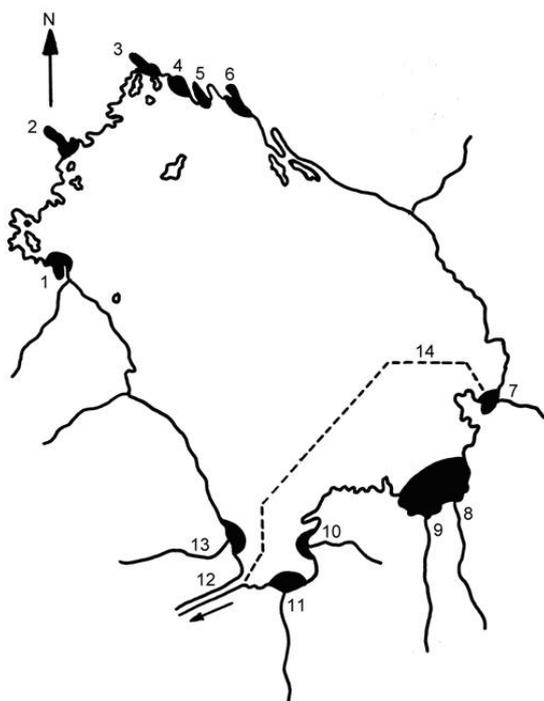


Рис. 7.2.5. Зоны экологического риска в прибрежных районах Ладожского озера у городов: 1 — Приозерск, 2 — Лахденпохья, 3 — Сортавала, 6 — Питкяранта; у поселков: 4 — Ляскеля, 5 — Импилазти; у устьев рек: 7 — Свирь, 8 — Сясь, 9 — Волхов, 10 — Кобона, 11 — Назия, 13 — Морья; 12 — Нева, 14 — фарватер (по: Андроникова, Распопов, 2007).

Отметим также, что в 1991 г. сотрудниками ВНИИ геологии и минеральных ресурсов Мирового океана были выделены аналогичные зоны наибольшего загрязнения в Ладожском озере на основе гидрохимических, санитарно-биологических данных, а также биотестирования с использованием культуры ресничной инфузории (Геоэкология Ладожского озера, 1995). На основе выполненных исследований нами сделаны следующие выводы:

1. В пелагической зоне открытых районов Ладожского озера в настоящее время не наблюдается серьезных экологических нарушений. Трофический тип определяется здесь как олиго-мезотрофный, район мелководья — как мезотрофный, а водоемы северных шхер — как мезо-эвтрофные.

2. Иная ситуация отмечена в литоральной зоне, где выявлены участки, расположенные вблизи источников загрязнения, которые качественно идентифицируются как «зоны экологического риска». Это вызывает определенную тревогу, т. к. сточные воды техногенного характера распространяются в направлении открытого озера, при этом загрязняющие вещества никуда не исчезают. Их концентрация в воде и донных отложениях постепенно повышается, они включаются в трофическую цепь вплоть до ее высшего звена — рыб.

3. Особую опасность для центральных районов представляют стоки Питкярантского ЦБК, которые с 1991 г. стали поступать в открытую Ладогу. Больше внимание следует уделить районам вблизи истока реки Невы — Бухте Петрокрепость и Волховской губе, а также Щучьему заливу, загрязненные воды которого вдоль западного берега также движутся к истоку Невы. В этих районах следует продолжать мониторинг, и его программа, безусловно, должна быть комплексной.

7.2.4. Макробентос как индикатор состояния озера

Макробентос широко используется в различных странах при мониторинге континентальных водоемов. Бентосные биоценозы закреплены локально, поэтому лучше других сообществ характеризуют экологическое состояние конкретного биотопа. Донные беспозвоночные отличаются сравнительно длительными жизненными циклами и могут интегрировать эффекты внешних воздействий за долгий период, а также реагировать на происходящие изменения перестройками структуры сообщества и количественного развития.

В настоящее время разработано достаточно много систем биологической индикации и структурных экологических показателей для оценки качества вод (Макрушин, 1974; Руководство по методам..., 1983; Шитиков и др., 2005). Однако существует ряд водоемов, где естественные факторы среды (рН, мутность, общая минерализация и т. д.), отклоняясь от оптимальных для большинства видов значений, создают специфический облик фауны с резко

обедненным видовым составом. Таким лимитирующим природным фактором в Ладожском озере является его глубина (до 230 м) и, как следствие, постоянно низкие температуры воды в придонном слое. В глубоководных районах, особенно ниже изобаты 100 м, биоценозы вполне стабильные и нормально функционирующие представлены небольшим видовым составом организмов. Индекс видового разнообразия бентоса низок. Кроме того, на глубинах 18–70 м невысокие значения индекса Шеннона часто обусловлены доминированием реликтовой амфиподы *Monoporeia affinis* Lindstr. Поэтому все критерии, основанные на обеднении видового состава бентоса и упрощении структуры биоценозов при загрязнении водоема не могут быть применены в профундали озера (Слепухина, 1987).

Не дает хороших результатов еще ряд методов, основанных на использовании крупных таксонов (олигохет, хирономид, и т. п.) либо на чисто количественных соотношениях (резкое повышение биомассы, уменьшение количества таксонов) (Слепухина, Алексеева, 1982). Например, неприменим критерий относительного содержания олигохет — индекс Гуднайта и Уитлея (Goodnight, Whitley, 1961), т. к. в глубоководной части озера, наиболее удаленной от мест загрязнения, на дне доминируют олигохеты, характерные для олиготрофных озер. Также ограничен в использовании биотический индекс Вудивисса (Woodiwiss, 1964), поскольку, за исключением узкой полосы литорали, большинство из указанных Ф. Вудивиссом групп отсутствует. Количество присутствующих групп уменьшается с глубиной, что отнюдь не свидетельствует о загрязнении центра озера. Поэтому возможно применять только те методы, где учитывается экология каждого вида (Слепухина, 1991), например, метод Пантле и Бук (Pantle, Buck, 1955).

Обилие и биомасса беспозвоночных, их многолетние изменения могут быть хорошими критериями оценки экологического состояния вод. Известно, что надежным показателем увеличения биогенной нагрузки, длительной эвтрофикации водоема является повышение биомассы зообентоса по годам (Яковлев, 1988). Сравнительный анализ показал, что основной тенденцией, наблюдаемой на протяжении 50 лет исследования макробентоса, является постепенное увеличение количественных показателей, особенно в глубоководных районах (глубины более 140 м), где в 1990-е гг. частично произошла замена видов олигосапробного комплекса олигохет видами α -мезосапробными (Барбашова, Слепухина, 2002). Сообщества макробентоса на глубинах 50–140 м остаются достаточно стабильными в течение длительного периода времени. Относительная устойчивость глубоководных биоценозов сохраняется благодаря инерции всех лимнологических процессов в центральной части озера. Однако значения численности и биомассы бентоса несколько выросли по сравнению с 60-ми гг. прошлого столетия, что свидетельствует о повышении трофического статуса донных биотопов.

Динамика распределения ледниковых реликтов также представляет интерес как индикатор изменений, происходящих в озере. В 1970-е и 1980-е гг. сокращается численность наиболее чувствительных к эвтрофикации и загрязнению водной среды характерных для Ладоги реликтовых ракообразных *Pallasiola quadrispinosa* (Sars) и *Relictocanthus lacustris* (Sars) (Slepukhina et al, 1996). Эти виды переносят лишь слабую степень загрязнения органическими и токсическими веществами и служат показателями олиго-β-мезосапротоксобной зоны. В начале 1990-х гг. антропогенный пресс на озеро уменьшился, экологические условия улучшились, выпавшие и редкие виды снова стали появляться в донных биоценозах. В 1995 г. впервые после долгого перерыва был обнаружен *R. lacustris*, который в настоящее время встречается гораздо реже, чем *P. quadrispinosa*. В последние годы у открытых берегов озера на глубинах 20–50 м все чаще отмечается ледниково-морской реликт — изопода *Saduria entomon* (L.).

Прибрежная зона с глубинами менее 18 м чрезвычайно неоднородна. Смена природных биотопов, различные по характеру и интенсивности антропогенные воздействия обуславливают неравномерность распределения фауны по периметру озера. Сообщества макробентоса литоральной зоны озера характеризуется значительным видовым богатством, высокой скоростью сукцессий биоценозов по сравнению с центральной сравнительно стабильной зоной. Поэтому здесь вполне приемлемы некоторые традиционные методы оценки качества вод.

Кроме антропогенного эвтрофирования на некоторых участках озера наблюдается токсическое загрязнение среды. Показателем этого загрязнения может быть процент особей гидробионтов с морфологическими уродствами. Подобные отклонения в строении ротового аппарата личинок хирономид и морфологии щетинок олигохет отмечались в загрязненных биотопах Сортавальских шхер у пос. Ляскеля (Davydova et al, 1992), близ выпусков сточных вод в районе г. Питкяранта и в Щучьем заливе у Приозерска (Slepukhina et al, 1996), в Волховской губе (Slepukhina, Kurashov, 1999). В мелководном районе участки интенсивного антропогенного воздействия чередуются с менее нарушенными участками (восточное и западное побережье) и чистыми заливами (прибрежье острова Валаам, остров Путсари и залив Хауккалаhti).

Ладожское озеро является основным источником питьевого водоснабжения г. Санкт-Петербурга. В настоящее время юго-западный район озера рассматривается как один из вариантов зоны выбора альтернативного водозабора. Для оценки качества вод в этом районе озера использовался интегральный индекс Балушкиной (IP), который был апробирован на системе Ладожское озеро — река Нева — Восточная часть Финского залива (Балушкина и др., 1996). Этот индекс учитывает различные характеристики донного сообщества: наличие видов индикаторов сапротоксобности, соотношение индикаторных групп животных более высокого таксономического ранга, степень доминирования отдельных групп и структуру сообщества в целом. В IP (Балушкина, 1997) включены: индекс сапротоксобности Яковлева, биотический

индекс Вудивисса в модификации Яковлева (Яковлев, 1988), хирономидный индекс Балушкиной (Балушкина, 1987) и индекс Гуднайта и Уитлея. Анализ индексов показал, что качество вод по данным разных лет (1994–2005 гг.) колеблется от «чистых» до «умеренно загрязненных». Видовой состав и уровень количественного развития донных биоценозов остается практически неизменным. Биоиндикация, проведенная по макробентосу, показывает высокое качество вод в юго-западном районе озера (Барбашова, 2007).

Структурные характеристики зообентоса и его количественные показатели могут также использоваться при оценке трофического статуса различных районов разнообразного по своей морфометрии водоема. Центральная часть озера относится к олиго-слабомезотрофному типу, зона открытой литорали и южные заливы — к мезотрофному, в северном шхерном районе, в зависимости от изоляции и степени загрязнения различных участков, представлены все трофические типы от олиготрофного до высокоэвтрофного.

Таким образом, многолетние изменения макробентоса, его количественное развитие, структурные и функциональные характеристики в различных участках озера отражают экологическое состояние водоема и могут быть основой для его прогноза.

7.2.5. Мейобентос как индикатор состояния озера

Проводившиеся с начала 80-х гг. XX в. исследования мейобентоса Ладожского озера застали время, когда большие площади озера содержали еще ненарушенные сообщества донной мейофауны. Изменения мейобентоса под влиянием антропогенного фактора наблюдались в отдельных губах на юге Ладоге и некоторых заливах в северной шхерной зоне озера (Курашов, 1994).

Состав мейобентоса и его количественное развитие на станциях в открытых районах озера в годы исследований до середины 1990-х гг. не отличались в пределах незначительных межгодовых различий. Повышение количественных показателей мейобентоса в период 1991–1994 гг. по сравнению с состоянием, наблюдавшимся до 1986 г., указывало на определенную тенденцию, но было статистически не достоверно (Курашов, 2002). При этом увеличение количественных показателей мейобентоса в открытой зоне Ладожского озера не сопровождалось изменением его видовой и трофической структур. В результате подробных исследований (Курашов, 1997) было показано, что в «норме» (олиготрофный период состояния экосистемы) для Ладожского озера совершенно не характерно образование в донных биотопах профундали скоплений диапаузирующих копеподитов планктонных циклопов. Рисунок 7.2.6 демонстрирует типичную структуру сообщества мейобентоса на станциях в центральной и глубоководной зонах озера на глубинах 60, 65 м (ст. 82 и ст. 55) и 190 м (ст. 105).

В профундальных биотопах, подверженных антропогенному воздействию, диапаузирующие циклопы становятся доминирующим компонентом донной мейофауны (30–98% суммарных численности и биомассы мейобентоса). Такие заметные изменения мейобентоса наблюдались до середины 1990-х гг. на участках акватории, непосредственно примыкающих к источникам загрязнения (заливы и шхеры), но не отмечались в открытых районах Ладоги (Курашов, 1997).

Особенностью результатов исследований последних лет XX – начала XXI в. (1998–2004 гг.) является то, что в пробах из центральной зоны Ладоги (глубины от 50 до 220 м) стали обнаруживаться большие количества диапаузирующих циклопов преимущественно рода *Cyclops*, чего в более ранние годы на этих станциях не отмечалось. В наиболее глубокой зоне озера (150–220 м) такие скопления диапаузирующих циклопов стали обнаруживаться начиная с 1999 г. Исследования 2001–2004 гг подтвердили стабильность произошедших изменений в структуре мейобентоса Ладоги (рис. 7.2.7).

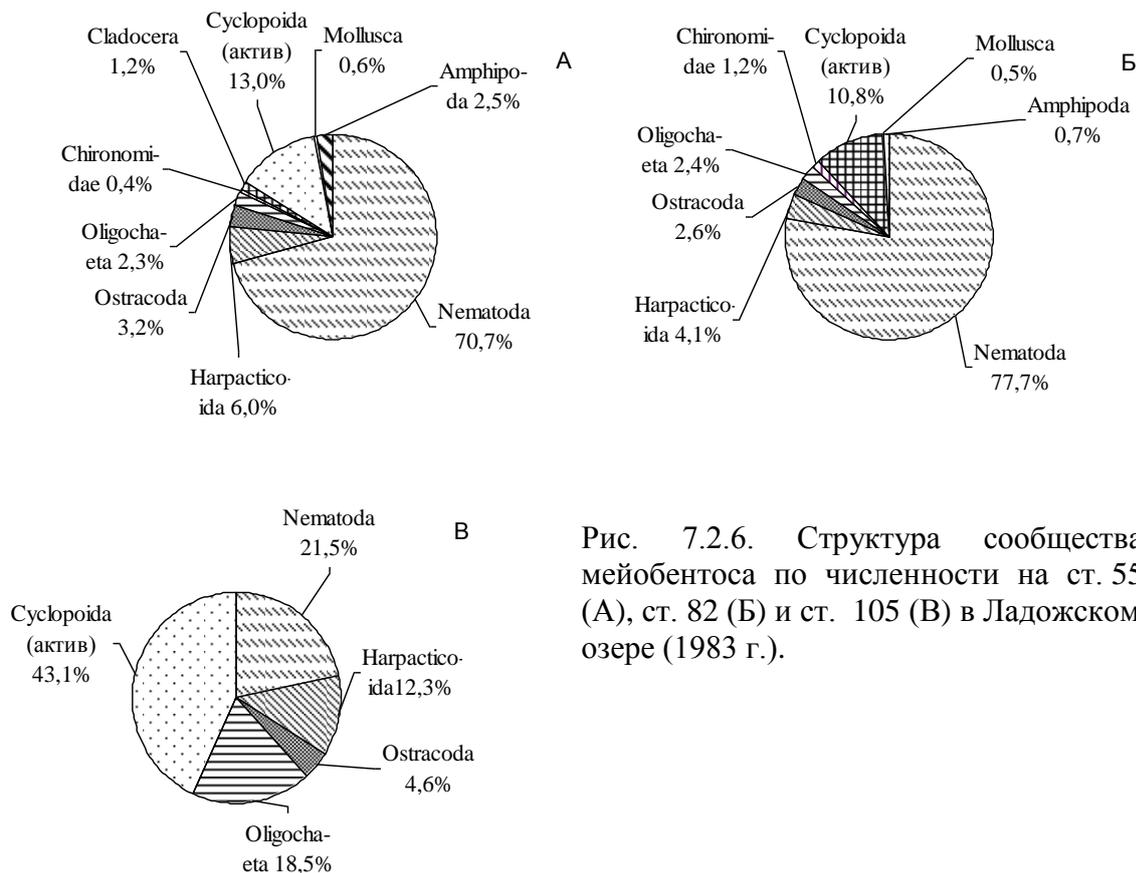


Рис. 7.2.6. Структура сообщества мейобентоса по численности на ст. 55 (А), ст. 82 (Б) и ст. 105 (В) в Ладожском озере (1983 г.).

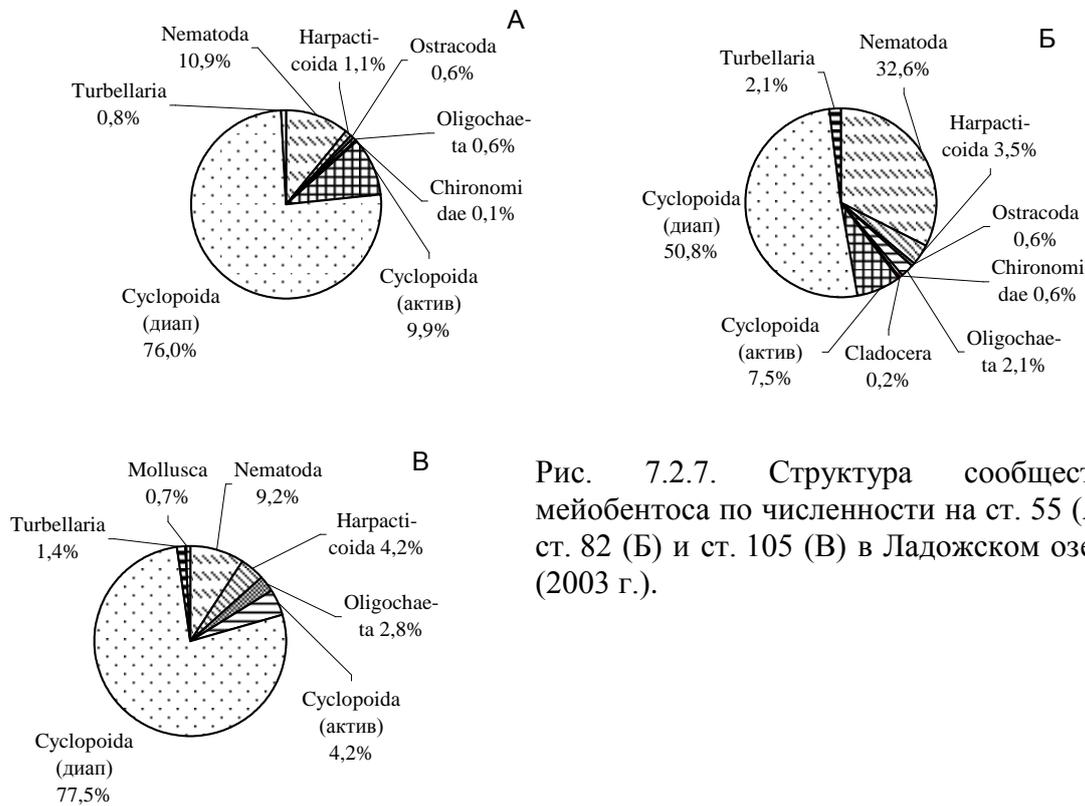


Рис. 7.2.7. Структура сообщества мейобентоса по численности на ст. 55 (А), ст. 82 (Б) и ст. 105 (В) в Ладожском озере (2003 г.).

Следует обратить внимание еще на одно существенное изменение, касающееся количественного развития мейобентоса в биотопах открытой Ладоги. В самой глубоководной части Ладоги (180–220 м) биомасса мейобентоса никогда не превышала 100–150 мг м⁻². Однако в 1999 г. на глубине 220 м была зафиксирована общая биомасса 684 мг м⁻², а к 2003 г. биомасса достигла почти 3 г м⁻² при численности свыше 50 тыс. экз. м⁻². Значительное увеличение количественных показателей мейобентоса было отмечено и на других станциях центральной части озера, особенно на ст. 55, где средняя биомасса составила 5,5 г м⁻².

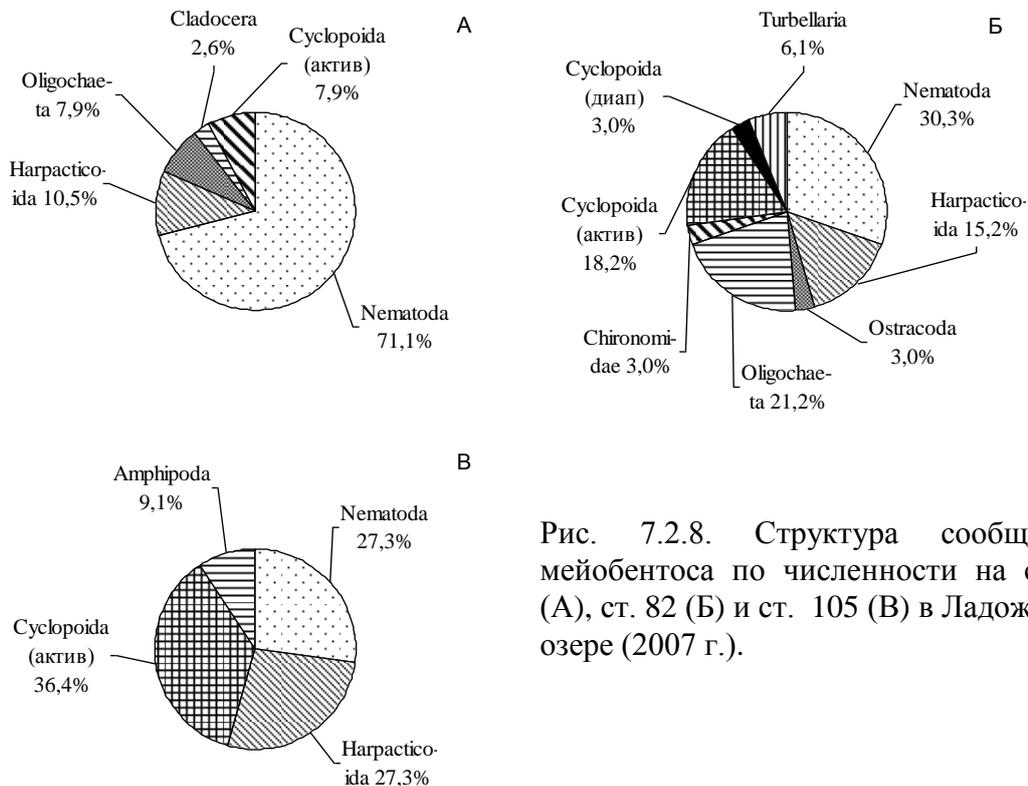


Рис. 7.2.8. Структура сообщества мейобентоса по численности на ст. 55 (А), ст. 82 (Б) и ст. 105 (В) в Ладожском озере (2007 г.).

Таким образом, в Ладожском озере в конце 1990-х гг. и начале XXI в., шли разнонаправленные процессы. В целом озеро достигло мезотрофного статуса и приобрело отдельные черты эвтрофного водоема. В то же время в более динамичной южной части озера в результате снижения антропогенной нагрузки наблюдались определенные признаки улучшения озерной среды (снизились количественные показатели, появились виды-индикаторы олиготрофных условий), т. е. протекал процесс олиготрофирования (Курашов и др., 2004). Начиная с 2007 г. наблюдается снижение количественных показателей развития мейобентоса и резкое сокращение или полное исчезновение скоплений диапаузирующих циклопов в открытых районах Ладожского озера (рис. 7.2.8). Структура сообщества (рис. 7.2.8) стала близка к той, которая наблюдалась до 1990-х гг., т. е. до периода резкой дестабилизации экосистемы озера.

Высказана гипотеза (Петрова и др., 2005) о том, что сформировавшаяся к концу XX в. специфическая активность биоты способствовала, при дефиците доступных форм фосфора в воде, пополнению запаса фосфора, доступного для фито- и бактериопланктона, разрушая частично консервативную, высокомолекулярную фракцию РОВ. В ходе биокаталитического окисления высвобождающиеся ионы металлов могли приводить к своеобразной внутренней интоксикации водной толщи озера, на что и прореагировали планктонные циклопы, перестроив свой жизненный цикл в вариант, когда он протекает с уходом копеподитов в донную диапаузу (в основном на IV стадии) для избегания токсического воздействия при трансформации РОВ.

Снижение количественных показателей мейобентоса и прекращение образования скоплений диапаузирующих циклопов может свидетельствовать о переходе экосистемы озера в более благоприятное состояние, отражать стабилизацию протекания озерных процессов. По-видимому, в настоящее время в ходе деэвтрофирования экосистемы на первый план в качестве регуляторов функционирования экосистемы (в частности, высвобождения и потребления фосфора) выходят внутриводоемные процессы, не связанные с интенсивным разрушением гуминового вещества.

В настоящее время природные процессы продолжают оставаться определяющими в формировании и функционировании гидробиоценозов озера. Это происходит из-за того, что Ладожское озеро по природе своей обладает высокой устойчивостью к внешним воздействиям. Гомеостаз озерной экосистемы также поддерживается за счет внутренних структурных перестроек сообществ гидробионтов, что в целом приводит к стабильному состоянию озерной биоты, которое слабо меняется даже в условиях интенсификации климатических изменений.

По данным исследований 2007–2012 гг. структурно-функциональная организация фитопланктона Ладожского озера, тесно связанная с гидрофизическим и гидрохимическим режимами водоема, стабильна. Весной и осенью при существовании термобара, когда в составе сообщества доминируют диатомовые, прибрежные воды относятся к слабomezотрофному типу, основная акватория — к олиготрофному. Летом при доминировании синезеленых и криптофитовых водорослей поверхностный и эвфотный слои озера соответствуют мезотрофному статусу. Основная водная масса озера глубже 25 м характеризуется как олиготрофная в течение всего вегетационного сезона. За весь период мониторинговых наблюдений не выявлено четкой направленности в изменении количественных параметров летнего фитопланктона, несмотря на сокращение антропогенной нагрузки на водоем.

В настоящее время потенциально вредные синезеленые водоросли массового развития не имеют даже летом, т. е. качество вод озера, оцениваемое по состоянию фитопланктона, весьма хорошее.

Трофический статус озера по микробиологическим показателям изменяется от слабо мезотрофного в гипolimнионе профундального и ультрапрофундального районов до типично мезотрофного в южном прибрежном районе. Во время всего исследованного периода величины соотношения численности сапрофитов и общей численности бактериопланктона во всех районах озера попадают в пределы, свойственные условной категории «чистые» и «особо чистые воды». Величины этого соотношения в 1990–2000 гг., практически, не отличаются от таковых в 2001–2010 гг., что говорит о стабильно высоком качестве вод Ладожского озера.

Согласно принятым классификациям и особенностям таксономической структуры зоопланктона, зоны акватории Ладожского озера могут быть оценены как слабomezотрофные

(при олиготрофном характере гипolimниона). В отдельные годы с массовым развитием кладоцер (особенно в южной части озера) величины биомасс зоопланктона могут соответствовать более высокому уровню трофии (мезотрофному).

В открытых районах озера видовой состав макробентосных ценозов, их доминирующий комплекс и соотношение основных групп остаются достаточно стабильными на протяжении длительного периода времени. Наиболее продуктивной зоной является переходный район (глубины 18–50 м). В мелководном районе видовой состав и структура сообщества донных животных меняются незначительно. Уровень количественного развития бентоса в бухте Петрокрепость и Свирской губе соответствует продуктивности бентоса в олиготрофных и слабо мезотрофных водоемах, а в Волховской губе типично мезотрофных.

Прекращение образования скоплений диапаузирующих циклопов и снижение количественных показателей мейобентоса с середины 2000-х гг. по 2012 г. свидетельствует о переходе экосистемы озера в более благоприятное состояние, отражает стабилизацию протекания озерных процессов и уменьшение/прекращение разрушения основного пула РОВ, прежде всего гуминового комплекса. Вероятно, что в процессе деэвтрофирования экосистемы регуляция функционирования экосистемы (прежде всего, механизмов высвобождения и потребления фосфора) осуществляется за счет внутриводоемных процессов, не связанных с разрушением гуминового вещества. Настоящий пост-мезотрофный период развития Ладожского озера характеризуется тем, что эволюция экосистемы приобрела «гистерезисный» характер (Поздняков и др., 2009), а возвращение экосистемы в менее трофное состояние сопровождается формированием новых специфических черт и характеристик основных сообществ водоема, что определяет совершенно новый этап в развитии Ладожского озера.

Объединяя данные всех гидробиологических сообществ, на основании исследований 2007–2012 гг. можно заключить, что трофический статус центральной части акватории озера в целом оценивается как слабomezотрофный (при олиготрофном характере гипolimниона), северной — как олиготрофный, западной — как мезотрофный, южной части (Свирская и Волховская губы) — как слабоэвтрофный.

Таким образом, характеризуя в целом зоны открытой Ладоги по гидробиологическим показателям, можно говорить о стабильном состоянии основной акватории озера, а качество его вод охарактеризовать как хорошее и пригодное для всех видов использования, в том числе для питьевого водоснабжения. В южной части наиболее ярко выражен процесс трансформации литоральной зоны вследствие функционирования популяций видов-вселенцев (см. Главу 6). Интенсификацию инвазионного процесса в Ладожском озере можно связать как с антропогенным фактором (судоходство), так и с климатическими изменениями, очевидно приведшими к увеличению теплозапаса озера в прибрежной зоне.

Глава 8. Исследование трансформации Ладожского озера методами математического моделирования

Как отмечалось в работе Астраханцев и др. (2003), в глобальном плане для водных ресурсов суши можно выделить такие фундаментальные проблемы как дефицит питьевой воды, проблема сохранения водных экологических систем, проблема определения допустимых пределов антропогенной нагрузки на водные объекты. Во второй половине XX в. антропогенное эвтрофирование стало повсеместным явлением, охватившим около 90% всех озер мира, включая крупнейшие из них. Не избежало этой участи и крупнейшее озеро Европы – Ладожское (Антропогенное эвтрофирование..., 1982; Руховец и др., 2000). В этой связи задача сохранения водных ресурсов Ладожского озера имеет исключительно большое значение. Здесь уместно отметить высокую эффективность природоохранной, в частности водоохраной деятельности. В статье (Гусев и др., 2004) приводятся результаты такого подсчета: 1 рубль, вложенный в водоохранные мероприятия, предотвращает экономических ущерб, равный 10 рублям. Как утверждают авторы этих расчетов, трудно найти еще сферу хозяйственной деятельности, где рентабельность была бы столь высока (на уровне 1000%). Задача сохранения водных ресурсов больших и глубоких (великих) озер, таких как Ладожское и Онежское озера, а также других великих озер мира (Байкал, американские Великие озера), имеет одно существенное отличие от задач для других водных объектов суши, таких как реки и небольшие озера, — время реакции великих озер на внешние воздействия исчисляется десятками лет. Для Ладожского озера это время кратно 12 годам (Астраханцев и др., 2003) — времени условного водообмена. Отсюда следует, что мероприятия по регулированию водопользования могут оказывать весьма длительное по времени воздействие на экосистему озера даже после окончания мероприятия (например, после прекращения сброса загрязняющих веществ). Использование экономических механизмов для решения задач сохранения водных ресурсов, конкретно, водных ресурсов великих озер, как уже отмечалось, требует решения естественно-научной проблемы определения допустимых пределов антропогенной нагрузки по важнейшим ингредиентам ее составляющих. Для решения указанной проблемы необходимо уметь определять реакцию экосистем водоема на изменения антропогенной нагрузки. Кроме того, в связи с проблемой глобального потепления важно уметь определять влияние на экосистемы возможных климатических изменений. Естественно, что таким инструментом определения реакции экосистем озер являются их математические модели.

Для моделирования функционирования экосистемы водоема необходима информация о его круглогодичном гидротермодинамическом режиме, т. е. информация о течениях в озере, о

температурном режиме его водного тела, об условиях перемешивания, о прозрачности воды. Гидротермодинамический режим озера формируется внешними воздействиями на озеро, к которым относятся: ветровое воздействие на поверхность водоема, потоки тепла через поверхность водоема, создаваемые солнечной радиацией, речной приток и сток, осадки и испарения. Информация же о круглогодичном гидротермодинамическом режиме озера находится с помощью моделей геофизической гидротермодинамики (Астраханцев и др., 2003), в которых и используется перечисленная информация о внешних воздействиях на водоем.

Следует отметить, что исследование трансформации экосистем озер с помощью математических моделей нуждается, во-первых, в постоянном получении новых данных мониторинга о внешних воздействиях для верификации и калибровки моделей; во-вторых, в информации об особенностях процессов создания первичной продукции и о составе доминантных комплексов фитопланктона; информации о других элементах (гидробионтах) экосистемы озера — зоопланктоне и его структуре, об организмах — деструкторах (бактериопланктоне и водных грибах). Также необходима информация об антропогенной нагрузке: о поступлениях в озеро загрязняющих веществ и биогенов (ЗВ и Б). Систематическим мониторингом внешних воздействий на Ладожское и Онежское озера занимается гидрометслужба Росгидромета и институты РАН: Институт озероведения и Институт водных проблем Севера. В своих исследованиях авторы данной главы используют результаты мониторинга, полученные этими институтами.

8.1. Воспроизведение круглогодичной циркуляции Ладожского озера

Общие замечания. Математическому моделированию динамики и термического режима величайших озер мира посвящено значительное число исследований. Результаты моделирования американских Великих озер представлены в работах Дж. Айерса (1956), Дж. Беннета (1974, 1975, 1977, 1978), Т. Саймонса (1973, 1974), В. Лика (1976), Дж. Аландера и Дж. Сейлора (1979); Байкала — в работе Е.А. Цветовой (1977); Севана — в работе А.С. Саркисяна, Ю.Л. Демина и М.А. Акопян (1984); озера Иссык-Куль — в работах Б.В. Архипова (1986) и В.П. Кочергина, В.И. Климка и А.Г. Боковикова (1987); Ладожского озера — в работах А.Н. Охлопковой (1966); М.А. Акопян, А.М. Гуриной, Ю.Л. Демина и Н.Н. Филатова (1984); Г.П. Астраханцева, Н.Б. Егоровой и Л.А. Руховца (1987) и др. В этом перечне представлены только трехмерные модели. Детальный список моделей, созданных специально для Ладожского озера, представлен в книге (Ладожское озеро..., 2002). Обзор работ по моделированию динамики озер можно найти в монографиях Н.Н. Филатова (1983, 1991), а также в работе (Меншуткин, Руховец, Филатов, 2013).

Моделирование течений и термического режима водоема всегда явно или неявно предполагает, что исследователи ставят перед собой задачу воспроизведения явлений того или иного пространственного и временного масштабов. Выбор масштабов зависит от того, для каких целей проводится исследование, каковы на момент проведения исследований возможности данной области знаний в описании интересующих исследователей проблем.

Основная задача моделирования гидротермодинамического режима водоема в данной главе — это обеспечение экологических моделей информацией об абиотических факторах природной среды, прежде всего, о гидрофизических процессах, определяющих в весьма высокой степени функционирование экологической системы водоема.

Для Ладожского озера с его значительной протяженностью в сотни километров и глубинами в сотни метров со сложной морфометрией, имеет место значительное разнообразие гидрофизических условий, особенно в вегетационный период. Это определяется наличием в данный период развитой как вертикальной, так и горизонтальной температурных стратификаций. Так, амплитуда горизонтальных изменений температуры достигает $15\text{ }^{\circ}\text{C}$ между мелководьем на юге и глубоководной зоной на северо-западе озера (Тихомиров, 1982). При наличии развитой стратификации летом амплитуда вертикальных изменений температуры также может достигать $15\text{ }^{\circ}\text{C}$ (Тихомиров, 1982). Этим определяется необходимость использования для моделирования трехмерных математических моделей.

При моделировании крупномасштабной циркуляции больших озер в качестве временного масштаба естественно выбрать характерное время эволюции элементов глобальной динамики озера. В качестве такого масштаба разумно взять синоптический масштаб, т. е. временной интервал, равный 5–7 суткам.

Для воспроизведения с помощью математических моделей круглогодичного функционирования экосистем озер, для прогнозирования на сроки 10–15 лет реакции экосистем озер на изменение антропогенной нагрузки и климата на водосборе озер естественно принять, что циркуляция озер соответствует некоторым средним климатическим условиям внешних воздействий на водоем. К этим воздействиям относятся ветер, поток тепла через поверхность, речной приток и сток, осадки и испарения. Циркуляцию озера, соответствующую средним многолетним среднемесячным значениям внешних воздействий на водоем, принято называть климатической циркуляцией. В работе Н.Н. Филатова (1983) приведена классификация течений в озерах. Согласно этой классификации климатическая циркуляция складывается из общей циркуляции водоема, охватывающей основную часть водной массы озера, из повторяющихся из года в год циклонических и антициклонических течений, а также локальных течений (течений прибрежной зоны), т. е. образований в озере, сопоставимых по размерам с размерами всего озера, а по времени существования – с синоптическим масштабом.

Математическая формулировка модели. Уравнения движения и неразрывности, в которых отклонения давления от атмосферного заменено из уравнения гидростатики следующим образом

$$P = g\rho_w \xi + g \int_z^0 \rho dz',$$

имеют вид

$$\frac{\partial u}{\partial t} - lv = \frac{\partial}{\partial z} \left(k_z \frac{\partial u}{\partial z} \right) - g \frac{\partial \xi}{\partial x} - \frac{\partial}{\partial x} f, \quad (8.1.1)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + lu = \frac{\partial}{\partial z} \left(k_z \frac{\partial v}{\partial z} \right) - g \frac{\partial \xi}{\partial y} - \frac{\partial}{\partial y} f, \quad (8.1.2)$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (8.1.3)$$

$$f \equiv \frac{g}{\rho_w} \int_z^0 \rho dz'.$$

Инерционные члены и члены, определяющие горизонтальный турбулентный обмен в уравнениях (8.1.1) – (8.1.2) отброшены (Марчук и др., 1987). Параметр Кориолиса l из-за размеров озера можно считать постоянным.

В качестве уравнения состояния принимается одна из эмпирических зависимостей вида

$$\rho = \rho(T),$$

в которой не учитывается зависимость плотности от давления. Для Ладожского озера, глубина которого не превосходит 230 м, это оправдано. Для озера Байкал в модели Е.А. Цветовой (1977) зависимость плотности от давления учтена. Конкретно в настоящей модели используется следующее уравнение состояния (Simons, 1973)

$$\rho(T) = \rho_w [1 - 6.8 \cdot 10^{-6} (T-4)^2], \quad [T] = ^\circ\text{C}. \quad (8.1.4)$$

Уравнение переноса тепла в модели климатической циркуляции озер имеет вид:

$$\frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} + w \frac{\partial T}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left(v_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(v_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(v_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) \quad (8.1.5)$$

Коэффициенты v_x, v_y, v_z в (8.1.5) и k_z в (8.1.1) – (8.1.2) считаются функциями переменных x, y, z и t .

Граничные условия. Для проекций вектора скорости граничные условия на поверхности при $z = 0$ имеют вид:

$$k_z \frac{\partial u}{\partial z} \Big|_{s_0} = \frac{\tau_x}{\rho_w}, \quad k_z \frac{\partial v}{\partial z} \Big|_{s_0} = \frac{\tau_y}{\rho_w}, \quad (8.1.6)$$

где τ_x, τ_y — касательные напряжения трения ветра;

$$w|_{s_0} = \alpha \frac{\partial \xi}{\partial t}, \quad \alpha = 0, 1. \quad (8.1.7)$$

При $\alpha = 0$ — это условие «твердой крышки» (Каменкович, 1973; Педлоски, 1984), при $\alpha = 1$ — это линейное приближение условия

$$w = \frac{\partial \xi}{\partial t} + u \frac{\partial \xi}{\partial x} + v \frac{\partial \xi}{\partial y}$$

на свободной поверхности.

На дне при $z = -H(x, y)$,

$$k_z \frac{\partial u}{\partial z} \Big|_{s_2} = k_2 U \sqrt{U^2 + V^2}, \quad k_z \frac{\partial v}{\partial z} \Big|_{s_2} = k_2 V \sqrt{U^2 + V^2}, \quad (8.1.8)$$

$$w|_{s_2} = -u \frac{\partial H}{\partial x} - v \frac{\partial H}{\partial y}, \quad (8.1.9)$$

где $\vec{V} = (U, V)$ — вектор средних по глубине скоростей

$$U = \frac{1}{H} \int_{-H}^0 u(x, y, z, t) dz, \quad V = \frac{1}{H} \int_{-H}^0 v(x, y, z, t) dz.$$

На вертикальной боковой поверхности

$$\vec{v}_n \Big|_{s_1} = v_0, \quad (8.1.10)$$

где \vec{v}_n — проекция вектора скорости на внешнюю нормаль к боковой поверхности, причем

$$v_0 = \begin{cases} 0 - \text{в точках твердой границы (условие непротекания),} \\ \text{заданное значение в створах втекающих и вытекающих рек.} \end{cases}$$

В качестве граничных условия для $T(x, y, z, t)$ задаются:

при $z = 0$

$$v_z \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{s_0} = \frac{1}{c_p^v \rho_w} Q, \quad (8.1.11)$$

где Q — поток тепла через поверхность водоема,

на всей твердой границе и в створах вытекающих рек

$$\frac{\partial T}{\partial N} = 0, \quad \frac{\partial T}{\partial N} \equiv v_x \frac{\partial T}{\partial x} \cos(n, x) + v_y \frac{\partial T}{\partial y} \cos(n, y) + v_z \frac{\partial T}{\partial z} \cos(n, z), \quad (8.1.12)$$

в створах втекающих рек

$$\left[\frac{\partial T}{\partial N} - \vec{v}_n (T - T_n) \right] \Big|_{s_m} = 0. \quad (8.1.13)$$

Законы сохранения. Для представленной здесь модели имеют место закон изменения механической энергии и закон изменения количества тепла. Их формулировка и детали

свойства этой модели подробно описаны в книге «Моделирование экосистем больших стратифицированных озер» (Астраханцев и др., 2003). В этой же монографии дано описание вычислительных алгоритмов для компьютерной реализации модели. При этом важно подчеркнуть, что в дискретной модели необходимо точно воспроизводить дискретные аналоги законов изменения (сохранения) механической энергии и тепла. Это связано с тем, что вычисления в дискретных моделях проводятся на большие промежутки времени, так как для больших стратифицированных озер велико время реакции на внешние воздействия. Заметим, что законы сохранения имеют место, если нет внешних воздействий и внутренних источников и стоков.

Результаты моделирования. С помощью этой модели (Астраханцев и др., 2003) воспроизведена климатическая циркуляция Ладожского озера. Климатическая циркуляция строится как периодическое решение дискретной модели с периодом 1 год. Для построения периодического решения использовалась равномерная сетка по горизонтали с шагами $h_x = h_y = 2,47$ км и неравномерная сетка по вертикали с числом дроблений равным тридцати. Построенная с помощью модели круглогодичная крупномасштабная климатическая циркуляция Ладожского озера отвечает имеющимся представлениям о реальной циркуляции озера. Это относится к характеру интегральной циркуляции, распределению величин горизонтальных скоростей по глубине, величине и характеру распределения величин вертикальной скорости, воспроизведению термобара, хотя и очень схематичному и, наконец, к эволюции поля скорости во времени. Следует отметить, что представления о реальной циркуляции Ладожского озера, в основном, опираются на результаты мониторинга, приведенные в работах А.И. Тихомирова (1968, 1982), и на результаты моделирования из монографий Н.Н. Филатова (1983, 1991). Эти результаты, полученные с помощью диагностических моделей, в основном совпадают с результатами расчетов по настоящей модели, однако есть и различия в значениях скоростей, а также в схемах течений.

Важным является то, что нами воспроизведен круглогодичный режим течений в озере: формирование стратификации (возникновение и разрушение термоклина); формирование термобара в период весеннего нагревания и вертикальной гомотермии в период осеннего охлаждения; формирование общих циклонической и антициклонической циркуляций; образование и разрушение ледового покрова. Для Ладожского озера столь полное и достаточно адекватное описание его круглогодичной динамики получено впервые.

С помощью созданной модели гидротермодинамики и несмотря на то, что уравнения движения в модели неполны, удалось в вычислительных экспериментах воспроизвести суточную динамику поля температуры водного тела Ладожского озера. Это было реализовано в рамках проекта построения краткосрочных прогнозов динамики водной системы Ладожское озеро — река Нева — Невская губа — Финский залив (Прогноз погоды..., 2008).

Верификация модели и результаты воспроизведения климатической циркуляции подробно представлены в монографии (Астраханцев и др., 2003). Ниже приведены несколько рисунков, представляющих результаты моделирования. На рис. 8.1.1 приведена рассчитанная температура поверхности озера на сетке с шагами $h_x = h_y = 2,47$ км в сопоставлении с температурой поверхности из базы данных Института озероведения (Науменко и др., 2000). В вычислительных экспериментах, проведенных сравнительно недавно (Rukhovets & Filatov (Eds.), 2010) климатическая циркуляция была воспроизведена на гораздо более подробной сетке с шагами по горизонтали $h_x = h_y = 617,5$ м при 40 шагах по вертикали (рис. 8.1.2). Сопоставление этих рисунков показывает, что на более подробной сетке эффект сглаживания результатов, являющийся следствием наличия схемной вязкости, не столь велик.

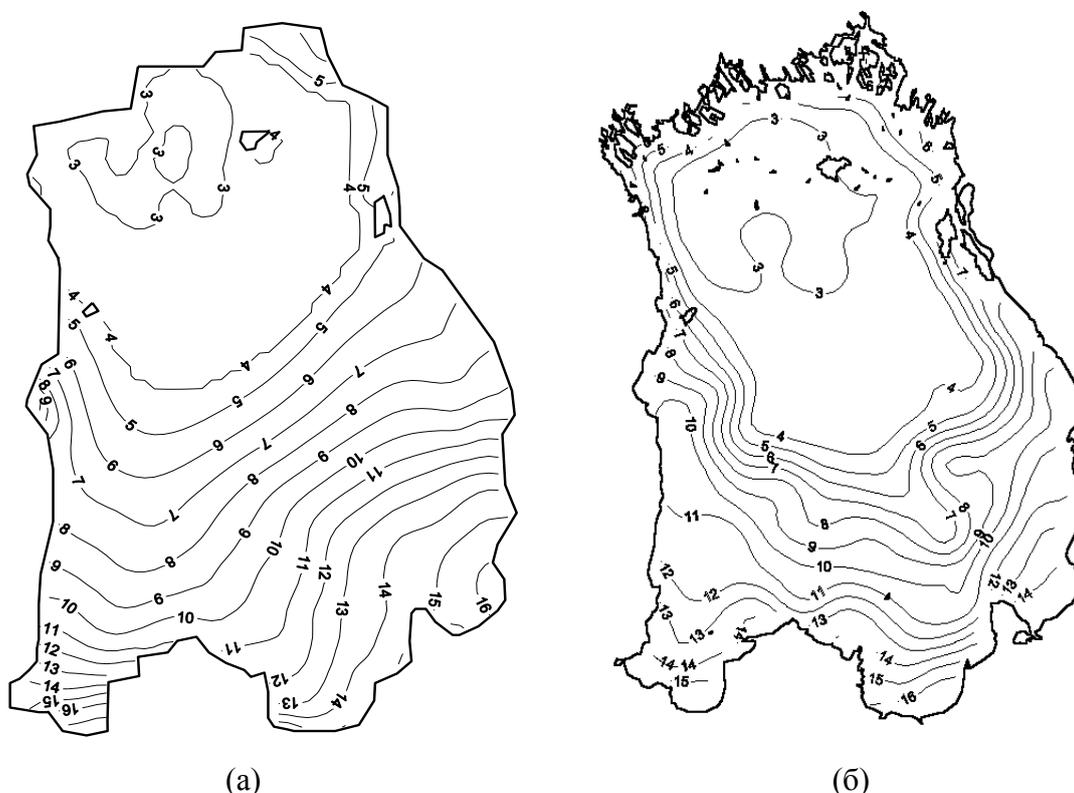


Рис. 8. 1. 1. Температура поверхности Ладожского озера 15 июня: (а) — результаты моделирования на сетке $h_x = h_y = 2,47$ км; (б) — данные М.А. Науменко и др. (2000).

Таблица 8.1. 1.

Некоторые характеристики термического режима Ладожского озера по результатам моделирования и данным наблюдений (Тихомиров, 1968, 1982; Филатов, 1983)

Явление	Климатическая циркуляция	Средние многолетние данные
Установление полного ледового покрова	10 февраля–94% 14 февраля–95% 23 февраля–97% 16 марта–100%	10 февраля
Исчезновение ледового покрова	16 мая	25 мая
Появление изотермы 4 °С (весеннего термобара)	27 апреля	1 мая
Исчезновение изотермы 4 °С (весеннего термобара)	9 июля	15 июля
Наименьшая толщина эпилимниона и время ее наступления	21–26 июля	20 метров
Появление изотермы 4 °С (осеннего термобара)	24 октября	1 октября
Исчезновение изотермы 4°С (осеннего термобара)	14 декабря	15 декабря
Начало установления ледового покрова	29 октября–1% 3 ноября–3% 12 ноября (21 декабря)–5%	30 декабря

Таблица 8.1.1. подтверждает адекватность результатов расчетов данным наблюдений.

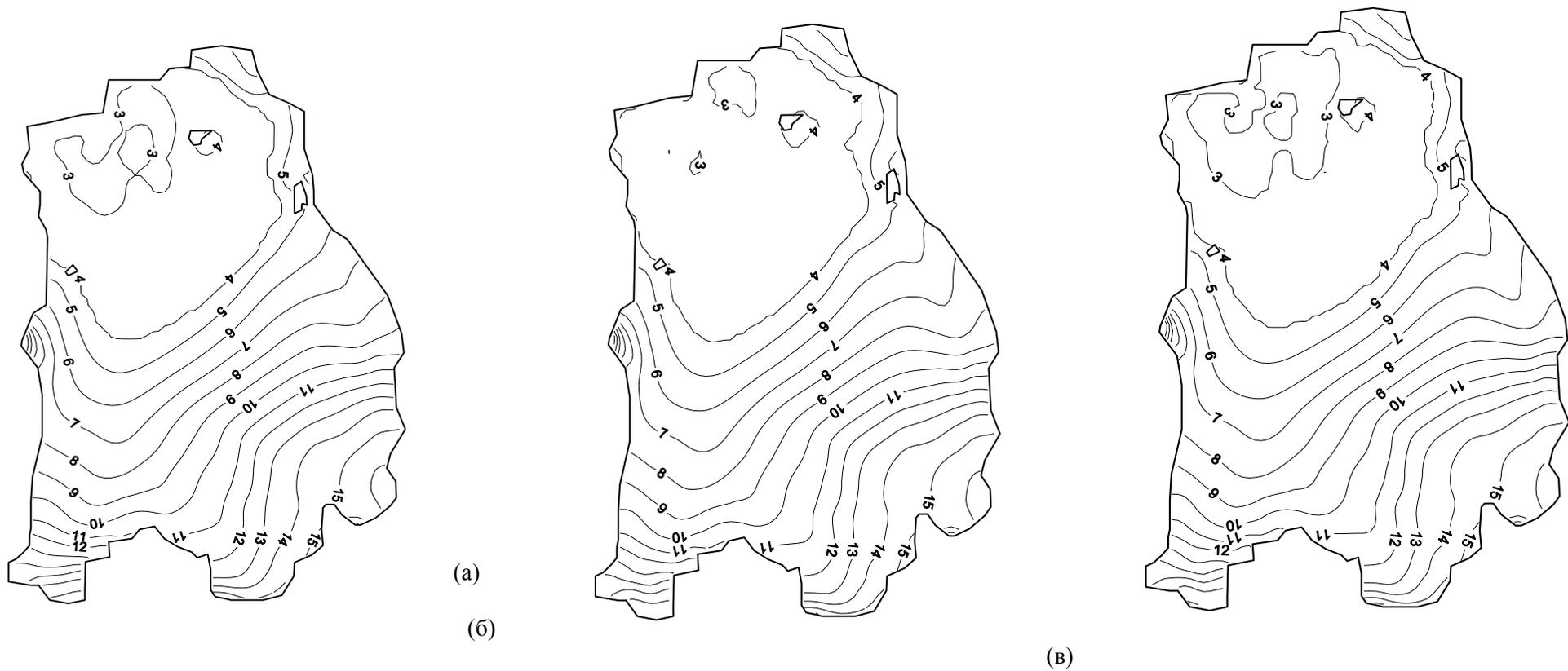


Рис. 8.1.2. Температура поверхности Ладожского озера 15 июня на разных сетках 2470×2470 (а), 1235×1235 (б), $617,5 \times 617,5$ (в).

8.2. Оценка возможных изменений гидротермодинамического режима Ладожского озера вследствие глобального потепления

Для оценки изменений в экосистеме озера под воздействием меняющихся климатических условий на водосборе озера следует воспроизвести соответствующие изменения гидротермодинамического режима озера.

В исследованиях изменений климатических условий на северо-западе России (Голицын и др., 2002; Мелешко и др., 2004; Филатов и др., 2003) анализируется динамика для водосбора Ладожского озера таких климатических параметров, как температура воздуха, солнечная и длинноволновая радиация, осадки, испарение, уровень воды в озере на основе данных мониторинга (за различные периоды вплоть до 2002 г.), а также результаты моделирования с помощью моделей общей циркуляции атмосферы и океанов и моделей общей циркуляции атмосферы (Bengtsson, 1997; Climate of Europe, 1995).

Для моделирования гидротермодинамического режима Ладожского озера наиболее значимыми внешними воздействиями на водоем являются поток тепла через поверхность водоема и суммарный приток воды (речной приток + осадки – испарение). Для их определения необходимы данные о годовом ходе составляющих теплового и водного балансов водосбора озера.

Задача данного исследования состоит в том, чтобы оценить возможные изменения гидротермодинамического режима водоема. Так как при изменениях климата на водосборе озера изменяется тепловой поток через поверхность водоема и суммарный приток воды, то авторы изменяли эти внешние воздействия на водоем при моделировании.

Тепловой поток на границе вода — атмосфера в используемой модели гидротермодинамики озера задается как производная по времени от удельного теплового запаса озера. Подробно этот подход описан в уже упоминавшейся монографии (Астраханцев и др., 2003). Среднее значение потока тепла через поверхность водоема q_s определяется так:

$$q_s = \frac{1}{mes(S_0)} \frac{d}{dt} \int_{\Omega} c_p^v \rho_w T d\Omega, \quad (8.2.1)$$

где Ω — область, занимаемая водным телом озера в состоянии равновесия, ρ_w — средняя плотность пресной воды, c_p^v — удельная теплоемкость воды, S_0 — невозмущенная поверхность озера. Применение такого способа определения теплового потока для Ладожского озера оказалось возможным, так как в работе А.И. Тихомирова (1968) были вычислены значения удельного теплозапаса озера за все месяцы для периода 1957–

1962 гг. по данным наблюдений. В дискретной модели поток тепла вычислялся как разностная производная по времени от Q_S — величины удельного теплозапаса водоема:

$$Q_S(t) = \frac{1}{mes(S_0)} \int_{\Omega} c_p^v \rho_w T(x, y, z, t) d\Omega$$

В табл. 8.2.1 представлены средние значения величины $Q_S(t)$ для Ладожского озера на середину каждого месяца за 1957–1962 гг., а также границы изменения величины $Q_S(t)$ на середину каждого месяца. Табл. 8.2.1 составлена на основе данных А.И. Тихомирова (1968), представляющих собой результаты обработки данных наблюдений.

Таблица 8.2.1.

Средние за период 1957–1962 гг. значения удельного теплозапаса Q_S (ккал см⁻²) Ладожского озера на середину месяца и границы их изменений, построенные на основе данных наблюдений (Тихомиров, 1968, С. 208–209)

Месяцы	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
Теплозапас												
Средний за период	10,6	5,8	3,4	2,3	4,9	15,2	27	35,2	38,4	35,5	28,9	19,7
min	8	5,1	2,6	1,5	3,6	13,7	23	33,2	36,3	32,7	23,8	13,8
max	16	7,2	5,1	3,1	6,2	16,3	28,4	36,6	40	38,8	39,2	28,2

При моделировании год, в течение которого теплозапас Ладожского озера на середину каждого месяца равен среднему (первая строка в табл. 8.2.1), максимальному (третья строка в табл. 8.2.1), и минимальному (вторая строка в табл. 8.2.1) значению величины $Q_S(t)$ за 1957–1962 гг. может быть назван соответственно климатическим, теплым и холодным.

Циркуляции Ладожского озера, построенные для теплового потока, определенного по максимальным значениям $Q_S(t)$ на середину каждого месяца (строка 3 табл. 8.2.1), в дальнейшем рассматриваются как циркуляции, которые могут сложиться в перспективе в результате глобального потепления. При так определенном тепловом потоке авторами построена не одна, а три циркуляции Ладожского озера. Первая — для суммарного среднего многолетнего годового притока воды в озеро (средний многолетний речной приток — 67 км³ год⁻¹; осадки-испарение — 7 км³ год⁻¹), равного 74 км³ год⁻¹ (Гидрологический режим..., 1966). Вторая — для значения, вероятно, самого большого в XX в. суммарного годового притока, равного 112,3 км³ год⁻¹, зарегистрированного в 1962 г. (Антропогенное эвтрофирование, 1982). Наконец, третья — для аномально малого суммарного притока, равного 47 км³ год⁻¹ за 1940 г. (Гидрологический режим..., 1966). Первую из этих трех циркуляций можно назвать теплой, вторую — теплой с повышенным притоком, третью — теплой с пониженным притоком.

Кроме теплых циркуляций построена циркуляция Ладожского озера для теплового потока, определенного по минимальным значениям $Q_S(t)$ на середину каждого месяца (строка 2 в табл. 8.2.1), и для суммарного годового притока, равного $74 \text{ км}^3 \text{ год}^{-1}$. Эту циркуляцию названа холодной. В дальнейшем эта циркуляция также использовалась для моделирования функционирования экосистемы Ладожского озера. Эксперименты с «холодной» циркуляцией проводились для определения возможных отклонений от результатов, полученных при использовании климатической и теплых циркуляций, ввиду того, что в последнее десятилетие отмечается интенсификация межгодовой изменчивости гидродинамического режима озера.

Всего при воспроизведении функционирования экосистемы Ладожского озера использовалось пять циркуляций (климатическая, три теплых и холодная).

Следует отметить, что полученные в результате моделирования значения теплозапаса Ладожского озера на середину каждого месяца практически совпадают для теплой, климатической и холодной циркуляций с использованными для получения теплового потока данными из таблицы 8.2.1. Это отчетливо видно на рис. 8.2.1 (Руховец и др., 2006), который построен по результатам моделирования и данным из табл. 8.2.1.

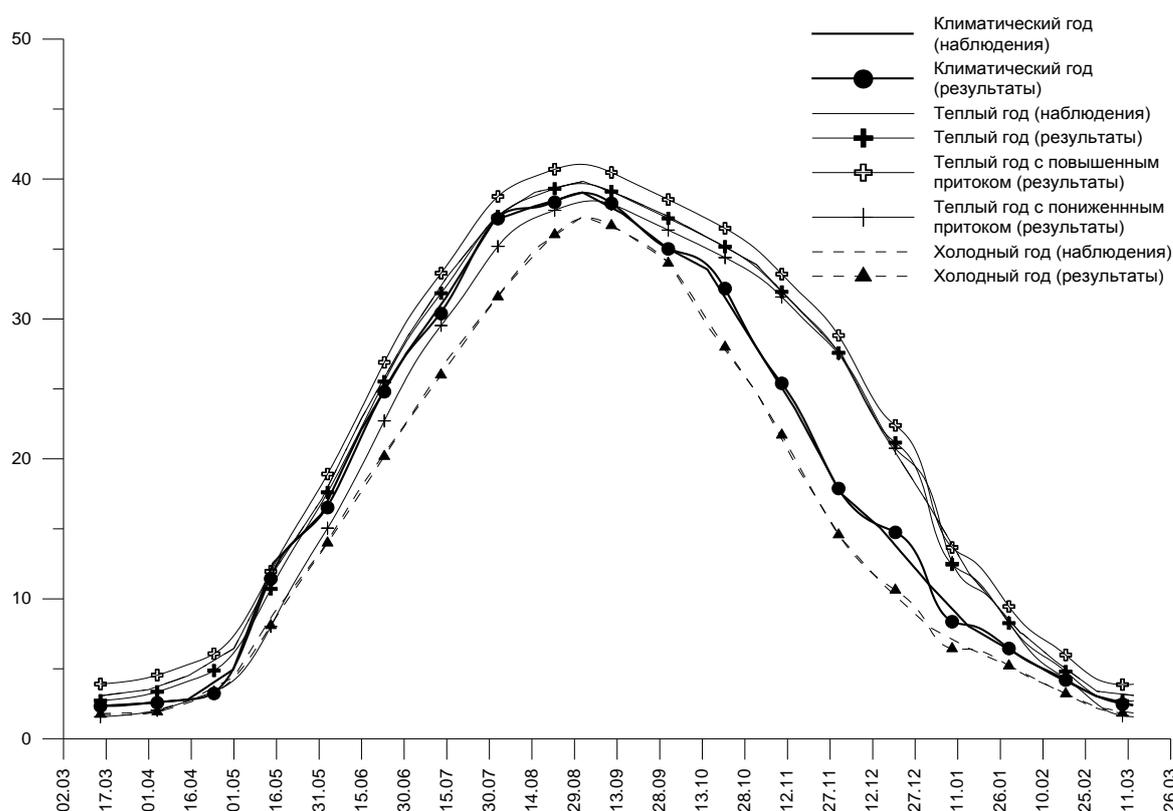


Рис. 8.2.1. Удельный теплозапас Ладожского озера, ккал см^{-2} (данные наблюдений и результаты моделирования).

В обоснование избранного подхода отметим, что используемые при построении циркуляций Ладожского озера изменения суммарного притока в озеро (т. е. изменения его

водного баланса) и изменения среднегодовой температуры водной массы мажорируют изменения, прогнозируемые на вторую половину XXI в. (Мелешко и др., 2004; Филатов и др., 2003). Так, по одному из прогнозов на 2050 и 2100 гг. значения изменения речного стока в бассейне Балтийского моря и осадков находятся в пределах 6–9 % увеличения по сравнению с 1981–2000 гг. (Мелешко и др., 2004). В приведенных экспериментах учтено как увеличение, так и уменьшение суммарного притока воды в 1,5 раза при построении теплых циркуляций (с повышенным и пониженным суммарным притоком), причем конкретные величины взяты из ретроспективных данных наблюдений.

В работах (Климат Карелии, 2004; Филатов и др., 2003) приведены предварительные оценки возможных изменений среднемесячных значений температуры водной массы Ладожского озера на перспективу до 2050 г. Эти оценки получены для двух долгосрочных сценариев эмиссии парниковых газов и аэрозоля в атмосферу в XXI в. (первый учитывает удвоение концентрации CO₂ за XXI в., второй дополнительно учитывает влияние аэрозоля). Результаты этих предварительных оценок таковы, что увеличение среднегодовой температуры водной массы озера составляет для одного из сценариев 0,2 °C, тогда как для теплого года в расчетах по настоящей модели это увеличение не менее 0,5 °C (согласно табл. 8.2.1 данной работы и табл. 18 из работы А.И. Тихомирова (1968)).

На рис. 8.2.1 представлен годовой ход удельного теплозапаса Ладожского озера для трех теплых, холодной и климатической циркуляций и данные наблюдений из табл. 8.2.1. Начало отсчета времени на этом рисунке отнесено к началу марта, так как наименьший средний многолетний тепловой запас относится к середине марта (Тихомиров, 1968). Отличия теплозапаса теплых и климатической циркуляций в период нагревания водоема в целом незначительны, хотя наибольшие отличия имеют место для теплой циркуляции с повышенным притоком. В период охлаждения озера эти отличия гораздо более заметны, причем они также максимальны для теплой циркуляции с повышенным притоком. В течение всего года удельные теплозапасы теплых циркуляций между собой отличаются незначительно (рис. 8.2.1).

О различии построенных циркуляций Ладожского озера можно также судить по сопоставлению некоторых характеристик его термического режима. В табл. 8.2.8. приведены данные для для трех циркуляций — теплой, климатической и холодной.

Таблица 8.2.2.

Некоторые характеристики термического режима Ладожского озера по результатам моделирования и данным наблюдений (Тихомиров, 1968, 1982)

Явление	Циркуляция	Средние
---------	------------	---------

	Теплая	Климатическая	Холодная	многолетние данные
Установление полного ледового покрова	6 февраля–94% 11 февраля–95% 19 февраля–97% 12 марта–100%	10 февраля–94% 14 февраля–95% 23 февраля–97% 16 марта–100%	4 января–94% 7 января–95% 17 января–97% 1 февраля–100%	10 февраля
Исчезновение ледового покрова	29 мая	16 мая	10 июня	25 мая
Появление изотермы 4 °С (весеннего термобара)	23 апреля	27 апреля	28 апреля	1 мая
Исчезновение изотермы 4 °С (весеннего термобара).	29 июня	9 июля	26 июля	15 июля
Наименьшая толщина эпилимниона и время ее наступления	16–21 июля	21–26 июля	5–10 августа	20 метров
Появление изотермы 4 °С (осеннего термобара).	15 ноября	24 октября	12 октября	1 октября
Исчезновение изотермы 4 °С (осеннего термобара)	2 января	14 декабря	20 ноября	15 декабря
Начало установления ледового покрова.	28 ноября–1% 2 декабря–3% 6 декабря (24 декабря)–5%	29 октября–1% 3 ноября–3% 12 ноября (21 декабря)–5%	17 октября–1% 25 октября–3% 30 октября–5%	30 декабря

Сравнение изменений в режиме течений не приводилось, так как визуальные оценки этих изменений мало информативны, а изменения в распределении значений скоростей по глубине и изменения общего характера циркуляции незначительны. Наиболее важной интегральной оценкой изменений в температурном режиме и течениях являются изменения в экосистеме озера — это изменения в продуктивности фитопланктона и его структуре.

8.3. Воспроизведение функционирования экосистемы Ладожского озера

Общие замечания. Каждое озеро для своего водосбора является элементом ландшафта, аккумулирующим все вещества, поступающие с водосбора с речным притоком, береговым стоком, а также с выпадающими осадками. Практически из всех озер вытекает только одна река. Все приносимые в озеро вещества своими частями либо оседают в озерной котловине, либо включаются в озерный круговорот в процессе функционирования экосистемы озера, либо выносятся вытекающей рекой. При этом, естественно, имеют место законы сохранения или изменения для субстанций.

В экосистеме озера, находящейся в устойчивом состоянии, имеет место приблизительный баланс между продуцированием органического вещества в процессе фотосинтеза и деструкцией отмершего органического вещества. Преобладание одного процесса над другим год от года может меняться, однако за определенное число подряд

идуших лет в устойчивом состоянии экосистемы практически будет иметь место баланс. Важной характеристикой состояния экосистемы озера является интенсивность биотических процессов, которая определяется уровнем концентрации биогенов в воде озера. Под биогенами имеются в виду углерод, азот, фосфор и кремний (С, N, P и S). Однако, как уже отмечалось, во многих пресноводных озерах основным регулирующим трансформацию экосистем биогеном является именно фосфор, так как дефицита других биогенов, как правило, не наблюдается. Более подробные разъяснения по поводу использования в моделях экосистемы Ладожского озера биогенов приводятся в работе, посвященной математическому моделированию экосистем (Астраханцев и др., 2003).

Динамика фосфорной нагрузки на Ладожское озеро представлена на рис. 8.3.1. До 1962 г. ежегодное поступление фосфора в Ладожское озеро не превосходило величины 2,43 тыс. т $P_{\text{общ}} \text{ год}^{-1}$. При этом концентрация растворенного в воде неорганического (минерального) фосфора не превышала 3 мкг P л⁻¹, а общего (минеральный + фосфор, входящий в состав органического вещества в воде озера) — 10 мкг $P_{\text{общ}} \text{ л}^{-1}$. Состояние озера при этом оценивалось как олиготрофное с высоким качеством воды (Антропогенное эвтрофирование..., 1982). К 1983 г. фосфорная нагрузка достигла уровня 8,1 тыс. т $P_{\text{общ}} \text{ год}^{-1}$, так что средняя концентрация минерального фосфора составила 12–15 мкг P л⁻¹, а концентрация общего фосфора — 23–25 мкг $P_{\text{общ}} \text{ л}^{-1}$. Таким образом, к 1983 г. Ладожское озеро перешло из олиготрофного состояния в мезотрофное, и возникла угроза перехода озера в эвтрофное состояние. После 1983 г. были приняты меры по снижению фосфорной нагрузки на водоем, в результате которых среднегодовая нагрузка за период 1984–1995 составляла 6,04 тыс. т P год⁻¹.

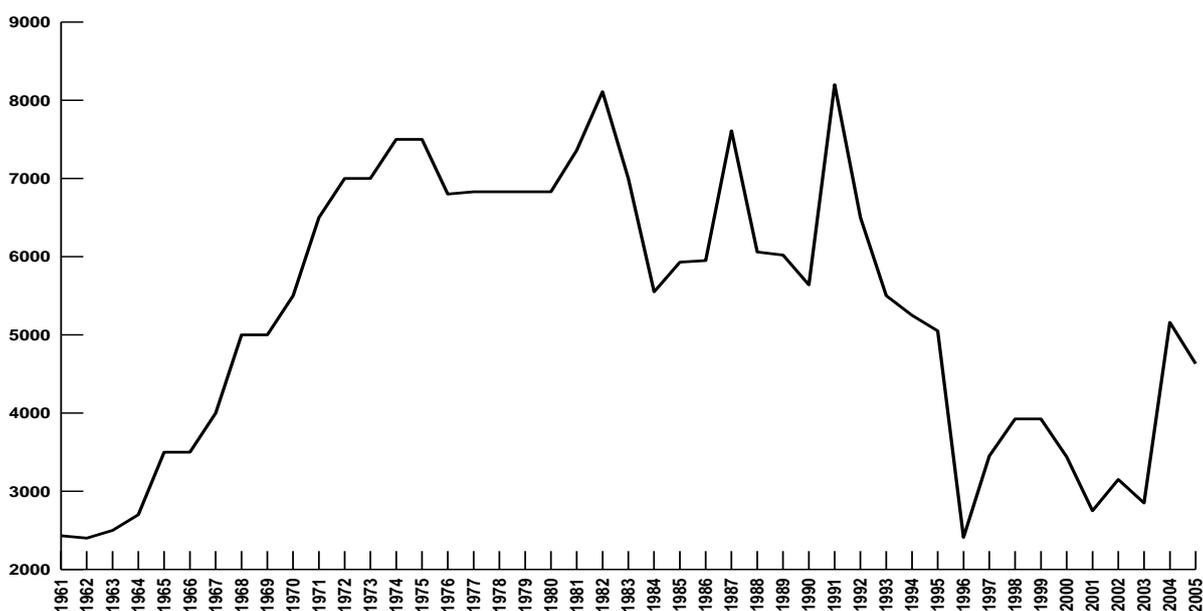


Рис. 8.3.1. Поступление фосфора в Ладожское озеро ($t P_{\text{общ}} \text{ год}^{-1}$) в период 1961–2005 гг. (Расплетина, 1992, табл. 17, С. 78–79; Кондратьев и др., 1997; Ладожское озеро..., 2002; Расплетина, 2006).

Процесс антропогенного эвтрофирования Ладожского озера достаточно хорошо изучен: переход Ладожского озера за период 1961–1983 гг. из олиготрофного состояния в развитое мезотрофное, а также последующее развитие его экосистемы нашли отражение в серии монографий (Антропогенное эвтрофирование..., 1982; Современное состояние..., 1987; Ладожское озеро: критерии..., 1992; Ладожское озеро. Мониторинг..., 2000; Ладожское озеро: прошлое..., 2002), а также в трудах международных симпозиумов, посвященных Ладожскому озеру и другим большим озерам (1993, 1996, 1999, 2002, 2006, 2009, 2012). Результаты исследований процесса антропогенного эвтрофирования озера методами математического моделирования представлены в работах (Меншуткин и Воробьева, 1987; Astrakhantsev et al., 1996; Menshutkin et al., 1998; Rukhovets et al., 2003; Руховец и др., 2003а; Астраханцев и др., 2003). С помощью математических моделей был воспроизведен процесс антропогенного эвтрофирования озера за период 1961–2005 гг. Результаты моделирования позволили уточнить многие количественные оценки процесса эвтрофирования и получить представление о периодах функционирования экосистемы, для которых практически отсутствуют данные наблюдений (поздняя осень, зима и ранняя весна).

Как показали результаты исследований, состояние озера за период 1996–2005 гг. несколько улучшилось по сравнению с наиболее критичным периодом начала 1980-х гг. (Румянцев, Драбкова, 2006). Связано это, как хорошо известно, со снижением антропогенной нагрузки, вызванной экономическим кризисом 1990-х гг.: остановкой многих производств, сокращением посевных площадей и численности поголовья скота, резким сокращением использования удобрений и т. д. (Ладожское озеро..., 2002). Однако снижение антропогенной нагрузки не привело к существенному изменению тенденций трансформации экосистемы озера. По-прежнему остается актуальной проблема улучшения качества воды в озере (Ладожское озеро..., 2002). На фоне некоторого улучшения (уменьшение концентрации фосфора в воде озера и вызванное этим снижение продукции фитопланктона), наблюдается дальнейшая дестабилизация такого элемента экосистемы, как зообентос (Курашов, 2002).

В недавних публикациях (Петрова и др., 2005; Румянцев и Драбкова, 2006; Петрова и др., 2010; Rukhovets & Filatov (Eds) (2010); Руховец и др., 2010, 2011), посвященных, в частности, трансформации экосистемы Ладожского озера в период 1996–2005 гг., отмечается, что достигнутое в этот период снижение фосфорной нагрузки до среднегодового уровня в $3,58 \text{ тыс. т P год}^{-1}$, т. е. не менее, чем в 1,5 раза по сравнению с

предыдущим периодом 1964–1995 гг., не привело к ожидаемому снижению продукции фитопланктона. Дело в том, что существовало представление, будто снижение фосфорной нагрузки должно приводить к снижению продукции фитопланктона. В работах (Петрова и др., 2005, 2010) дано объяснение отмеченного явления. Их авторы пришли к выводу, что рост численности бактериопланктона и водных грибов, во-первых, ускорил внутриводоемный круговорот фосфора и, во-вторых, стал причиной разложения наиболее консервативных фракций растворенного в воде органического вещества. Исследование этого явления было продолжено в работах (Руховец и др., 2010, 2011), в которых с помощью моделирования воспроизведена вполне реалистично произошедшая трансформация экосистемы Ладожского озера. В период 2006–2011 гг. поступление фосфора в Ладожское озеро с речным притоком составляет 3–5 тыс. т P год⁻¹ в зависимости от водности года (Румянцев и др., 2012). В этой работе приводятся данные о том, что озеро продолжает находиться в слабо мезотрофном состоянии.

Здесь уместно отметить, что процесс антропогенного эвтрофирования большого стратифицированного озера, запущенный ростом биогенной нагрузки, не поддается остановке в короткие сроки даже при значительных затратах на снижение нагрузки. Более того, процесс антропогенного эвтрофирования может продолжаться даже при снижении антропогенной нагрузки до уровня, имевшего место в олиготрофный период состояния озера. Примером этого может служить Ладожское озеро (Руховец и др., 2010, 2011).

Модели экосистемы Ладожского озера. Моделирование экосистем больших стратифицированных озер требует применения трехмерных моделей ввиду большого разнообразия гидрофизических условий в различных частях водоема, связанного именно с его большими размерами.

Создание моделей экосистемы Ладожского озера было начато В.В. Меншуткиным. Третья по счету из этих моделей была создана им вместе с О.Н. Воробьевой в 1987 г. (Современное состояние..., 1987). Следующей была модель А.В. Леонова, М.Н. Осташенко и Е.Н. Лаптевой (1991). Начиная с 1992 года к настоящему времени авторами данной главы создана серия моделей экосистемы Ладожского озера с разной степенью подробности воспроизводящих функционирование основных звеньев его экосистемы. Большая часть этих моделей представлена в монографии (Астраханцев и др., 2003). Биотическая часть этих моделей концептуально создана на основе биотической части моделей В.В. Меншуткина и О.Н. Воробьевой (1987, 1989).

Во всех перечисленных моделях функционирование экосистемы представлено как внутриводоемный круговорот биогенов. Причем в более ранних моделях это круговорот

азота и фосфора, как в работе В.В. Меншуткина и О.Н. Воробьевой (1987), а в более поздних, созданных после 1997 года, это круговорот только фосфора. Использование одного биогена позволило существенно сократить число переменных, описывающих состояние экосистемы. Стремление уменьшить число переменных связано с тем, что при значительном числе переменных усложняется структура модели и ее настройка (верификация и калибровка) становится проблематичной (Меншуткин, 1993).

В разных моделях из работы Г.П. Астраханцева и его соавторов (Астраханцев и др., 2003) для описания экосистемы Ладожского озера используется разное число переменных. Наиболее подробно описан в моделях фитопланктон. В больших стратифицированных озерах основным продуцентом органического вещества является сообщество планктонных водорослей — фитопланктон. Это — первый элемент биоты, откликающийся на изменение концентрации биогенных элементов в воде озера. Зависимость состава и интенсивности развития фитопланктона от абиотических факторов водной среды (температуры, освещенности, условий перемешивания и т. д.) и положения первичного продуцента в трофической цепи озера определяют его центральную роль в экосистеме. Флористический состав фитопланктона в значительной степени определяет качество воды в водоеме (Петрова, 1990).

В базовой модели (Menshutkin et al., 1998), на основе которой построены все модели, созданные после 1998 г. (Астраханцев и др., 2003), использовался только один биоген — фосфор. В этой модели фитопланктон представлен тремя экологическими группами: к первой отнесены виды, преобладающие весной, ко второй — преобладающие летом, к третьей — летне-осенние.

В базовой модели зоопланктон представлен единой биомассой, остальные переменные — это детрит (фосфор в детрите), растворенное в воде органическое вещество (фосфор в нем), растворенный в воде минеральный фосфор и растворенный в воде кислород, являющийся важным индикатором состояния экосистемы. При дефиците кислорода гибнет рыба и ухудшается качество воды.

На основе базовой модели создана модель, в которой зоопланктон разделен на мирный (фильтрующий) и хищный, питающийся мирным. Тем самым иерархическая структура модели стала иметь уже три трофических уровня. Была создана еще одна модель: в состав базовой модели была введена подмодель зообентоса — «населения» дна (Астраханцев, Минина и др., 2003).

Из всех моделей наиболее полное описание фитопланктона дано в модели сукцессии фитопланктона. Важно отметить, что основным механизмом трансформации

экосистемы озера как в условиях естественной эволюции, так и при антропогенном эвтрофировании служит сукцессия (направленная смена) видового состава гидробионтов всех трофических уровней, в первую очередь — фитопланктона.

Модель сукцессии фитопланктона отличается от базовой модели только тем, что в ней фитопланктон представлен девятью комплексами, названными по входящим в них доминантам. Первые четыре комплекса — это диатомовые, пятый — желтозеленые, еще четыре комплекса — синезеленые. Кроме того, в состав модели входят: зоопланктон, представленный единой сырой биомассой; растворенные в воде минеральные формы фосфора; фосфор в детрите, представляющий в модели детрит; растворенное в воде органическое вещество, представленное содержащимся в нем фосфором; растворенный в воде кислород. Таким образом, в модели сукцессии для описания состояния экосистемы Ладожского озера используется 14 переменных: больше, чем во всех предыдущих моделях авторов главы.

Однако в этой модели ее иерархическая структура имела только два трофических уровня в отличие от модели, в которой было три трофических уровня, так как зоопланктон был разделен на мирный (фильтрующий) и хищный. Кроме того, в модели сукцессии не был представлен зообентос (население дна). Это очень значимый элемент системы, так как его можно использовать как индикатор состояния экосистемы озера (Курашов, 2000). Дело в том, что зообентос — наиболее консервативный элемент экосистемы и потому степень деградации зообентоса может служить характеристикой состояния экосистемы.

О создании комплексной модели. Анализ совокупности созданных моделей для экосистемы Ладожского озера показал, что совершенно естественно попытаться объединить все модели в одну, в которой для описания экосистемы используются все переменные в уже созданных моделях. Таким образом, создание комплексной модели, в которой зоопланктон будет разделен на мирный и хищный, и в которую будет включена подмодель зообентоса, существенно обогатит модель как инструмент исследования изменений в экосистеме озера. Во-первых, вместо двух трофических уровней окажутся представленными три трофических уровня экосистемы; во-вторых, разделение зоопланктона важно для подключения в дальнейшем модели ихтиоценоза водоема; в-третьих, учет зообентоса важен для определения состояния экосистемы, так как состояние зообентоса является важным индикатором состояния экосистемы озера в целом. Наконец, включение зообентоса позволит уже не считать такую модель только моделью пелагиали. Комплексная модель позволит определять одновременно реакцию всех

основных звеньев экосистемы на возможные изменения внешних воздействий, например, таких, как изменения климата или изменения антропогенной нагрузки.

Комплексная модель экосистемы Ладожского озера была создана в два этапа. Первоначальный вариант был создан в 2004 г., а последний — в 2008–2010 гг. Он кратко описан в соответствующей монографии (Руховец и др., 2009). Далее будет приведена математическая формулировка комплексной модели.

В 2009–2011 гг. модель сукцессии фитопланктона Ладожского озера подверглась модернизации в связи с исследованием процесса трансформации экосистемы озера при снижении фосфорной нагрузки, произошедшей после 1995 г.

Математическая формулировка комплексной модели. Состояние экосистемы озера для всех моментов времени в комплексной модели, как и в других моделях авторов данной главы, описывается трехмерными полями концентраций биогенов (здесь конкретно фосфора), гидробионтов (девятью комплексами фитопланктона и мирным и хищным зоопланктоном), мертвого органического вещества (детрита и растворенного в воде органического вещества), растворенного в воде кислорода. Кроме того, зообентос представлен в модели обобщенной биомассой, распределенной по дну водоема. В рамках модели воспроизводятся следующие процессы: перенос субстанций течениями, турбулентная диффузия и оседание субстанций, трансформация органического вещества и биогенов. Эти процессы описываются с помощью краевых задач для системы уравнений в частных производных. Процесс изменения биомассы зообентоса описывается обыкновенным дифференциальным уравнением, параметрически зависящим от координат точек дна водоема.

Система уравнений модели включает 16 уравнений: 15 уравнений в частных производных и одно обыкновенное дифференциальное уравнение. В состав переменных модели входят:

Фитопланктон — сырая биомасса (мг л^{-1}):

<i>A1 – Aulacosira islandica</i>	}	— диатомовые,
<i>A2 – Asterionella formosa</i>		
<i>A3 – Diatoma elongatum</i>		
<i>A4 – Fragilaria crotonensis</i>		
<i>A5 – Tribonema affine</i>	}	— желтозеленые,

$$\left. \begin{array}{l} A6 - Oscillatoria tenuis \\ A7 - Aphanisomenon flos-aquae \\ A8 - Microcystis aeruginosa \\ A9 - Woronichinia naegeliana \end{array} \right\} \text{ — синезеленые;}$$

Зоопланктон — сырая биомасса (мг л^{-1}),

Z_f — мирный зоопланктон (фильтраторы),

Z_p — хищный зоопланктон (хищники);

DP — детритный фосфор, называемый детритом, мкг Р л^{-1} ;

P — растворенные в воде минеральные формы фосфора (мкг Р л^{-1});

DOP — растворенное в воде органическое вещество, (мкг Р л^{-1});

OX — растворенный в воде кислород, (мг ОХ л^{-1});

B — зообентос — сырая биомасса (г м^{-2}).

Уравнения модели выпишем в декартовых координатах (x, y, z) в предположении, что плоскость xOy совпадает с невозмущенной поверхностью водоема, а ось z направлена вертикально вверх. В трехмерной области Ω , занимаемой водоемом, уравнения модели имеют вид

$$\frac{\partial C}{\partial t} + K(\vec{v} - \vec{v}_C, C) = D(v, C) + L_C, \quad (8.3.1-8.3.15)$$

где $C = A1, A2, \dots, A9, Z_f, Z_p, P, DP, DOP, OX$.

Здесь

$$K(\vec{v} - \vec{v}_C, C) \equiv u \frac{\partial C}{\partial x} + v \frac{\partial C}{\partial y} + (w - w_C) \frac{\partial C}{\partial z}, \quad (8.3.16)$$

где $\vec{v} = (u, v, w)$ — вектор скорости течения воды в озере; $\vec{v}_C = (0, 0, -w_C)$ — скорость оседания субстанции C , $w_C > 0$;

$$D(v, C) \equiv \frac{\partial}{\partial x} \left(v_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(v_y \frac{\partial C}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(v_z \frac{\partial C}{\partial z} \right), \quad (8.3.17)$$

v_x, v_y, v_z — коэффициенты турбулентной диффузии. Выражения $K(\vec{v} - \vec{v}_C, C)$, $D(v, C)$ представляют собой операторы переноса и диффузии субстанций. В уравнениях (8.3.1) – (8.3.15) члены L_C представляют собой нелинейные операторы гидробиохимической трансформации субстанций.

В систему уравнений (8.3.1) – (8.3.15) не входит уравнение для биомассы зообентоса. При этом биомасса зообентоса в отличие от планктона относится не к объему воды, а к площади дна. Уравнение для единой обобщенной биомассы зообентоса имеет вид

$$\frac{dB}{dt} = L_B, \quad (8.3.18)$$

где L_B — нелинейный оператор, описывающий биохимическую трансформацию биомассы зообентоса. Поскольку передвижение зообентоса по дну водоема не учитывается в данной модели, для зообентоса использовано обыкновенное дифференциальное уравнение, параметрически зависящее от координат точек дна, в которых записывается это уравнение.

Конструкции всех нелинейных операторов L_C , $C = A_1, A_2, \dots, A_9, Z_f, Z_p, P, DP, DOP, OX, L_B$

в рамках разумного размера этой главы описать не представляется возможным.

Поэтому приведем конструкцию только одного из них, а именно L_{A_1} :

$$L_{A_1} = \text{Prod}[A_1] - m_p[A_1]A_1 - E_p[A_1], \quad (8.3.19)$$

где $\text{Prod}[A_1] = P/B \cdot A_1$ — первичная продукция, понимаемая как скорость прироста биомассы первого комплекса фитопланктона (Алимов, 1989); P/B — коэффициент прироста, зависящий от температуры воды, солнечной радиации (уровня освещенности), концентрации минерального фосфора, а также концентрации биомассы фитопланктона; $m_p[A_1]$ — коэффициент смертности для комплекса A_1 ; $E_p[A_1]$ — скорость выедания зоопланктоном этого комплекса фитопланктона. Подробное описание конструкции операторов L_C можно найти в специальной литературе (Rukhovets et al., 2003; Астраханцев и др., 2003). Отметим, что член L_{A_1} описывает скорость изменения биомассы первого комплекса фитопланктона как баланс между скоростью прироста собственной биомассы в процессе фотосинтеза — продукцией, скоростью отмирания, а также скоростью потребления биомассы фитопланктона зоопланктоном.

Для системы уравнений (8.3.1) – (8.3.15) должны быть сформулированы краевые условия. Так, на поверхности водоема при $z = 0$ задаются потоки субстанций через поверхность в виде

$$v_z \frac{\partial C}{\partial z} + w_C C = Q_C, \quad (8.3.20)$$

где Q_C — заданные потоки субстанций через поверхность. Например, с осадками на поверхность водоема могут поступать соединения фосфора.

На твердых границах водоема (дне и боковых границах) поток субстанций в озеро должен быть равен нулю:

$$\frac{\partial C}{\partial N} = 0, \quad (8.3.21)$$

где выражение

$$\frac{\partial C}{\partial N} \equiv v_x \frac{\partial C}{\partial x} \cos(n, x) + v_y \frac{\partial C}{\partial y} \cos(n, y) + v_z \frac{\partial C}{\partial z} \cos(n, z)$$

— производная по конормали.

В створах втекающих в озеро рек граничные условия имеют вид

$$\frac{\partial C}{\partial N} - \vec{v}_n (C - C_r) = 0, \quad (8.3.22)$$

где C_r — заданная концентрация субстанции C в воде реки, \vec{v}_n — проекция вектора скорости течения на внешнюю нормаль к поверхности живого сечения реки. В створе вытекающей реки ставится краевое условие (8.3.21).

Закон изменения (сохранения) количества вещества субстанций в водоеме.

Важным и необходимым свойством моделей экосистем является выполнение для них закона сохранения вещества при отсутствии источников и стоков или закона изменения, если есть обмен веществом на границах водоема. Выполнение закона сохранения обеспечивается, с одной стороны, использованием поля скоростей течений, для которого выполняется закон сохранения массы воды, с другой стороны, консервативностью конструкций операторов, описывающих трансформацию органического вещества (живого и мертвого) и биогенов.

Проекции векторов скоростей течений, используемые в моделях экосистемы, удовлетворяют уравнению неразрывности (Астраханцев и др., 2003).

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0. \quad (8.3.23)$$

Кроме того, формулировка граничных условий в модели гидротермодинамики, представленной выше, такова, что имеет место закон сохранения (изменения) массы воды (Астраханцев и др., 2003). Предположим, что в каждом элементарном объеме, если не учитывать процессы переноса, турбулентной диффузии и оседания субстанций, выполняется баланс по фосфору. Это вполне естественное предположение формулируется в виде равенства

$$P_{\text{total}} \equiv k_p \left(\sum_{J=1}^9 AJ \right) + k_z (Z_f + Z_p) + D + DP + DOP = \text{const}. \quad (8.3.24)$$

В этом равенстве не учитывается ради простоты изложения наличие в модели зообентоса.

Чтобы выполнялось равенство (8.3.24), необходимо потребовать выполнение следующего равенства

$$\sum_{J=1}^9 k_p L_{AJ} + k_z (L_{Z_f} + L_{Z_p}) + L_p + L_{DP} + L_{DOP} = 0. \quad (8.3.25)$$

Величины k_P и k_Z в равенствах (8.4.24), (8.4.25) — это коэффициенты пересчета для определения количества фосфора в сырой биомассе фито- и зоопланктона (Астраханцев и др., 2003, С. 200; Астраханцев, Минина и др., 2003).

Во всех моделях экосистемы Ладожского озера в специальной литературе (Меншуткин, Воробьева, 1987; Астраханцев и др., 2003; Rukhovets & Filatov (Eds.), 2010), в том числе и в новой модели, равенства типа (8.3.25) имеют место. Подробно проблема необходимости выполнения законов сохранения вещества субстанций в моделях экосистем рассмотрена в работах Астраханцева и соавторов (Astrakhansev & Rukhovets, 1994; Астраханцев и др., 2003, Гл. 5).

Для получения формулировки закона изменения общего фосфора $P_{\text{общ}}$ в рамках модели умножим уравнения (8.3.1) – (8.3.9) на k_P уравнения (8.3.10), (8.3.11) на k_Z и после этого уравнения (8.3.1) – (8.3.14) сложим и проинтегрируем полученное уравнение по области Ω . В итоге получим равенство

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{\Omega} P_{\text{total}} d\Omega = - \int_{\Omega} K(\vec{v} - \vec{v}_C, P_{\text{total}}) d\Omega + \int_{\Omega} D(v, P_{\text{total}}) d\Omega. \quad (8.3.26)$$

Проведем интегрирование по частям в правой части (8.4.26), воспользуемся уравнением (8.3.23), граничными условиями (8.3.20), (8.3.22), а также свойствами проекций вектора скорости на внешнюю нормаль к границам водного тела. В итоге получим равенство

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} \int_{\Omega} P_{\text{total}} d\Omega = & \int_{S_0} Q_{P_{\text{total}}} dS - \int_{S_{\text{out}}} \vec{v}_n P_{\text{total}} dS - \\ & - \int_{S_{\text{in}}} \vec{v}_n \left\{ \left[(DP)_r + (P)_r + (DOP)_r \right] + k_P \sum_{J=1}^9 (AJ)_r + k_Z (Z_f + Z_p)_r \right\} dS + \\ & + \int_{S_2} (w_{DP} DP + w_P P) \cos(n, z) dS. \end{aligned} \quad (8.3.27)$$

Это равенство как раз представляет собой закон изменения общего фосфора. Здесь $Q_{P_{\text{total}}}$ — поток общего фосфора через поверхность озера S_0 ; S_{out} — створ вытекающей реки, а интеграл по этой области определяет вынос фосфора с вытекающей рекой (здесь — Невой). Третий интеграл в правой части (8.3.27) определяет поступление фосфора в озеро через створы S_{in} втекающих рек. Концентрации всех поступающих в озеро субстанций считаются заданными. Последний интеграл в (8.3.27) определяет поток фосфора на дно озера S_2 вследствие оседания субстанций. Соотношение (8.3.27) исключительно важно для построения дискретных компьютерных моделей: во-первых, для контроля вычислений, во-вторых, для проведения расчетов на длительное время.

О построении дискретных моделей. Для компьютерной реализации комплексной модели использовались те же алгоритмы, что и для модели сукцессии (Rukhovets et al., 2003; Астраханцев и др., 2003). Создание трехмерных дискретных моделей — достаточно сложная и отдельная задача. Важно отметить, что возможности даже достаточно мощных компьютеров позволяют решать задачи лишь на сетках, для которых, строго говоря, не всегда можно утверждать, что дискретные модели в полной мере адекватно воспроизводят «поведение» математических моделей. Поэтому особенно важно требовать от дискретных моделей правильного воспроизведения основных качественных и количественных свойств модели. Как отмечалось многими авторами (Ладыженская, 1970; Пененко, 1981; Марчук и др., 1987; Bryan, 1975; Blumberg & Mellor, 1987; Astrakhansev & Rukhovets, 1994), при создании дискретных моделей желательно добиваться того, чтобы:

- 1) – между блоками дискретной модели выполнялись те же соотношения, что и между блоками математической модели;
- 2) – для дискретной модели выполнялись законы сохранения (изменения), являющиеся дискретными аналогами законов сохранения математической модели, причем они должны выполняться точно, то есть с точностью до ошибок округления, а не с точностью до погрешности аппроксимации.

Особенно важны эти положения при создании моделей, предназначенных для счета на длительное время, что как раз необходимо для моделирования процессов в больших стратифицированных озерах. Подробно с алгоритмами построения дискретных моделей экосистем можно познакомиться в специальной литературе (Меншуткин, 1993; Астраханцев и др., 2003).

8.4. Результаты исследований Ладожского озера методами математического моделирования

В этом разделе приводится краткая информация о результатах моделирования распространения примесей (загрязняющих веществ) в озере, а также рассмотрены некоторые результаты воспроизведения функционирования экосистемы озера и ее трансформации в период после 1961 г. по настоящее время.

Моделирование распространения примесей и загрязняющих веществ. В исследованиях загрязнения Ладожского озера используются модели гидродинамики и трехмерная модель распространения примеси в воде озера, которая математически совпадает с моделью изменения температуры водного тела озера. При этом следует отметить, что для моделирования распространения гидродинамически нейтральной примеси в рамках моделей

геофизической гидродинамики в гидростатическом приближении необходимо интегрирование системы уравнений гидротермодинамики и уравнения распространения примеси проводить совместно, выполняя процедуру приспособления (*adjustment*) поля концентраций примеси по тем же самым формулам, по которым осуществляется приспособление поля температуры на каждом шаге интегрирования. Для Ладожского озера решались задачи о переносе загрязнений по акватории, в частности, тяжелых металлов и алюминия (Руховец др., 2003б). Кроме того, была решена важная задача о времени замены воды в озере. Дело в том, что упомянутая ранее величина — время условного водообмена, является оценкой снизу для времени замены воды в водоеме, которое является значимой характеристикой проточности водоема (Астраханцев и др., 2003). Расчеты показали, что в рамках климатической циркуляции за 8 лет количество «старой» воды в озере уменьшается в два раза.

Воспроизведение функционирования экосистемы Ладожского озера. С помощью моделей экосистемы Ладожского озера авторы неоднократно проводили эксперименты по воспроизведению процесса антропогенного эвтрофирования Ладожского озера. Так, в работе Л.А. Руховца (Rukhovets et al., 2003) с помощью модели сукцессии воспроизведено функционирование экосистемы озера для периода 1961–1995 гг. Затем в книге Г.П. Астраханцева (Астраханцев и др., 2003) с помощью той же модели было воспроизведено круглогодичное функционирование экосистемы Ладожского озера уже для периода 1961–2000 гг. В этих вычислительных экспериментах в условиях изменяющейся фосфорной нагрузки для условий климатической циркуляции получена информация о круглогодичном изменении всех переменных модели для всего периода 1961–2000 гг. Это очень важная информация, так как эмпирическая информация о динамике трансформации экосистемы озера собирается не чаще 2–3 раз в год. Для проведения расчетов в качестве начальных условий были взяты значения построенного периодического решения при специально подобранных внешних воздействиях. Так, на рис. 8.4.1 представлена годовая динамика суммарной биомассы фитопланктона, осредненной по эпилимниону, для ряда лет из 1961–2005 гг. (Rukhovets & Filatov (Eds.), 2010).

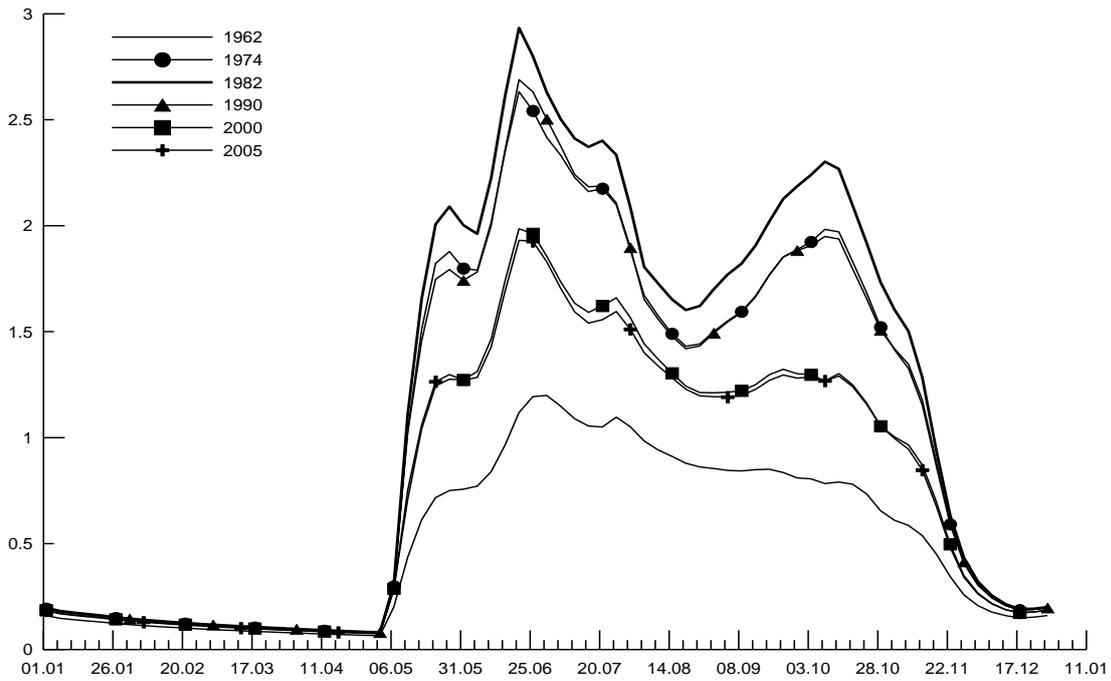
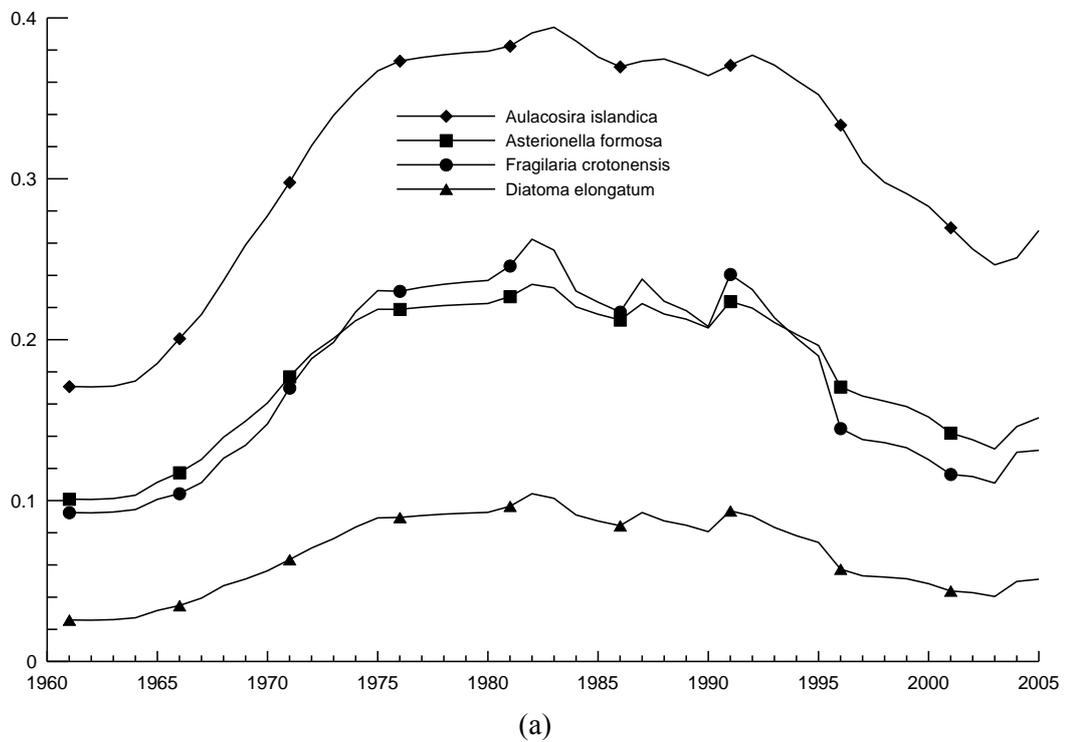


Рис. 8.4.1. Годовая динамика биомассы фитопланктона (мг л^{-1}) в эпилимнионе (результаты моделирования по модели сукцессии).

На рис. 8.4.2. (а, б) представлен процесс сукцессии фитопланктона Ладожского озера в период 1961–2005 гг., воспроизведенный в этом же вычислительном эксперименте. В этом эксперименте фосфорная нагрузка изменялась в соответствии с графиком на рис. 8.4.1. Расчеты проводились в условиях климатической циркуляции.



(а)

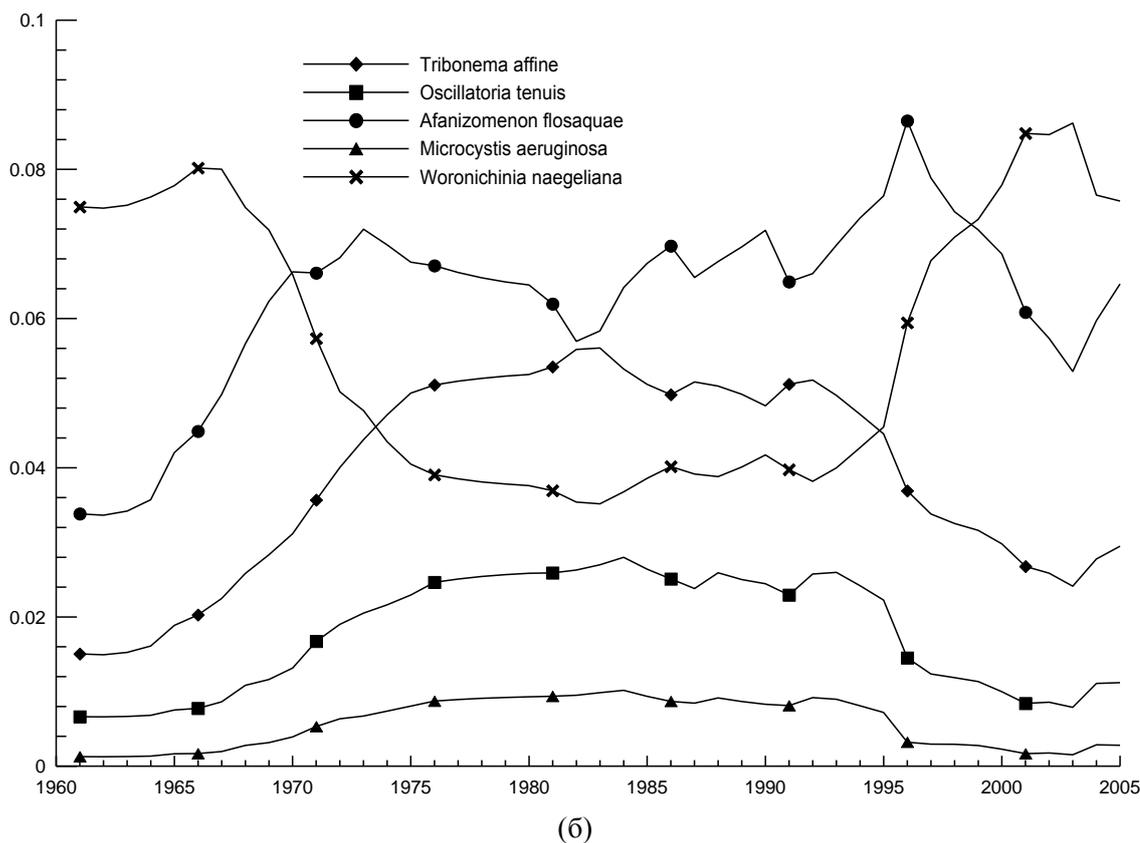


Рис. 8.4.2. Изменение среднегодовой биомассы (мг л^{-1}) комплексов фитопланктона (а) и (б), осредненной по эпилимниону (результаты моделирования по модели сукцессии).

В рамках исследования, посвященного оценке влияния на экосистему Ладожского озера возможных изменений климата на водосборе озера вследствие глобального потепления, также проводились вычислительные эксперименты по воспроизведению функционирования экосистемы озера. Для Ладожского озера в работе Л.А. Руховца (Руховец и др., 2006) функционирование экосистемы было воспроизведено для периода 1961–2000 гг. и были проведены прогностические расчеты на перспективу до 2015 г. для пяти построенных циркуляций Ладожского озера.

Результаты этих исследований подробно описаны (Руховец, Филатов и др., 2006; Rukhovets & Filatov (Eds.), 2010). Так, на рис 8.4.3. представлена годовая динамика сырой суммарной биомассы фитопланктона при нагрузке $6,1 \text{ тыс. т Р год}^{-1}$, средней для периода 1984–1990 гг. Для этого периода имеются подробные данные мониторинга состояния озера (Ладожское озеро..., 1992). Проведенные вычислительные эксперименты показали, что влияние возможных изменений климата на водосборе озера до середины XXI в. незначительно. По-прежнему основным фактором трансформации экосистем озер является изменение антропогенной, прежде всего биогенной, нагрузки.

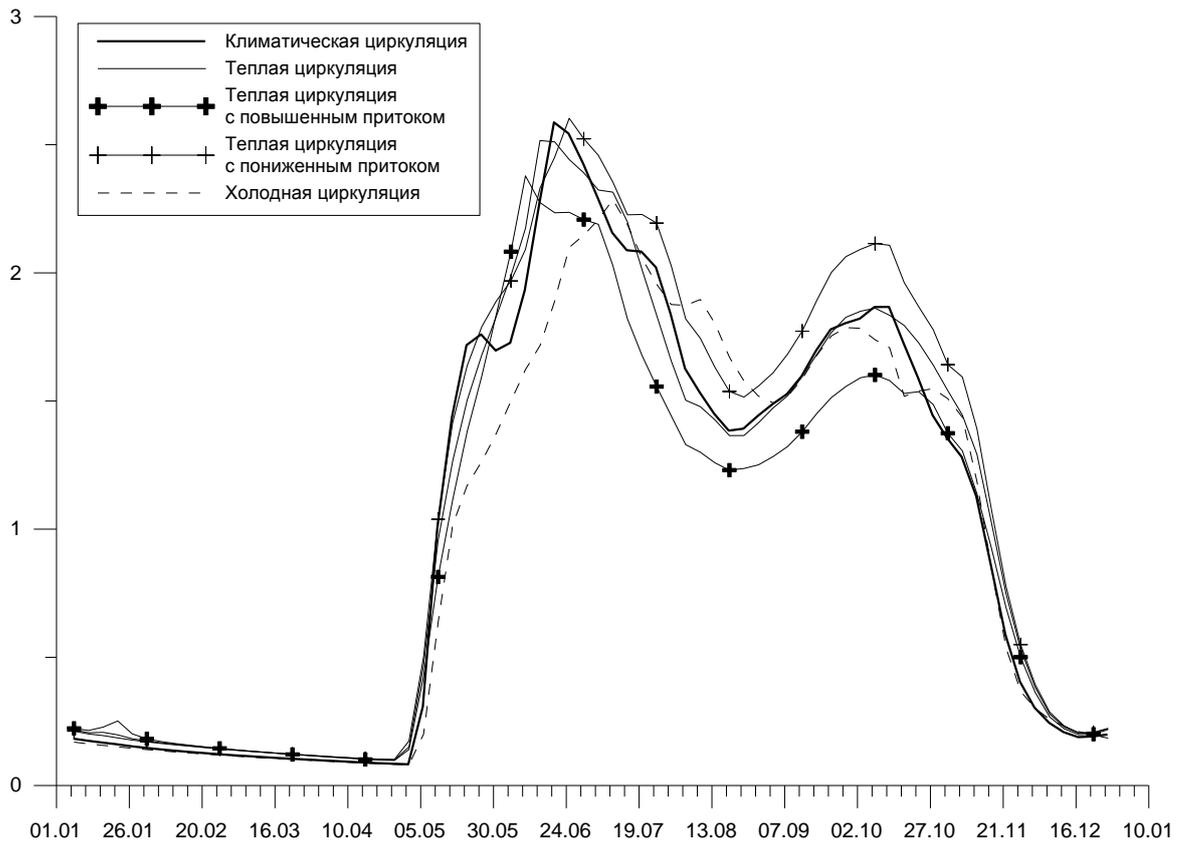


Рис. 8.4.3. Годовая динамика суммарной биомассы фитопланктона (мг л^{-1}) в эпилимнионе при нагрузке $6,1 \text{ тыс. т Р год}^{-1}$ для пяти циркуляций (результаты моделирования по модели сукцессии).

Верификация и применение комплексной модели. Рассмотрим результаты моделирования, полученные с помощью комплексной модели. Перед тем как использовать эту модель она была верифицирована. Верификация модели была проведена по стандартной схеме, принятой в работах по этой тематике (Menshutkin et al., 1998; Rukhovets et al., 2003; Астраханцев и др., 2003), для нагрузки $6,1 \text{ тыс т Р}_{\text{общ}} \text{ год}^{-1}$. Для условий климатической циркуляции было воспроизведено круглогодичное функционирование экосистемы Ладожского озера. Воспроизведение круглогодичной циркуляции состояло в построении периодического решения дискретной модели. Результаты вычислений были сопоставлены с данными, полученными осреднением данных наблюдений за период 1984–1990 гг.

Одной из важнейших характеристик состояния экосистемы является распределение общего фосфора $\text{Р}_{\text{общ}}$ в водном теле озера. В таблице 8.4.1. представлено сопоставление результатов моделирования с данными наблюдений. Оно показывает, что результаты, полученные с помощью комплексной модели, незначительно отличаются от результатов, полученных с помощью модели сукцессии.

Таблица 8.4.1.

Средняя концентрация фосфора ($\text{мкг P}_{\text{total}} \text{л}^{-1}$) в зонах озера при нагрузке $6,1 \text{ тыс. т P}_{\text{общ}} \text{год}^{-1}$ (Зоны озера: I — глубины до 15 м; II — глубины от 15 до 52 м; III — глубины от 52 до 85 м; IV — глубины свыше 85 м)

№ зоны	Весна: май - июнь			Лето: июль - август			Осень: сентябрь - октябрь		
	Данные	Комплексная модель	Модель сукцессии	Данные	Комплексная модель	Модель сукцессии	Данные	Комплексная модель	Модель сукцессии
I	30	32,2	30,9	33	27	24,3	30	25,5	23,1
II	24	24,8	23,8	23	23,4	21,9	24	22,4	21
III	20	22	21,1	21	22,5	21,9	21	22,1	21,5
IV	20	20,6	19,0	21	21,3	20,7	21	22,1	21,6

Приведем также результаты того же вычислительного эксперимента, касающиеся распределения по дну озера зообентоса, в сопоставлении с данными наблюдений (Курашов, 1994) и результатами моделирования по базовой модели с включенным блоком зообентоса (Астраханцев и др., 2003).

Таблица 8.4.2.

Средние значения биомассы зообентоса (г P м^{-2}) на дне по зонам озера на 14,09 при нагрузке $6,1 \text{ тыс. т P}_{\text{общ}} \text{год}^{-1}$.

№ зоны	Данные	Комплексная модель	Базовая модель с зообентосом
I	6,7	7,2	5,4
II	8,2	8,7	7,9
III	1,9	2,1	2,7
IV	0,8	0,7	1,0

Результаты моделирования по обеим моделям показывают, что максимальное отличие данных наблюдений и результатов комплексной модели не превышает $0,5 \text{ г P м}^{-2}$, для базовой модели с зообентосом это отличие доходит до величины $1,8 \text{ г P м}^{-2}$.

Результаты, полученные с помощью комплексной модели, были сопоставлены с результатами моделирования с помощью базовой модели; модели с зоопланктоном, разделенным на мирный и хищный (модель названа моделью с двумя зоопланктонами) и модели сукцессии при нагрузке $6,1 \text{ тыс. т P}_{\text{общ}} \text{год}^{-1}$ в условиях климатической циркуляции. Эти результаты представлены на рис. 8.4.4.

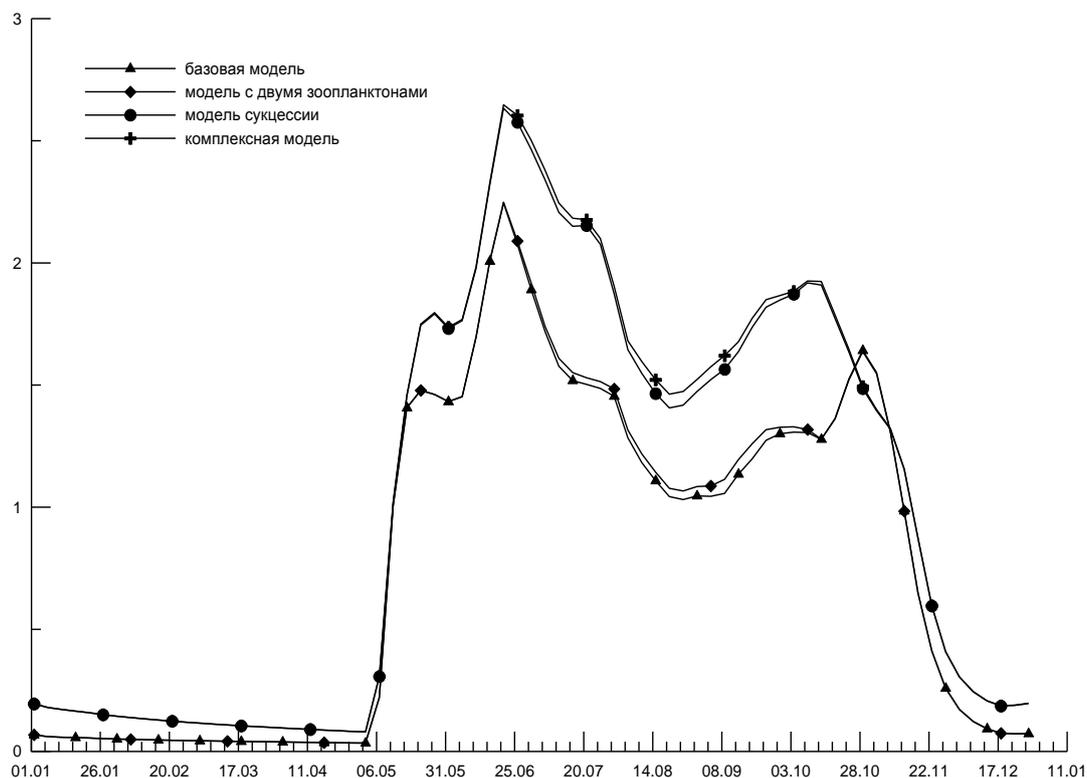


Рис. 8.4.4. Годовая динамика суммарной биомассы (мг л^{-1}) фитопланктона, осредненной по эпилимниону, при нагрузке $6,1 \text{ тыс. т } P_{\text{общ}} \text{ год}^{-1}$ (результаты моделирования).

Результаты верификации позволяют сделать заключение, что комплексная модель как по количественным показателям, так и качественно заменяет все созданные ранее модели, представленные в литературе (Астраханцев и др., 2003). Насколько известно авторам, ни для одного большого стратифицированного озера в нашей стране и в Европе нет столь развитой системы моделей. Подобные модели созданы только для американских Великих озер (например, Beletsky et al., 2007). Новая модель при воспроизведении круглогодичного функционирования экосистемы озера позволяет определять реакцию всех основных звеньев экосистемы на изменение антропогенной нагрузки и климатических факторов на водосборе озера (изменений водного и теплового балансов водосбора). Кроме того, модель позволяет более точно определять количественные оценки ассимиляционного потенциала озера по сбросу загрязняющих веществ и биогенов.

Приведем результаты моделирования по оценке влияния возможных изменений климата на экосистему Ладожского озера с помощью комплексной модели. При этом проведение расчетов ограничивалось только нагрузкой $6,1 \text{ тыс. т } P_{\text{общ}} \text{ год}^{-1}$ для двух циркуляций: теплой с повышенным притоком и холодной (Руховец и др., 2006). При расчетах использовались данные работы А.И. Тихомирова (Тихомиров, 1982). На рис. 8.4.5. представлена годовая динамика биомассы фитопланктона для трех циркуляций: климатической, теплой с повышенным притоком и холодной.

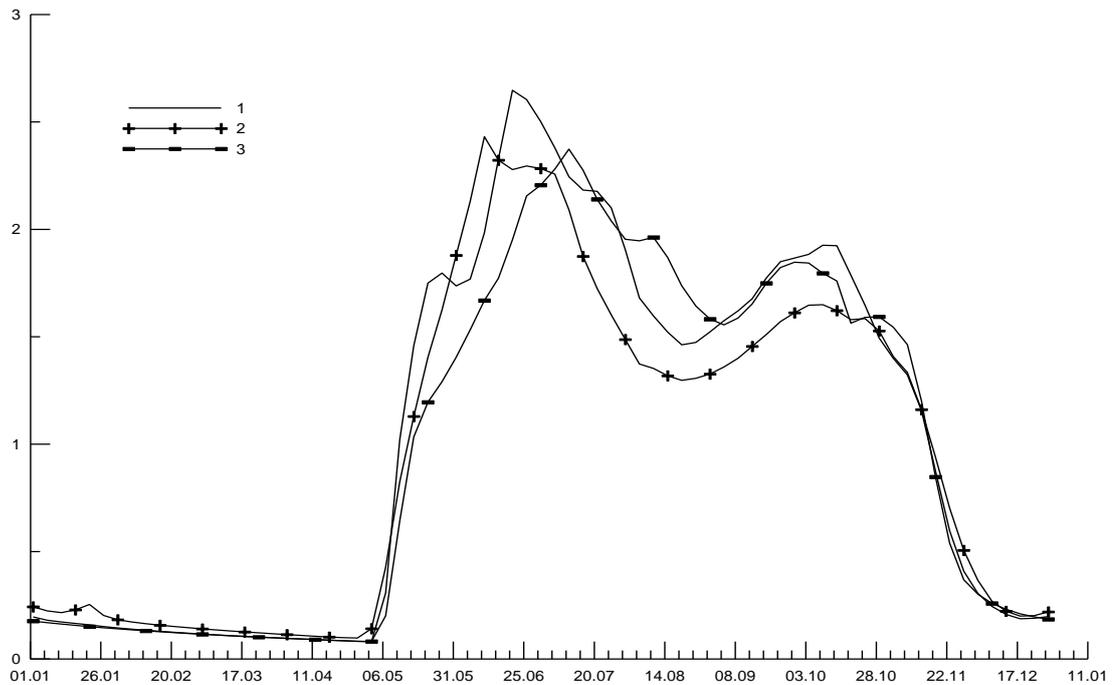


Рис. 8.4.5. Годовое изменение суммарной биомассы (мг л^{-1}) фитопланктона осредненной по эпилимниону при нагрузке $6,1 \text{ тыс. т Р}_{\text{общ}} \text{ год}^{-1}$ при разном климате: 1 — климатическая циркуляция, 2 — теплая с повышенным речным притоком, 3 — холодная (результаты моделирования по комплексной модели).

Различия динамики биомассы фитопланктона на этом рисунке незначительны. Интересно отметить, что в осенний период биомасса фитопланктона для теплой циркуляции меньше, чем для двух других циркуляций. Это объясняется тем, что водоросль *Aulacosira islandica*, самая крупная среди диатомовых, «предпочитает» более низкую температуру воды (она продуцирует при температуре не выше 8°C). На рисунках 8.4.6, 8.4.7 в тех же обозначениях представлена годовая динамика зоопланктона и зообентоса для трех циркуляций.

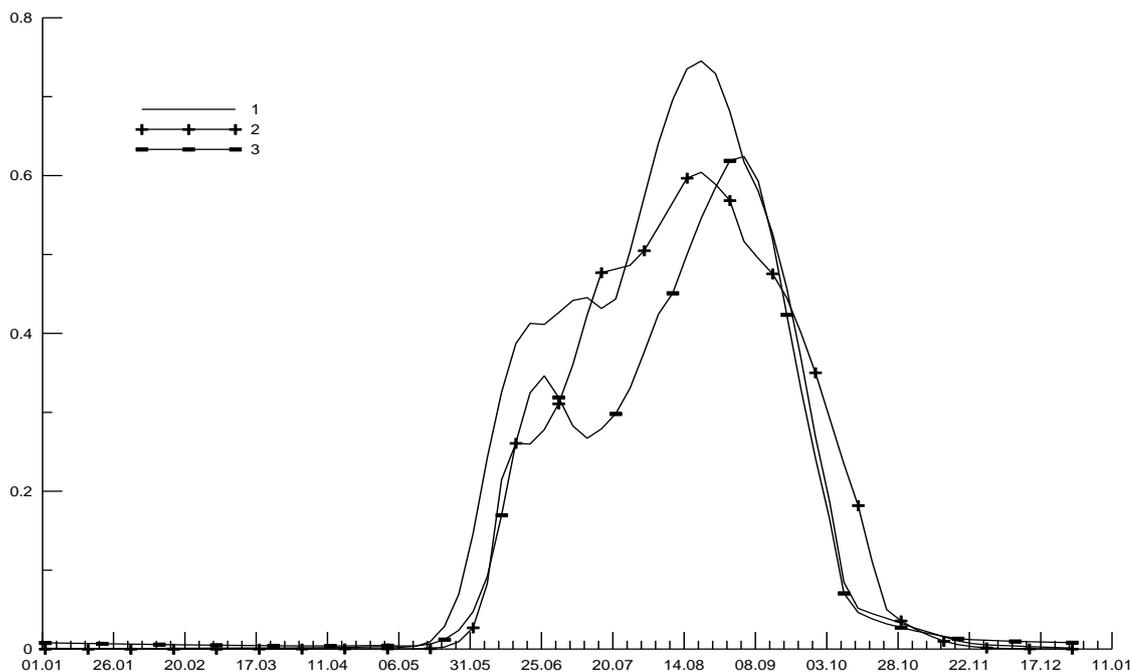


Рис. 8.4.6. Годовое изменение суммарной биомассы (мг л^{-1}) зоопланктона, осредненной по эпилимниону при нагрузке $6,1 \text{ тыс. т Р}_{\text{общ}} \text{ год}^{-1}$.

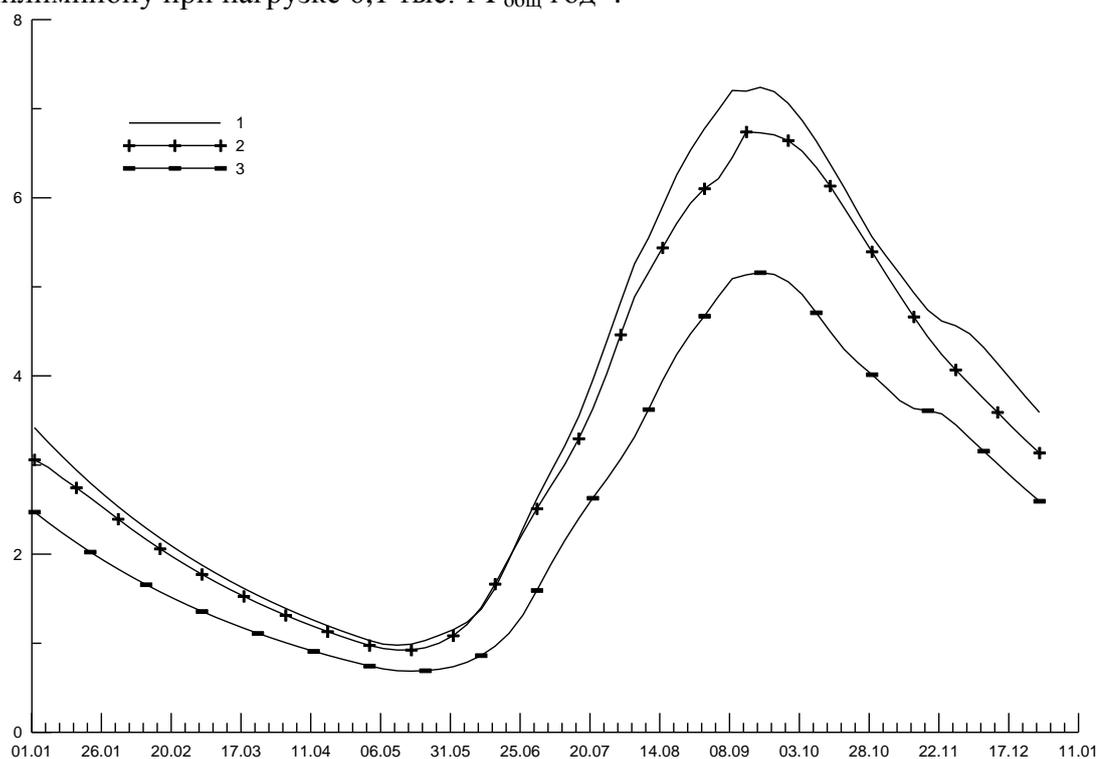


Рис. 8.4.7. Годовое изменение биомассы (г Р м^{-2}) бентоса, осредненной по дну, при нагрузке $6,1 \text{ тыс. т Р}_{\text{общ}} \text{ год}^{-1}$.

Анализ рис. 8.4.3 – 8.4.7 показывает, что в целом оценки влияния глобального потепления на экосистему озера, полученные как с помощью модели сукцессии (Руховец и др., 2006), так и с помощью комплексной модели, не отличаются. Новой является информация, относящаяся к зообентосу. Влияние на него заметнее, чем на другие элементы экосистемы.

Моделирование трансформации экосистемы Ладожского озера при снижении фосфорной нагрузки. Выполнены расчеты трансформации экосистемы Ладожского озера в условиях снижения фосфорной нагрузки в период после 1995 года. Эти исследования проводились в период 2010–2012 гг. Большая часть этих результатов опубликована в работах Л.А. Руховца (Руховец и др., 2010, 2011, 2012, 2013).

В сравнительно недавних публикациях (Петрова и др., 2005; Румянцев и Драбкова, 2006) весь процесс трансформации экосистемы Ладожского озера представлен как последовательность этапов, в течение которых трансформация экосистемы протекала по-разному. В табл. 8.4.3 приведены в агрегированном виде основные характеристики этих этапов, полученные в работах группы Л.А. Руховца (Руховец и др., 2010, 2011) на основе данных из упомянутых работ.

Таблица 8.4.3.

Средние для этапов данные о трансформации Ладожского озера (Расплетина, 2006; Петрова и др., 2005; Румянцев и Драбкова, 2006)

Этапы	1959–1962	1976–1983	1984–1995	1996–2005
Фосфорная нагрузка (т $P_{\text{общ}}$ год ⁻¹)	2430	7100	6040	3580
Концентрации общего фосфора (мкг $P_{\text{общ}}$ л ⁻¹) / конц. минерального фосфора (мкг $P_{\text{мин}}$ л ⁻¹), средние за период	$\frac{10}{3}$	$\frac{25}{11}$	$\frac{20}{8}$	$\frac{16}{4,5}$
Сырая биомасса суммарного фитопланктона (мг л ⁻¹), средняя за летний период в слое 0–2м	0,8	2,0–3,1	1,6	1,5

Этап трансформации экосистемы Ладожского озера в период 1996–2005 гг. характеризуется тем, что столь низкого уровня фосфорной нагрузки на озеро не наблюдалось в период 1976–1995 гг. Интерес к этому этапу трансформации экосистемы озера связан с тем, что такие важные показатели как концентрации общего и минерального фосфора в воде озера, практически приблизились к тем значениям, какие имели место в период олиготрофного статуса водоема в 1959–1962 гг. Однако состояние биоты, прежде всего фитопланктона, в последние годы рассматриваемого периода (1996–2005 гг.) существенно отличается от ее состояния в период 1959–1962 гг. Фактически оказалось, что изменение среднелетних значений биомассы в период 1996–2005 гг. практически находится в тех же пределах, что и изменения биомассы в предыдущий период (1984–1995 гг.), когда фосфорная нагрузка была существенно выше.

Объяснению этого явления, основанному на анализе данных наблюдений, как раз и посвящена работа «Антропогенное эвтрофирование Ладожского озера» (Петрова и др.,

2005). Одной из основных причин указанного явления Н.А. Петрова и ее соавторы считают увеличение скорости внутриводоемного оборота фосфора. Соглашаясь в целом с их аргументацией, нельзя не отметить, что доказательство справедливости предложенных интерпретаций и выводов не во всех частях подтверждено результатами прямых измерений. Дело в том, что основанные на данных наблюдений количественные оценки для огромного озера по многим причинам весьма приблизительные (Руховец и др., 2011).

В этой связи с помощью методов математического моделирования в уже упомянутых работах (Руховец и др., 2010, 2011) воспроизведен механизм ускорения внутриводоемного оборота фосфора и получены результаты, объясняющие фактический ход трансформации экосистемы Ладожского озера.

Для того чтобы ускорить круговорот фосфора в рамках модели сукцессии фитопланктона, которую использовали для моделирования, был изменен блок, описывающий процесс деструкции детрита и растворенного в воде органического вещества. Как известно, основными деструкторами в экосистеме озера являются бактериопланктон и водные грибы. В модели они не представлены. Деструкция в соответствующем блоке модели описывается уравнениями динамики детрита (мертвого органического вещества DP), растворенного в воде органического вещества (DOP) и минерального фосфора. В модели, как и в природе, детрит разлагается на две субстанции: растворенный в воде минеральный фосфор и растворенное в воде органическое вещество. Эта трансформация регулируется двумя разными функциями от температуры воды. Регенерация минерального фосфора из растворенного органического вещества представлена в модели предельно простой линейной зависимостью. Изменения коэффициентов в конструкции блока были выбраны в ходе вычислительных экспериментов.

Вычислительные эксперименты состояли в том, что для двух фосфорных нагрузок было воспроизведено функционирование экосистемы Ладожского озера в предположении, что в течение нескольких лет каждая из этих нагрузок не меняется. В качестве этих нагрузок выбрали: $2,43 \text{ тыс. т } P_{\text{общ}} \text{ год}^{-1}$ — эта нагрузка была в олиготрофный период развития озера в 1959–1961 гг. и $4 \text{ тыс. т } P_{\text{общ}} \text{ год}^{-1}$ — эта нагрузка была определена как допустимая, т. к. при этой нагрузке озеро находится в слабо мезотрофном состоянии (Меншуткин и Воробьева, 1987). Результаты расчетов представлены на рис. 8.4.8 – 8.4.10.

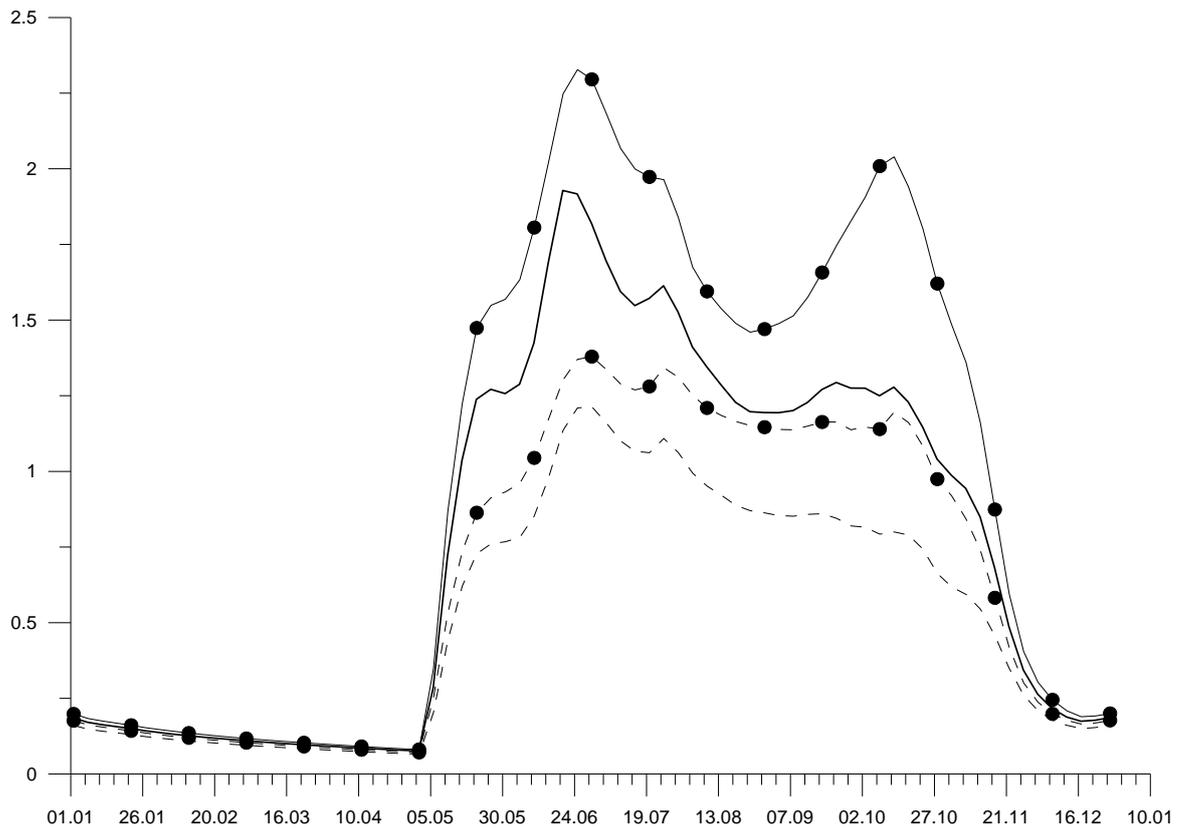


Рис. 8.4.8. Годовое изменение суммарной сырой биомассы фитопланктона (мг л^{-1}), осредненной по эпилимниону (пунктирная линия — нагрузка 2,43 тыс. $\text{т Р}_{\text{общ}} \text{год}^{-1}$; сплошная — нагрузка 4 тыс. $\text{т Р}_{\text{общ}} \text{год}^{-1}$; кривые с точками соответствуют модели с «новыми» коэффициентами деструкции).

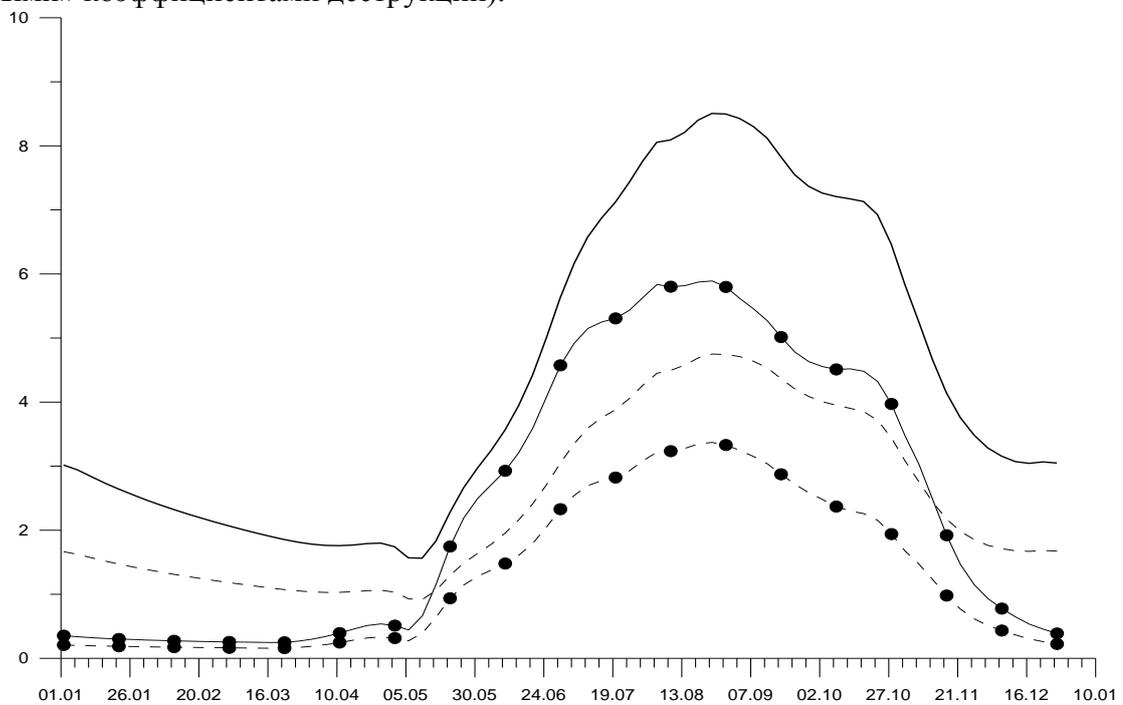


Рис. 8.4.9. Годовая динамика *DOP* — растворенного в воде органического вещества ($\text{мкг Р}_{\text{мин}} \text{л}^{-1}$) (обозначения см. на рис. 8.5.8).

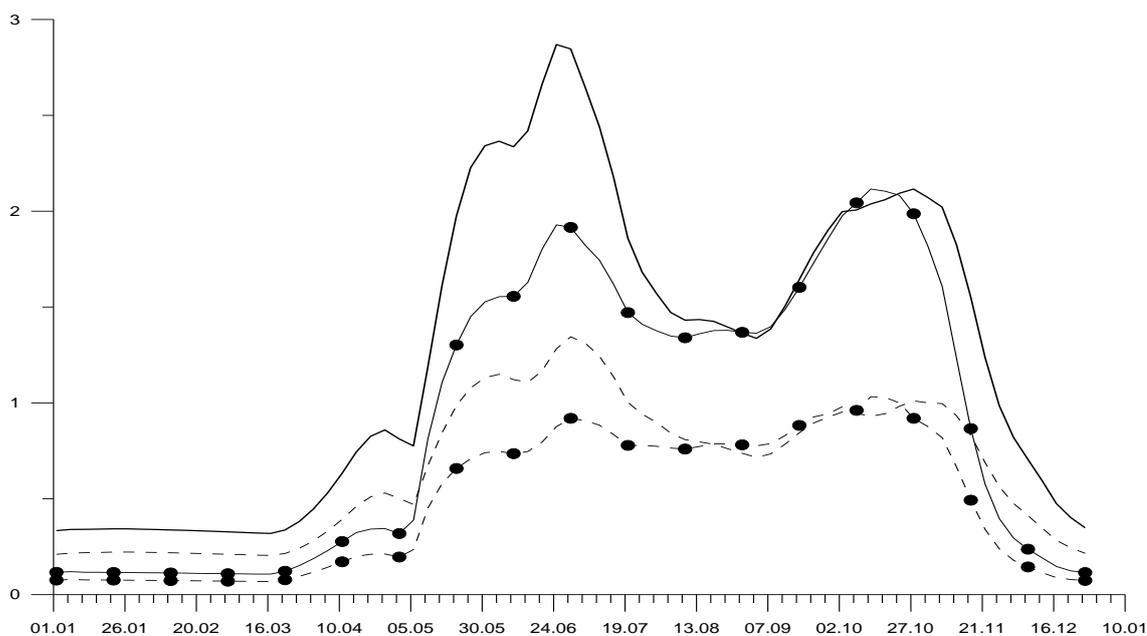


Рис. 8.4.10. Годовая динамика DP — детрита, $\text{мкг P}_{\text{мин}} \text{л}^{-1}$ (обозначения см. на рис. 8.5.8).

Основной результат этих расчетов: при «новых» коэффициентах деструкции биомасса суммарного фитопланктона выше, чем при «старых» коэффициентах для обеих нагрузок (рис. 8.4.8). Объяснение этого явления основано на том, что при «новых» коэффициентах деструкции концентрация DOP в эпилимнионе уменьшилась при обеих нагрузках (рис. 8.4.9.). Это же имеет место для детрита (рис. 8.5.10.). Таким образом, при ускорении круговорота происходит перераспределение потоков фосфора внутри экосистемы: для развития фитопланктона дополнительное количество растворенного в воде минерального фосфора высвобождается за счет растворенного в воде органического вещества DOP и детрита DP . Результаты расчетов, представленные на рис. 8.5.8 – 8.5.10., позволяют объяснить и подтвердить заключение Н.А. Петровой с соавторами (2005, 2010), что за счет ускорения круговорота фосфора продуктивность фитопланктона при уменьшении нагрузки может не уменьшаться (табл. 8.4.3).

Таким образом, впервые с помощью математического моделирования получены количественные оценки, подтверждающие, что снижение фосфорной нагрузки не может гарантировать снижение продуктивности Ладожского озера. Фактически можно констатировать, что снижение фосфорной нагрузки до уровня $2,43 \text{ тыс. т P год}^{-1}$ не позволяет вернуть озеро в исходное олиготрофное состояние. Здесь, конечно, следует сделать оговорку: если не произойдут не предсказанные изменения в структуре экосистемы озера. Этот пример показывает, что по крайней мере для великих озер умеренных широт снижение антропогенной нагрузки не может гарантировать возврата экосистем этих озер в устойчивое состояние. Тем самым можно рассматривать этот

пример как предупреждение об опасности выведения экосистем озер из равновесного состояния.

Отмеченный лимнологами феномен и полученное в рамках модели его объяснение имеют большое значение для всей концепции перехода к устойчивому развитию: снижение антропогенной нагрузки не является универсальным средством возвращения природной среды в естественное состояние или по крайней мере к предотвращению ее дальнейшей деградации.

9. Природно-ресурсный потенциал и водопользование

9.1. Озеро как источник водных ресурсов

Морфометрическая неоднородность Ладожского озера, определяющая неоднородность гидрофизических, гидрохимических и гидробиологических характеристик, приводит к различной степени загрязнения отдельных озерных районов в результате антропогенного воздействия на него. Поэтому основная задача организации выбора местоположения возможных водозаборов на акватории озера заключается, прежде всего, в определении района озера, обладающего значительным объемом чистой воды и подверженного минимальным воздействиям загрязненных или потенциально загрязненных вод с водосбора или от других источников. Объем воды в указанном районе должен обеспечивать бесперебойное водоснабжение населенного пункта или промышленного предприятия водой со стабильными гидрохимическими и гидробиологическими характеристиками в течение длительного промежутка времени. Особую актуальность в последние годы приобретает проблема поиска альтернативного источника водоснабжения Санкт-Петербурга, так как в настоящее время водозабор для нужд города осуществляется из реки Невы, качество воды в которой оставляет желать лучшего.

Организация водозабора на акватории Ладожского озера должна выполняться не только на основе существующих в настоящее время показателей качества воды, но и учитывать перспективы изменения антропогенной нагрузки на Ладожское озеро и возможности потенциального попадания загрязняющих веществ в точку расположения водозабора. Перенос примесей и формирование качества воды в крупном водоеме в значительной мере определяется характером динамических явлений, возникающих под действием гидрологических и метеорологических факторов, и в первую очередь течений и турбулентности. Как было показано в предыдущих разделах, наиболее значимыми динамическими явлениями в озере являются циклоническая циркуляция в период существования вертикальной термической фронтальной зоны (термобара), горизонтальный термический фронт (термоклин), апвеллинги, ветровые и инерционные течения.

С точки зрения изучения возможного распространения по акватории озера загрязняющих веществ, поступающих с водосбора, наибольший интерес представляют прибрежные участки, на которые поступают речные воды. Схема возможного загрязнения акватории Ладожского озера в современных условиях приведена на рис. 9.1.1. На рисунке

указаны факторы негативного воздействия на качество воды, которые следует учитывать при выборе расположения водозабора: зона возможного распространения речных вод на акватории озера в различные сезоны, зоны устойчивого загрязнения и экологического риска, возникшие в результате многолетнего воздействия загрязненных речных вод и сбросов сточных вод предприятиями, расположение основного судоходного фарватера, к которому приурочены многочисленные несанкционированные сбросы загрязняющих веществ с проходящих судов. Кроме того, обозначены места впадения крупных рек, малых загрязненных притоков, являющихся важными источниками поступления в озеро химических веществ, расположение точечных источников загрязнения, сбрасывающих сточные воды непосредственно в Ладожское озеро, а также зона возможного радиоактивного загрязнения в районе островов Западного архипелага (Gritchenko et al., 1996).

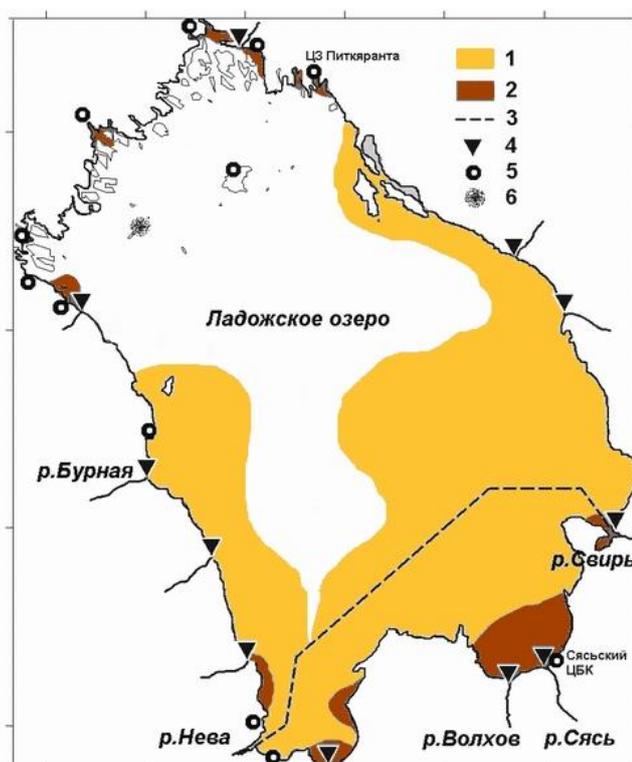


Рис. 9.1.1. Факторы негативного воздействия на качество воды в возможном водозаборе:

1 — зона возможного распространения речных вод, 2 — зона устойчивого загрязнения и экологического риска, 3 — основной судоходный фарватер, 4 — места впадения крупных рек малых загрязненных притоков, 5 — точечные источники загрязнения, сбрасывающие сточные воды непосредственно в Ладожское озеро, 6 — зона возможного радиоактивного загрязнения.

Внутриводоемные процессы, не связанные с внешней нагрузкой, в гораздо меньшей степени (по сравнению с внешними факторами) воздействуют на качество воды Ладожского озера, особенно в центральной его части. К числу возможных причин ухудшения качества воды в озере за счет внутриводоемных процессов относятся:

1) Внутренняя нагрузка, формируемая за счет выноса фосфора и металлов из донных отложений в результате взмучивания, диффузии и конвекции. В настоящее время внутренняя фосфорная нагрузка на Ладожское озеро оценивается в $0,05 \text{ г } P_{\text{общ}} \text{ м}^{-2} \text{ год}^{-1}$ или 875 т год^{-1} . Отношение внутренней фосфорной нагрузки к внешней для Ладожского озера составляет около $0,25 - 0,30$.

2) Азотфиксация (микробиологическое усвоение азота из атмосферы), которая в принципе может привести к некоторому увеличению концентрации азота в водной массе озера. Однако указанный процесс может компенсироваться денитрификацией (разложением азотсодержащих веществ до азота). В Ладожском озере эти процессы идут слабо. В течение нескольких десятилетий средние значения концентрации $N_{\text{общ}}$ в Ладожском озере (также как и внешняя азотная нагрузка на озеро) не имеют устойчивого тренда изменения.

3) Выделение токсичных веществ определенными видами фитопланктона в процессе «цветения воды», возникающее в стадии развития интенсивного эвтрофирования водоема. Однако, как следует из приведенных результатов натуральных наблюдений, фитопланктон Ладожского озера не имеет тенденции развития в направлении перехода озера в эвтрофное состояние.

4) Возникновение анаэробных зон в придонных слоях с процессами брожения и выделением сероводорода, метана и других токсичных веществ. Причиной возникновения анаэробных зон является интенсивное развитие продукционно-деструкционных процессов, обуславливающих интенсивное потребление кислорода. Однако возникновение анаэробных зон является показателем эвтрофного состояния водоема, а, как показали результаты натуральных исследований, Ладожскому озеру это пока не грозит.

В соответствии с результатами анализа материалов многолетних натуральных наблюдений за характеристиками водной массы Ладожского озера можно сделать следующие выводы, касающиеся как степени современного антропогенного воздействия на качество воды в различных частях озера, так и перспектив возможного попадания загрязняющих веществ с водосбора в те или иные районы озера:

1) Существующее в настоящее время негативное влияние сбросов сточных вод точечными источниками загрязнения на качество воды в Ладожском озере ограничивается Волховской губой и небольшими прибрежными зонами акватории, расположенными вблизи источников загрязнения (рис. 9.1.1).

2) Речные воды (предположительно загрязненные) в той или иной степени воздействуют на весь объем воды в Ладожском озере. При этом степень воздействия зависит от фазы гидродинамического режима озера. В период полного осеннего перемешивания практически вся водная масса озера, имеющая температуру порядка 6 °С, участвует в разбавлении речных вод. Степень разбавления в этом случае такова, что речной приток не может существенно увеличить средние значения концентрации примесей в водной массе озера.

3) В период летнего прогрева водной массы Ладожского озера и существования выраженной вертикальной температурной стратификации распространение речных вод происходит в верхнем перемешанном слое воды, который к сентябрю заглубляется до 20 м.

4) Осеннее ветровое перемешивание, способное негативно повлиять на качество воды прибрежных районов акватории Ладожского озера за счет взмучивания донных отложений, достигает глубин 20 м.

5) Апвеллинги, ветровые циркуляции и инерционные течения могут оказывать влияние на перенос примесей в поверхностном слое водной массы и взмучивание донных отложений только в мелководных прибрежных районах озера.

6) Весенняя и в гораздо меньшей степени осенняя термическая фронтальная зона раздела (термобар), отделяющая прибрежные воды, подверженные воздействию потенциально загрязненного стока с водосбора, от водной массы центральной части Ладожского озера, способствует тепломассопереносу до глубин порядка 50 м. Ниже указанного значения глубин водная масса озера испытывает минимальные внешние воздействия.

7) Циклональные и антициклональные течения, возникающие в периоды нагревания и охлаждения озера, способствуют вдольбереговому переносу речных вод и их поступлению в исток реки Нева. В период существования ледового покрова на озере наличие истока из озера также способствует вдольбереговому переносу вод рек Волхова и Бурной.

8) Не связанные с внешними воздействиями внутриводоемные процессы в гораздо меньшей степени по сравнению с внешними факторами влияют на качество воды Ладожского озера, особенно в центральной его части.

9) При любых возможных будущих негативных изменениях состояния Ладожского озера качество забираемой в нем воды будет лучше, чем в водозаборах, расположенных в реке Нева в черте Санкт-Петербурга. Существующие другие альтернативные варианты водозабора (подземные воды, река Вуокса и др.) не смогут удовлетворить возрастающие потребности города в чистой воде.

Перечисленные выводы натурных исследований позволяют определить местонахождение тех объемов воды, которые потенциально могут быть использованы для водозабора и находятся в западной и юго-западной частях акватории Ладожского озера с глубинами более 20 и 50 м. Ориентировочно запас воды в Ладожском озере ниже плоскостей, ограниченных изобатами 20 и 50 м, оценивается в 555 и 264 км³, соответственно.

9.2. Биоресурсы и рыболовство

Ладожское озеро по рыбным запасам относится к ведущим внутренним водоемам страны. На протяжении второй половины XX и первого десятилетия XXI столетия (1946–2009 гг.) уловы рыбы в нем колебались в пределах от 1,592 тыс. т (1946 г.) до 6,889 тыс т (1981 г.) или в 4,3 раза. В расчете на гектар акватории они составляли от 0,9 до 3,8 кг га⁻¹. Среднегодовой вылов за этот период составил 3,883 тыс. т. Промысел в озере осуществляют рыбодобывающие организации Ленинградской области и Карелии. При этом на долю первых, работающих в южной части водоема, приходится 85–90% общего вылова. Динамика уловов рыбы в озере за обозначенный выше период (1946–2009 гг.) представлена на рис. 9.2.1.

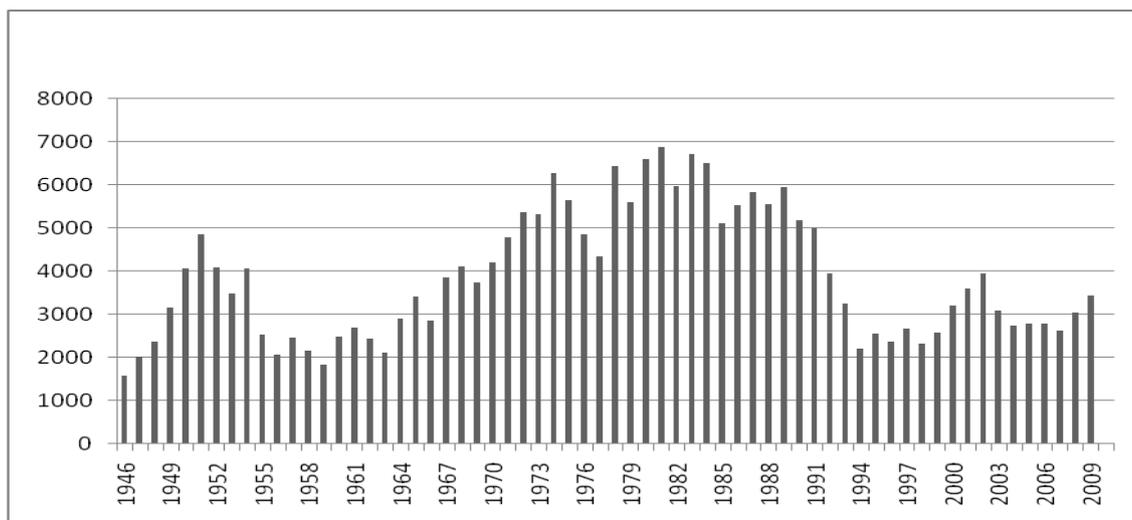


Рис. 9.2.1. Общие уловы рыбы в Ладожском озере в 1946–2009 гг. (т год⁻¹).

Она характеризовалась подъемами и спадами в объемах вылова рыбы. Эти колебания относятся к двум основным типам: короткопериодному и долгопериодному. Короткопериодный тип выражается в изменениях уловов в смежные годы. Он обуславливается появлениями различных по степени урожайности поколений рыб в связи с текущими гидрометеорологическими условиями (температура воды и уровенный режим во время нереста и др.) или изменениями в промысловой обстановке (позднее вскрытие водоема ото льда, неблагоприятный ход ледостава, сложные условия промысла из-за штормовой и иной обстановки и т. п.). Короткопериодные изменения уловов в соседние годы обычно невелики и быстро сменяются по объему вылова. В настоящей работе они не анализируются, рассматривается долгопериодная динамика.

Как видно из рис. 9.2.1, в течение послевоенного временного отрезка продолжительностью 64 года в озере наблюдался переход от низкого к высокому уровню уловов и последующий возврат к низкому, отразивший соответствующие изменения биопродукционного потенциала водоема. Тем самым в 1946–2009 гг. проявился долгопериодный цикл колебания уловов продолжительностью предположительно около 50–60 лет, складывавшийся из трех ветвей, из которых первая (1946–1963 гг.) и третья (1991–2009 гг.) характеризовались пониженными уловами, вторая (1964–1990 гг.) — повышенными. Но реальное начало этого цикла в виде невысоких уловов приходится, по-видимому, еще на конец 30-х гг. прошлого столетия. Однако оно явно не связано с военными событиями 1941–1945 гг. (Кудерский, 2009а).

В связи с последствиями прекращения промысла в военные годы целесообразно остановиться на особенностях состояния и использования запасов рыб в начальный период долгопериодного цикла. В это время на протяжении 1946–1954 гг. отмечался ощутимый рост уловов, выраженный кратковременным «всплеском». Они увеличились от 1,592 тыс. т (1946 г.) до 4,061 тыс. т и 4,849 тыс. т (1950–1952 гг. и 1954 г.). Такой «всплеск» был связан не с изменениями общего продукционного потенциала озера, а, во-первых, с возрождением промысла в первые послевоенные годы (восстанавливалась промысловая база, росла численность рыбаков, создавались производственные участки в северной части озера и т. п.). Во-вторых, промысел имел возможность с нарастающей интенсивностью эксплуатировать рыбные запасы, накопившиеся в результате «запуска» военных лет.

Характерной чертой этого периода было по существу полное игнорирование требований, диктуемых рациональным режимом рыболовства. На промысле широко использовались мелкочейные тралы. Массовый характер принял лов неполовозрелых рыб (особенно сига и судака) и интенсивный облов нерестовых концентраций. Из-за нерациональных подходов к ведению промысла, продолжительность «всплеска» оказалась краткой. Накопившиеся за годы «запуска» военных лет недоиспользованные запасы рыб оказались быстро исчерпанными. Уже в 1959 г. несмотря на возросшую производственную базу уловы опустились до уровня 1,839 тыс. т. Промысел реально приблизился к черте, за которой мог наступить перелом.

Возникшая депрессия в объемах вылова длилась практически 10 лет (с 1955 г. по 1963 г.) и тяжело отразилась на общем состоянии ладожского рыболовства. Лишь благодаря относительно быстрому принятию жестких мер по регулированию промысла полное разрушение ихтиоценоза озера было приостановлено, прекратилось сокращение запасов рыб и создались условия для их восстановления. На озере с 1959 г. был введен новый рациональный режим рыболовства, который предусматривал полный запрет на использование мелкочейных тралов, установление щадящей промысловой меры для ценных промысловых рыб с длительным жизненным циклом, введение запретных сроков на лов в период размножения весеннерестующих (судак) и осеннерестующих (озерные сиви) видов. Для таких ценных рыб, как озерные сиви и судак, были введены лимиты вылова, устанавливаемые ежегодно на основании оценок численности популяций этих видов, выполняемых научными организациями. В результате принятых мер уже в середине 60-х гг. прошлого столетия стали отмечаться признаки восстановления численности промысловых рыб и общий рост их уловов.

Таким образом, первый период (повышающаяся ветвь) рассматриваемого долгопериодного цикла в связи с внешними по отношению к биопродукционным процессам явлениям («запуск» рыболовства в военное время и последующее восстановление) оказался отличающимся от теоретической схемы динамики рыбных ресурсов (относительно равномерный рост уловов). Это обстоятельство необходимо учитывать при анализе общего развития рыболовства на Ладожском озере в послевоенное время.

Последовавший за первым второй период (1964–1990 гг.) оказался наиболее продуктивным в рамках рассматриваемого цикла. Составив в начале этого периода 2,897 тыс. т, годовые уловы рыбы относительно быстро превысили 3 тыс. т, затем последовательно 4,5 и 6 тыс. т. При этом следует отметить, что из 42 лет второго периода в течение 23 лет уловы превышали 4 тыс. т в год, в том числе 18 лет были выше 5 тыс. т в год. В 1981 г. они оказались рекордными, достигнув максимального для всей истории ладожского рыболовства показателя – 6,889 тыс. т.

Возникает вопрос о причинах существенного роста добычи рыбы во втором периоде. Наиболее широко распространено мнение, сводящееся к признанию тесной зависимости этого явления от антропогенных факторов, воздействие которых на озерную экосистему в эти годы значительно возросло. В частности, серьезное внимание обращается на рост поступления в озеро биогенных элементов в результате хозяйственной деятельности в водоеме и на водосборе. Значительное количество их вносилось со сточными водами промышленных предприятий (особенно цветной металлургии), а также в результате сельскохозяйственного производства (животноводческие комплексы, использование минеральных удобрений в полеводстве и т. п.). Считается, что возросшее по интенсивности антропогенное влияние обусловило наблюдавшееся эвтрофирование озера и тем самым определило рост его продукционного потенциала. Указанное мнение детально отражено в литературе и здесь не анализируется (Антропогенное эвтрофирование..., 1982; Ладожское озеро..., 1992; 2002; Дрabbкова, 2009).

Однако такой односторонний подход к объяснению изложенного явления недостаточно корректен. Он не раскрывает в полной мере всю совокупность причинно-следственных связей рыбопродукционных процессов в озере, которые фактически есть отражение на рыбном населении изменений продукционного потенциала водоема. Последний (как известно) в течение рассматриваемого отрезка времени не оставался постоянным. В первый (послевоенный) период он был невысоким (подобно 30-м гг. прошлого столетия), и озеро в связи с этим считалось ярко выраженным олиготрофным

или даже ультраолиготрофным (Герд, 1949; Антропогенное эвтрофирование..., 1982 и др.). Во втором периоде продукционный потенциал озера существенно возрос, и его экологическое состояние стало оцениваться как переходное к мезотрофному или даже мезотрофное, а в отдельных губах как приближающееся к эвтрофному. По большому счету значение продукционного потенциала такого обширного водоема как Ладожское озеро определяется, прежде всего, природными факторами, которые усиливаются или ослабляются накладывающимися на них антропогенными.

Ведущая роль природных факторов в формировании уровня продукционного потенциала, наблюдающегося в Ладожском озере во втором периоде, подтверждается материалами по Балтийскому морю в целом и восточной (ленинградской) части Финского залива. Динамика уловов ведущих промысловых рыб в море (сельдь, треска) и заливе (салака) такова, что годы их повышенного вылова совпадают со вторым периодом изменения продукционного потенциала Ладожского озера (Кудерский, 2007; 2009а; 2009б). Поэтому необходимо признать наличие мощных природных факторов, оказывающих влияние на биопродукционные явления на обширном пространстве Балтийского моря и его водосбора. Выяснение этих факторов и характера их воздействия на водные экосистемы — самостоятельная задача. Здесь достаточно ограничиться приведенной краткой информацией.

В начале 90-х гг. прошлого столетия высокий уровень продуктивности начал сменяться понижающейся ветвью долгопериодного цикла (рис. 9.2.1). В эти годы продукционный потенциал озера понизился, и оно возвратилось к олиготрофному состоянию с чертами мезотрофии, которые оказались наиболее выраженными в некоторых прибрежных участках. Наступил третий период послевоенной динамики уловов в Ладожском озере (1991–2009 гг.), характеризующийся их уменьшением и сближением с показателями, наблюдавшимися в первом периоде. Тем самым замкнулся долгопериодный цикл изменений продукционного потенциала озера и уловов рыбы в нем.

Минимальные уловы по официальным данным отмечались в конце 90-х гг. прошлого столетия. В первые годы XXI столетия они несколько повысились, но это незначительное повышение не меняет общей оценки периода последних двух десятилетий как понижающейся ветви единого для озера долгопериодного цикла.

Но динамика уловов (отраженная в официальной статистике) в третий период обуславливалась не традиционно простой понижающейся ветвью долгопериодного цикла, а оказалась осложненной наложившейся совокупностью антропогенных влияний, в том

числе полностью или частично отсутствовавших в предыдущие периоды. Они могут быть распределены по трем основным направлениям:

- 1) определяющие экологическое состояние озера в целом и/или отдельных его участков;
- 2) оказывающие непосредственное негативное воздействие на состояние рыбных ресурсов;
- 3) влияющие косвенно через экономические условия промысла и процедуры учета его деятельности.

К первому направлению относятся такие факторы, как, во-первых, ухудшение экологического состояния водной среды, сказывающееся, прежде всего, на наиболее ценных видах рыбного населения, отличающихся повышенной чувствительностью к условиям обитания. Во-вторых, получившее широкое распространение в бассейне озера гидростроительство, лишаящее нерестилищ озерно-речные формы рыб на многих реках.

Второе направление включает различные негативные явления, имеющие место при проведении промысла, в том числе неудовлетворительное соблюдение «Правил рыболовства», превышение устанавливаемых допустимых объемов вылова и незаконный лов рыбы, включая браконьерство. Сюда же следует отнести недостаточный объем искусственного воспроизводства сокративших численность озерно-речных форм рыб.

Наконец, третье направление составляют такие факторы, как нерентабельность лова некоторых рыб (при наличии недоиспользуемых запасов) из-за высокой стоимости всего комплекса рыболовной техники и снаряжения, горючего, транспортных услуг и т.п. К этому направлению негативных факторов следует отнести и такие субъективные явления, как получившее распространение неполное отражение уловов в статистической документации рыбодобывающих предприятий и реализация рыбы в «режиме улица/рынок» без соответствующего учета. Последнее особенно характерно в отношении таких пользующихся повышенным спросом у населения рыб, как сиги, судак, лещ, щука и др.

При оптимальном режиме эксплуатации промысловых ресурсов, имевшем место до начала 90-х гг. прошлого столетия, второе и третье негативные направления влияли бы на отчетные объемы добычи рыбы в меньшей степени, и отражавшиеся в официальной статистике уловы были бы несколько выше.

Промысловые рыбы Ладожского озера по основным местам формирования запасов подразделяются на три группы: обитающие в основном в открытой акватории (озерные), связанные преимущественно с прибрежной зоной (прибрежные) и озерно-речные.

Состояние популяций видов, относящихся к каждой из перечисленных групп, неодинаковое и нуждается в конкретном рассмотрении.

Основную роль в рыболовстве в озере играют **озерные виды**, жизненный цикл которых связан с открытыми участками водоема. К ним относятся ряпушка и ее крупная форма — рипус, озерные сиги, судак, паляя, а также корюшка, которая хотя и размножается в низовьях ряда рек и губах (Волховская, Свирская и др.), но нагуливается и зимует в открытой озерной акватории. На эту группу видов в отдельные пятилетия в 1946–2009 гг. приходилось от 53,1% до 80,4% общего вылова, в среднем за весь рассматриваемый период 70,9% (табл. 9.2.1). Преобладание озерных рыб в составе сырьевых ресурсов озера не случайное. Оно связано с обширностью осваиваемой ими нагульной акватории с ее большими запасами зоопланктона и бентоса. От состояния численности популяций озерных видов в значительной степени зависит общий уровень уловов в Ладожском озере.

Таблица 9.2.1

Среднегодовые (по пятилетиям) уловы озерной группы рыб в Ладожском озере (т год⁻¹)

Годы	Ряпушка и рипус	Корюшка	Озерные сиги	Судак	Всего	% от общего вылова
1946–1950	215,6	1095,7	294,3	217,6	1823,2	68,9
1951–1955	194,8	1605,6	354,4	308,3	2466,7	64,9
1956–1960	89,3	721,0	149,5	211,9	1171,7	53,1
1961–1965	258,3	707,4	268,5	383,0	1617,2	59,5
1966–1970	579,2	1100,6	424,1	462,9	2566,8	68,3
1971–1975	1254,5	1727,4	512,3	538,8	4033,0	73,7
1976–1980	1168,0	1656,7	459,2	739,0	4022,9	72,2
1981–1985	1427,5	2081,1	319,1	1094,5	4922,2	79,7
1986–1990	1525,5	1368,9	292,9	883,3	4070,6	72,6
1991–1995	664,2	1653,7	207,3	361,8	2887,0	80,4
1996–2000	699,1	839,1	185,7	363,2	2087,1	79,2
2001–2005	568,9	1043,2	165,6	357,1	2134,8	65,9
2006–2009	242,7	1243,5	155,5	353,2	1994,9	66,9

Как видно из табл. 9.2.1, на протяжении 70-х и 80-х гг. прошлого столетия запасы перечисленных рыб были высокими, что в сочетании с существовавшим в тот период интенсивным промыслом обеспечивало максимальную эффективность ладожского рыболовства (особенно принимая во внимание рыночную стоимость этих рыб). Однако с начала 90-х гг. прошлого столетия сырьевые ресурсы озерной группы рыб сократились (как и всей промысловой части рыбного населения).

Одно из ведущих мест среди этих видов занимает ряпушка. По объемам годовых уловов она обычно находится на втором месте (после корюшки), а в отдельные годы даже на первом. В озере ряпушка образует две формы: более многочисленную мелкую и относительно малочисленную крупную (рипус). В табл. 9.2.1 приведены суммарные уловы обеих форм, так как в официальной статистике они не всегда отражаются отдельно (для сравнения: Лузанская, Савина, 1956; Лузанская, 1965 и Современное состояние..., 2000; 2002; 2004). Для ориентировки в реальном соотношении уловов этих форм можно привести следующие цифры: в 1996–2000 гг. среднегодовой вылов рипуса равнялся 45 т, мелкой ряпушки 655 т, в 2001–2005 гг. соответственно 39 т и 530 т.

Динамика уловов ряпушки в основном соответствует схеме долгопериодной цикличности: в 1946–1964 гг. хорошо выражена повышающаяся ветвь цикла, отражавшая годы низкого вылова, в 1965–1991 гг. наблюдается основной «купол» повышенных уловов и в 1992–2009 гг. представлена понижающаяся ветвь с неизбежными при таких процессах межгодовыми колебаниями (рис. 9.2.2).

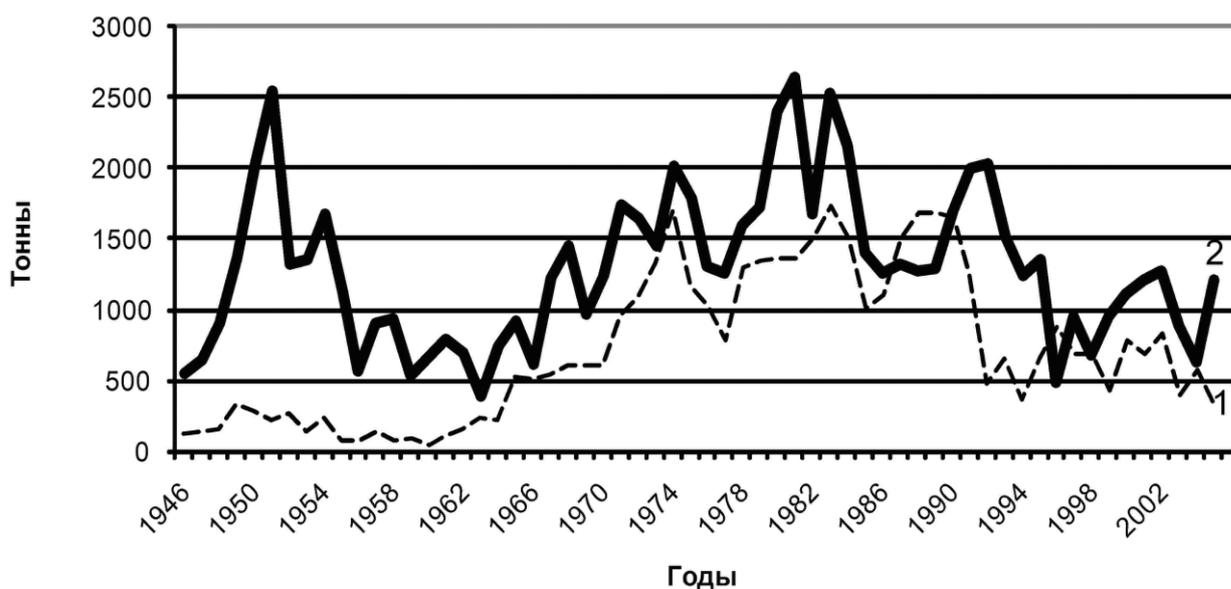


Рис. 9.2.2 Уловы ряпушки и корюшки в Ладожском озере: 1 — ряпушка, 2 — корюшка.

Характерный для общих уловов (рис. 9.2.1) кратковременный «всплеск» добычи у ряпушки практически не имеет места (рис. 9.2.2). Слабая выраженность «всплеска» уловов в начале повышающейся ветви долгопериодного цикла вполне соответствует закономерной зависимости запасов ряпушки от состояния продукционного потенциала озера. В эти годы он находился на низком уровне, и кормовая база для ряпушки была ограниченной. Питающаяся зоопланктоном, она чутко реагировала на пониженную кормовую базу, и ее уловы не росли. Они не могли увеличиваться и за счет «запуска» военных лет из-за короткого жизненного цикла рассматриваемого вида. С 1965 г. уловы ряпушки быстро пошли вверх вслед за ростом биопродукционного потенциала, который в литературе обычно характеризовался как процесс эвтрофирования озера. Наиболее высокий уровень («купол») вылова ряпушки сохранялся с 1971 по 1991 г., то есть 20 лет.

Как отмечалось выше, в начале 90-х гг. прошлого столетия стало проявляться очередное снижение продукционного потенциала озера, что оценивалось в литературе как возврат к исходному олиготрофному состоянию (кроме отдельных участков). На это изменение озерной экосистемы ряпушка быстро отреагировала уменьшением запасов и уловов. В качестве примера приведем следующие данные: по материалам учетных съемок, регулярно осуществляемых ГосНИОРХ: промысловый запас основного (восточного) стада ряпушки только в начале XXI столетия снизился с 3,75 тыс. т в 2000 г до 2,72 тыс. т в 2006 г. (Леонов, Тесля, 2009). Но наряду с естественными причинами на объеме официальных показателей уловов ряпушки негативно сказывались трудности с ее реализацией, возникавшие из-за экономических преобразований и организационных реформ в отрасли, а также неполное использование имеющихся запасов.

Второй массовый промысловый вид, обычно лидирующий по объему уловов по озеру в целом — корюшка. Характер ее уловов в 1946–2009 гг. в общих чертах повторяет типичную кривую долгопериодной цикличности кроме одного важного отличия: повышающаяся ветвь динамики вылова осложнена в 1948–1955 гг. хорошо выраженным «всплеском», максимальная добыча в годы которого (1951 г.) превысила уровень низких показателей (1963 г.) в 6,5 раз. Характерно, что в отдельные годы периода «всплеска» уловы корюшки почти достигали максимальных показателей, наблюдавшихся при наибольшем подъеме ее добычи (начало 80-х гг. прошлого столетия). По степени выраженности «всплеска» корюшка превзошла все остальные промысловые виды рыб Ладожского озера. Причина «всплеска» уловов отмечалась выше — она заключалась в чрезмерной интенсификации промысла в связи с его возрождением после «запуска»

военных лет, а также усиленным «вычерпыванием» ее ресурсов, недоиспользуемых при обычном режиме рыболовства.

После указанного «всплеска», последовавшего затем закономерного «провала» (1956–1963 гг.) и достижения минимального уровня («ямы») уловы корюшки стали быстро возрастать по свойственной долгопериодному циклу повышающейся ветви. Последняя в короткий период времени перешла в продолжительную череду лет с высоким уровнем добычи этой рыбы. Своеобразный «купол» высоких уловов сохранялся (с колебаниями) с начала 1970-х гг. по первую половину 1990-х гг. (рис. 9.2.2). После 1995 г. он сменился понижающейся ветвью. На этом этапе вылов корюшки, как и ранее рассмотренной ряпушки, уменьшился. Несмотря на снижение уловов, положение с запасами корюшки (как и ряпушки) не вызывает опасений. Промыслом оба вида используются недостаточно полно по экономическим и организационным причинам.

В отличие от рассмотренных двух видов, современное состояние запасов таких ценных озерных рыб, как озерные сиги и судак, неудовлетворительное. Это обусловлено не только снижением кормовой базы, но и чрезмерно интенсивным ловом, так как обе рыбы пользуются повышенным спросом у населения. Кроме того, официальные показатели их добычи занижены из-за имеющей место реализации без отражения в статистической отчетности.

Несмотря на напряженное положение с запасами, озерные сиги по-прежнему сохраняют промысловое значение, и на их долю в последние два десятилетия приходится 5,2–7,8% среднегодового (по пятилетиям) улова рыбы по озеру (155,5–207,3 т; табл. 9.2.1).

Динамика вылова озерных сегов имеет характер, в общих чертах типичный для описанного выше долгопериодного цикла, причем четко выражен присущий озерным рыбам некоторый «всплеск» объемов добычи в повышающейся ветви. Этот «всплеск» отражается достаточно хорошо, хотя уловы не увеличиваются так значительно, как у корюшки. Временной интервал «всплеска» у озерных сегов и корюшки почти совпадает.

Однако последующие части долгопериодного цикла у озерных сегов имеют определенную специфику в сравнении с обобщенной картиной уловов (рис. 9.2.1) и с данными по корюшке. Прежде всего, растянута длительность «провала» уловов после из «всплеска». Если у корюшки ощутимый подъем вылова отмечался сразу же за годом наименьшей добычи (1963 г.), то у озерных сегов подъем (сопоставимый по объему с показателями «всплеска») наступил лишь через 7 лет после минимума вылова.

Далее, наращивание добычи в годы, приходящиеся на последующую часть повышающейся ветви, происходило медленно. Наблюдается как бы своеобразная

«стагнация» уловов на повышенных показателях с ограниченными межгодовыми колебаниями. Важно также отметить, что хотя и не резкое, но ощутимое снижение объемов добычи озерных сига стало проявляться уже в начале 80-х гг. прошлого столетия, а не во второй половине 1990-х гг., как у корюшки. В связи с этим переход от «купола» уловов к понижающейся ветви цикла у озерных сига происходил сравнительно плавно. Отмеченные основные отличия долгопериодной изменчивости уловов озерных сига обуславливались, по сравнению с ряпушкой и корюшкой, во-первых, видовой спецификой структуры и динамики их популяций, во-вторых, направленностью эксплуатации запасов. Из особенностей структуры популяций следует указать на их многовозрастной состав. Кроме того, озерные сига — типичные бентофаги. Поэтому эффект увеличения продукционного потенциала озера сказывается на них не так быстро, как на планктофаге ряпушке. Оба эти обстоятельства выполаживают и растягивают период роста уловов на повышающейся ветви долгопериодного цикла. В то же время не только предпочтительный, но и повышенный по интенсивности лов активно «срезал» формирующиеся запасы озерных сига, понижая уловы по сравнению с реально возможными при оптимальном режиме рыболовства.

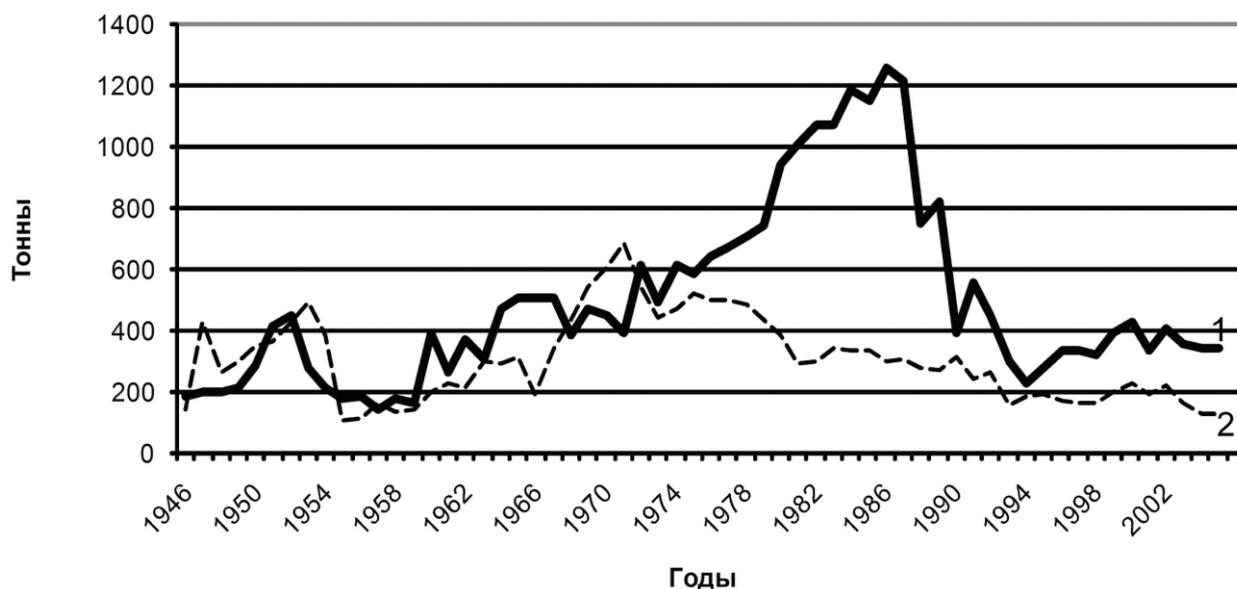


Рис. 9.2.3. Уловы судака и озерных сига в Ладожском озере: 1 — судак, 2 — сиг.

Анализируя официальную статистику уловов озерных сига, следует учитывать, что для 1990-х гг. прошлого и начала XXI столетия она не отражает реальной картины использования сырьевых ресурсов этих рыб, так как значительная часть вылова реализовалась в «режиме улицы» без отражения в отчетах рыбодобывающих

предприятий. Тем не менее есть все основания утверждать, что с начала 90-х гг. прошлого столетия прослеживалось действительное снижение запасов озерных сига в общей связи с падением продукционного потенциала озера.

Долгопериодный цикл изменений объемов уловов отмечался и у такого важного в промысловом отношении озерного вида, как судак. Прежде всего, отметим, что у судака, как и у рассмотренных выше видов, хорошо выражен «всплеск» вылова в начале повышающейся ветви долгопериодного цикла. Максимальная добыча пришлась на 1952 г., после чего показатели резко сократились. Интересно отметить, что значительное падение уловов после «всплеска» наблюдалось у ряпушки и озерных сига после 1954 г. и у корюшки после 1955 г. Таким образом, повышенная интенсивность рыболовства в первые послевоенные годы исчерпывала сырьевые резервы, возникшие в результате «запуска» военных лет (или бывшего ранее неполного использования запасов, как у корюшки) у всех четырех видов второй группы за примерно близкие сроки. Это наглядно отражает предельно высокую степень влияния возрождающегося промысла на сырьевые ресурсы. Продолжая сопоставления, отметим, что у всех четырех видов близкими оказались и годы минимальных уловов («яма»): они наступили при окончании «всплеска» у ряпушки и озерных сига в 1955–1956 гг., корюшки в 1956 г., судака в 1957 г.

Наряду с отмеченными совпадениями, на последующих после «всплеска» этапах долгопериодного цикла в динамике уловов судака определились некоторые особенности. В отличие от озерных сига добыча судака после минимального уровня («ямы» — 1957 г.) уже на третий год превысила показатели начала «всплеска». Положение с уловами судака значительно изменилось в 80-е гг. прошлого столетия. Они не уменьшились как у озерных сига, но, подобно ряпушке и корюшке, резко возросли, составив 943 т в 1980 г. и даже 1,212–1,254 тыс. т в 1986–1987 гг. Однако этот рост у судака наступил позднее аналогичных по масштабам изменений вылова у ряпушки и корюшки — основных кормовых объектов рассматриваемого хищника. Такое отставание роста уловов у судака обусловлено тем, что ему как рыбе с продолжительным жизненным циклом необходимо время для того, чтобы популяция отреагировала на значительное улучшение кормовой базы. Следует отметить, что общая продолжительность периода высоких уловов, превышавших 900 т в год, у судака оказалась кратковременной — восемь лет, в то время как у ряпушки она достигала 20 лет, а у корюшки (до начала падения уловов во второй половине 90-х гг. прошлого столетия) даже 29 лет.

Высокий уровень вылова судака сменился с 1990 г. резким его падением. Не вызывает сомнений, что снижение добычи рассматриваемого вида было обусловлено

уменьшением его промысловых запасов в связи с общим понижением продукционного потенциала озера. Однако конкретные масштабы изменений, происходивших под влиянием природных факторов, оценить сложно из-за таких наложившихся антропогенных влияний, как значительное ослабление контроля соблюдения режима рыболовства из-за перехода к новым («рыночным») отношениям, широкомасштабная реализация рыбы без отражения в отчетной документации (неучтенный улов) и т. п. В результате появления в рыболовстве подобных форм организационной деятельности, не имеющих отношения к биопродукционным процессам, статистическая информация в 90-е гг. прошлого и начальные годы XXI столетий оказалась неполной, отчасти даже недостоверной и по этим причинам не в полной мере отражающей состояние сырьевых ресурсов судака.

Несмотря на имевшие место различия, долгопериодный цикл изменений уловов у рассмотренных четырех озерных видов в общих чертах оказался сходным. Он, во-первых, включал повышающуюся ветвь с «всплеском» вылова в первые годы, вызванным интенсивным восстановлением промысла в послевоенные годы. Во-вторых, имел более или менее растянутый «купол» максимальных уловов, появление которого было связано с ростом продукционного потенциала озера, дополненного некоторыми антропогенными влияниями. В-третьих, завершился понижающейся ветвью, обусловленной снижением продукционного потенциала водоема. Достаточно высокое сходство долгопериодных циклов четырех рассмотренных видов обусловлено особенностями их экологии: все они — рыбы открытой части озера, и к тому же судак, ряпушка и корюшка связаны между собой по схеме хищник — жертва.

В отличие от рассмотренных четырех озерных видов, динамика уловов прибрежных рыб не совпадает с охарактеризованной выше схемой долгопериодной цикличности. К этим видам относятся, во-первых, ценные промысловые объекты: лещ и щука; во-вторых, набор малоценных, так называемых мелкочастиковых, рыб. Они обитают преимущественно в губах и мелководной прибрежной зоне, и лишь некоторые из них частично выходят в открытые участки. Динамика уловов основных прибрежных видов в 1946–2009 гг. представлена в табл. 8.2.2. В указанные годы на долю рассматриваемых видов приходилось 13,1–28,2% от общих уловов по озеру.

Таблица 9.2.2

Среднегодовые (по пятилетиям) уловы основных видов прибрежной группы рыб в Ладожском озере (т год⁻¹)

Годы	Лещ	Щука	Окунь	Плотва	Всего	% от общего вылова
1946–1950	96	53	261	191	601	22,7
1951–1955	187	73	358	294	912	24,0
1956–1960	68	140	204	210	622	28,2
1961–1965	146	92	170	275	683	25,1
1966–1970	244	104	177	276	801	21,3
1971–1975	167	72	321	399	959	17,5
1976–1980	225	72	461	389	1147	20,6
1981–1985	174	79	386	411	1050	17,0
1986–1990	204	83	415	459	1161	20,7
1991–1995	86	21	222	143	472	13,1
1996–2000	82	12	181	136	411	15,6
2001–2005	90	31	366	359	846	26,1
2006–2009	73	34	386	260	753	25,3

Вылов таких ценных прибрежных видов, как лещ и щука, относительно невелик, и существенно уступают вылову мелкого частика. Состояние их запасов напряженное. В этом отношении (а также по неполному отражению в статистической отчетности) они подобны озерным сигам и судаку. Как видно из данных табл. 9.2.2, у леща выделяются группы лет с повышенными и пониженными показателями вылова, но их чередование не в полной мере соответствует схеме долгопериодной изменчивости уловов, так как отмечается нехарактерный для этой схемы «провал» вылова в 70-е гг. прошлого столетия (рис. 9.2.4). В рассмотренную выше общую картину динамики уловов рыбы в озере (рис. 9.2.1) вписываются лишь годы 1950–1957, в течение которых уловы леща подобны «всплескам» добычи озерных видов.

Что касается щуки, то динамика ее уловов при общем невысоком их уровне еще более удалена от долгопериодной цикличности, чем у леща (рис. 9.2.4). Но необходимо отметить, что и у леща, и у щуки после 1990 г. также происходит снижение добычи, причем оно связано с понижением продукционного потенциала озера в целом (а на официальных данных по уловам негативно сказываются упомянутые выше антропогенные факторы).

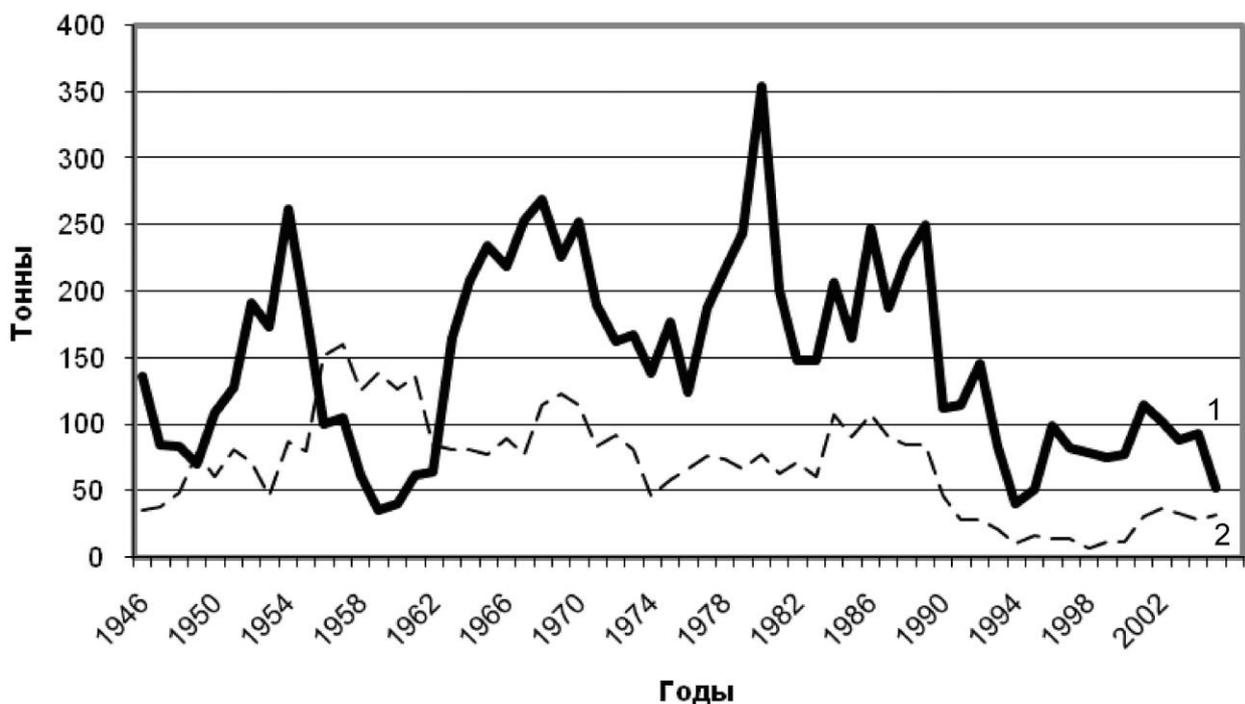


Рис. 9.2.4. Уловы леща и щуки в Ладожском озере: 1 — лещ, 2 — щука.

Отличия динамики уловов крупночастиковых леща и щуки от долгопериодной схемы обуславливаются особенностями их экологии — оба эти вида обитают в мелководной прибрежной зоне, губах, приустьевых участках рек, что определяет свой характер связей с условиями среды. В частности, решающее влияние на динамику численности этих рыб может оказывать уровеньный режим, закономерности изменчивости которого отличаются от долгопериодной цикличности, свойственной открытым участкам озера.

К прибрежной группе относятся также мелкочастиковые виды: это окунь, плотва, густера, ерш, синец, чехонь, укляя и др., а также малочисленные рыбы язь, сырть, налим и т. п. (Современное состояние..., 2002; 2004). Все они обитают преимущественно в губах и мелководных прибрежных участках, часто связаны с зарослевыми зонами.

Суммарный среднегодовой улов (по пятилетиям) мелкого частика существенно выше, чем леща и щуки, и в 2001–2009 гг. только по плотве и окуню составил 725–646 т по сравнению с 107–121 т крупного частика. Но современные уловы мелкочастиковых видов, как и других рыб, снизились. Такое явление связано, с одной стороны, с традиционным недоиспользованием их запасов из-за невысокого товарного качества и ограниченного спроса на рынке. С другой стороны, в новых экономических условиях промысел рассматриваемых видов не выгоден, и по этой причине их сырьевые ресурсы эксплуатируются слабо. Мелкий частик привлекает повышенное внимание рыбаков-

любителей, а также непрофессионалов, ведущих лов для личного потребления. Уловы прибрежных мелкочастиковых видов невелики и в промысловой статистике отдельной строкой чаще не выделяются, а включаются в сборную группу «прочие». Хотя запасы мелкого частика уменьшились, но состояние его популяций не вызывает опасений.

Из прибрежных видов наиболее активно используются окунь и плотва. Многолетняя динамика их уловов в общих чертах сходная (рис. 9.2.5). Долгопериодная цикличность уловов у этих двух рыб фактически не наблюдается. Совпадающим с другими видами явлением может считаться только имевший место в начале 50-х гг. прошлого столетия подъем («всплеск») добычи, обусловленный экономическими и организационными причинами и не относящийся к изменениям продукционного потенциала озера. Последовавшие за «всплеском» и минимизацией уловов годы отражают у окуня и плотвы свойственную прибрежным видам динамику вылова, осложненную короткопериодными изменениями. Устойчивый подъем уловов произошел с 1972–1973 гг., но прервался падением в начале 80-х гг. прошлого столетия.

В 1990 г. вылов обоих видов резко снизился. Однако происходившее снижение оказалось кратковременным и относительно быстро сменилось ощутимым увеличением. Уже в 2001 г. объемы добычи у окуня повысились до 432 т и плотвы до 375 т. Такие частые и резкие изменения не свойственны схеме долгопериодной цикличности уловов. Но этот вывод следует рассматривать как предварительный. Истинный характер динамики вылова окуня и плотвы выявится после получения данных о состоянии промысла этих рыб в ближайшие годы.

Обсуждать другие мелкочастиковые и малочисленные виды третьей группы нецелесообразно в связи с их незначительным удельным весом в общем вылове рыбы по озеру. Отметим лишь, что уловы наиболее обычного из этих видов ерша в отдельные годы колеблются от менее тонны до 135 т, а налима от первых тонн до 90 т. В промысловой статистике эти рыбы отражаются не регулярно и их вылов нередко частично или полностью объединяется в сборную группу «прочие».

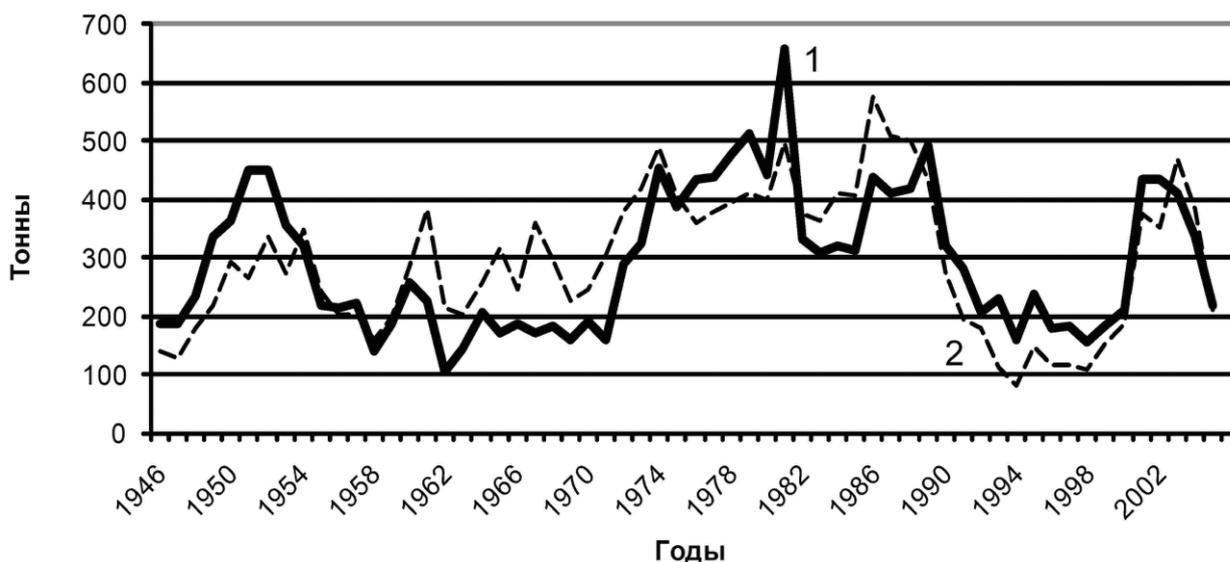


Рис. 9.2.5. Уловы окуня и плотвы в Ладожском озере: 1 – окунь, 2 – плотва.

Обобщая материалы по мелкочастиковым видам можно отметить, что динамика их уловов на протяжении 1946–2005 гг. во многом сходна с наблюдающейся у леща и щуки, хотя и не копирует последнюю (рис. 9.2.4 и 9.2.5). Это сходство не случайное. Оно связано с близостью их в экологическом отношении: все они населяют преимущественно прибрежную зону, включающую губы, устьевые участки рек, заросшие макрофитами мелководья и т. п.

Отмеченные особенности в экологии обуславливают отличия динамики уловов прибрежных рыб от озерных. У первых наблюдающиеся многолетние колебания вылова, по-видимому, определяются квазипериодическими изменениями уровня воды, у вторых она зависит от долгопериодной цикличности продукционного потенциала озера в целом.

К отдельной группе относятся наиболее ценные в промысловом отношении озерно-речные рыбы — атлантический осетр (практически вымерший в недавние годы), озерный лосось, озерная форель, озерно-речные сиги волховской, свирский, вуоксинский, а также сырть. Их уловы в озере на протяжении длительного времени неуклонно снижались. Сложившееся с ними положение не случайное. Оно обусловлено тем, что у озерно-речных видов наиболее уязвимые этапы жизненного цикла — размножение, развитие икры и личинок; частично рост молоди протекают в реках, антропогенное «давление» на среду в которых обычно существенно выше, чем в озере. Нагуливается и достигает половой зрелости эта экологическая группа рыб в озерной акватории, где условия обитания оказываются более благоприятными (Кудерский, 1985).

Состояние отдельных видов и форм озерно-речных рыб в Ладожском озере может быть охарактеризовано следующим образом. В озере сравнительно недавно перестала существовать локальная популяция атлантического осетра. В прошлом этот вид относился к промысловым видам. Его добывали у западного побережья озера, в Волховской губе, реке Волхов. Разновозрастная молодь нередко встречалась в различных районах озера (Озерецковский, 1812; Домрачев, Правдин, 1926; Кудерский, 1983). В промысловой статистике уловы осетра находили отражение в предвоенные годы и затем вплоть до начала 60-х гг. прошлого столетия (Гурвич, 1945; Лузанская, 1965). Последний зарегистрированный случай вылова крупного осетра относится к 1984 г. (Подушка, 1999).

Резко сократилась численность озерного лосося и озерной форели. В предвоенные годы совместные уловы этих двух видов только в южной части озера достигали почти 70 т в год и составляли в среднем в год в 1932–1935 гг. 56,0 т, а в 1936–1940 гг. — 40,8 т. Считалось, что уловы озерных лосося и форели в северной части озера в 1938 г. равнялись 166 т (Правдин, 1947). В послевоенные годы отмечалось кратковременное повышение уловов обоих видов (табл. 9.2.3).

Таблица 8.2.3

Уловы озерных лосося и форели в Ладожском озере (т год⁻¹).

Годы	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1940	—	—	—	—	—	—	22,3	38,3	66,9	35,7
1950	40,1	44,6	164,4	133,2	142,6	80,4	100,0	37,6	25,5	13,2
1960	6,1	5,7	4,3	5,4	4,5	3,6	1,2	9,5	7,2	5,4
1970	9,7	21,0	10,7	24,4	7,9	8,8	3,9	2,8	2,6	—

Усиленный вылов быстро исчерпал имевшиеся запасы озерных лосося и форели и их добыча уже в 60-е гг. прошлого столетия опустилась до критического значения — менее 10 т в год. В связи с этим на озере был введен запрет на лов обоих видов. По этой причине в табл. 8.2.4 данные по уловам этих рыб после 70-х гг. прошлого столетия отсутствуют, хотя есть информация об их добыче для рыбоводных целей в количестве 1–2 т в год.

Критическое положение сложилось с запасами ладожских озерно-речных сигов. Еще в недалеком прошлом эти формы составляли основу сигавого промысла в озере. Однако в результате гидростроительства и загрязнения рек численность их резко

сократилась, и они перешли в группу видов редких и исчезающих. Потерял промысловое значение свирский сиг в связи с перекрытием плотинами реки Свирь. Выпал из состава промысловых объектов волховский сиг. До строительства ГЭС на реке Волохов его уловы достигали 320 т в год (Домрачев, Правдин, 1926). В настоящее время численность этого сига такова, что в отдельные годы не удается собрать количество икры, необходимое для рыбоводных целей. Таким образом, в целом озерно-речные виды перешли в состояние редких и исчезающих, и требуется принятие оперативных мер по сохранению и восстановлению их численности. В связи с катастрофическим состоянием их популяций они внесены в «Красную книгу Российской Федерации (животные)» (2001), «Красную книгу природы Ленинградской области» (2002) и «Красную книгу Карелии» (2007).

Для сохранения запасов озерно-речных видов рыб на Ладоге осуществляется искусственное воспроизводство лососевых и сигов. С этой целью функционируют Волховский сиговый и Свирский лососевый рыбоводные заводы. Однако их деятельность не оказывает ощутимого влияния на численность разводимых рыб, так как возврат от выпускаемой молодежи оказывается незначительным. Количество вылавливаемых производителей заводского происхождения лишь позволяет заводам покрывать потребность в рыбоводной икре.

Сходное с озерно-речными рыбами положение сложилось у такого озерного вида, как палия. В довоенные годы ее вылов составлял в южной части озера в 1934 г. 33,7 т, в северной в 1938 г. 53 т (Правдин, 1947; Дмитренко, 1960). В отдельные годы послевоенного периода они также достигали 30–55 т, но обычно составляли около 10 т в год и менее. Однако уже в 60-е гг. прошлого столетия резко сократились и в южной части озера, и эта рыба потеряла промысловое значение. В 2000-е гг. промысел палии в северной части озера стал возрождаться и составил здесь от 4,6 т в 2000 г. до 16,8–18,5 т в 2008 г. Такие показатели вылова стали возможными в связи с выращиванием молодежи палии на рыбоводных предприятиях Карелии и выпуском ее нагул в Ладожское озеро.

Из приведенного анализа следует такой вывод принципиального характера. В рыбопродукционном отношении Ладожское озеро неоднородно, на что ранее не обращалось внимания. Оно может быть подразделено на две тесно связанные, но не эквивалентные части. Одна из них основная: это обширные открытые акватории озера. Происходящие здесь процессы определяют высокий общий продукционный потенциал озера и его долгопериодную цикличность, отражающуюся, в конечном счете, на характере динамики рыбного населения в целом. Вторая часть озера — прибрежная мелководная зона. Она не только отличается существенными особенностями в экологическом

отношении, включая динамику сырьевых ресурсов, но и уступает открытым акваториям по вкладу в суммарные биопродукционные показатели по водоему. Однако обе эти части имеют важное значение для ладожского рыболовства и в равной мере заслуживают пристального внимания как в хозяйственном, так и в природоохранном отношениях.

Промысловые рыбы Ладожского озера, учитывая современное состояние их запасов и промысловой значимости, подразделяются на следующие группы:

– виды, запасы которых хотя и сократились в связи с общим понижением продукционного потенциала озера, но состояние которых не вызывает опасений, промыслом они используются недостаточно полно по организационным и экономическим причинам (ряпушка, корюшка, мелкий частик);

– виды, у которых сложилось напряженное положение с запасами не только из-за снижения продуктивности экосистемы озера, но и под значительным влиянием антропогенных факторов, включая экологическое состояние водоема, интенсивный промысел и др. (озерные сиги, судак, лещ, щука);

– рыбы, потерявшие промысловое значение, прежде всего в связи с продолжительным интенсивным антропогенным влиянием, ставшие редкими и исчезающими и включенные в «Красные книги» (озерный лосось, озерная форель, озерно-речные сиги волховский, свирский, вуоксинский, отчасти сырть).

Учитывая сложившееся положение с различными группами рыбного населения целесообразно разработать и приступить к практической реализации комплекса охранных и рыбоводных мероприятий, направленных на сохранение и восстановление промысловой значимости наиболее ценных ладожских рыб и стимулирование вылова слабо эксплуатируемых видов.

9.3. Судоходство

Водные пространства Ладожского озера издревле используются для судоходства. Во времена Новгорода Великого здесь пролегал знаменитый торговый путь «из варяг в греки». В настоящее время Ладожское озеро является важнейшим звеном в транзитном водном пути из внутренних районов страны в Балтийское море.

Главная транспортная артерия внутреннего водного транспорта, проходящая в южной части озера от устья Свири до истока Невы, является составной частью Волго-Балтийского водного пути. Ее протяженность в водах Ладоги превышает 70 миль. Каждую навигацию по ней перевозятся разнообразные грузы как в транзитном, так и в местном сообщениях. Волго-Балтийский водный путь обеспечивает транспортную связь

Балтийского и Белого морей с Волжско-Камским воднотранспортным бассейном. Глубина его судоходных фарватеров составляет не менее 4 м, что обеспечивает проход судов грузоподъемностью до 5 тыс. т. Крупнейшая глубоководная магистраль страны (859 км), начинаясь в устье Невы, проходит по этой короткой, но очень полноводной реке, нередко беспокойному Ладожскому озеру, реке Свирь, Онежскому озеру, Волго-Балтийскому судоходному каналу и соединяется с Рыбинским водохранилищем Волги. Продолжением Волго-Балтийского водного пути является Беломорско-Балтийский канал, соединяющий Онежское озеро с Белым морем.

Ранее (до 1964 г.) этот искусственный водный путь, состоящий из каналов, рек и озер, назывался Мариинской водной системой. Она начиналась у Рыбинска на Волге, далее от Череповца шла по Шексне, Белому озеру, Ковже, искусственному Мариинскому (позднее Новомариинскому) каналу, Вытегре, Онежскому каналу, Онежскому озеру, Свири, Ладожскому озеру и Неве. Длина этого пути составляла около 1,1 тыс. км. Существовали также Вышневолоцкая (открыта в 1709 г.) и Тихвинская (1811 г.) водные системы. В интересах безопасности плавания небольших плоскодонных судов по озерам были проложены обходные каналы — Белозерский, Онежский, Староладожский и Новолодожский.

Волго-Балтийский водный путь проходит местами по трассе прежней Мариинской водной системы, местами несколько отклоняется от нее. На этом пути построено пять мощных гидроузлов и семь однокамерных однониточных шлюзов. Для плавания по Волго-Балту построены специальные суда «река-море». Обслуживается он государственным бассейновым управлением водных путей и судоходства (ГБУ «Волго-Балт»), территориальные границы деятельности которого приведены на рис. 9.3.1.

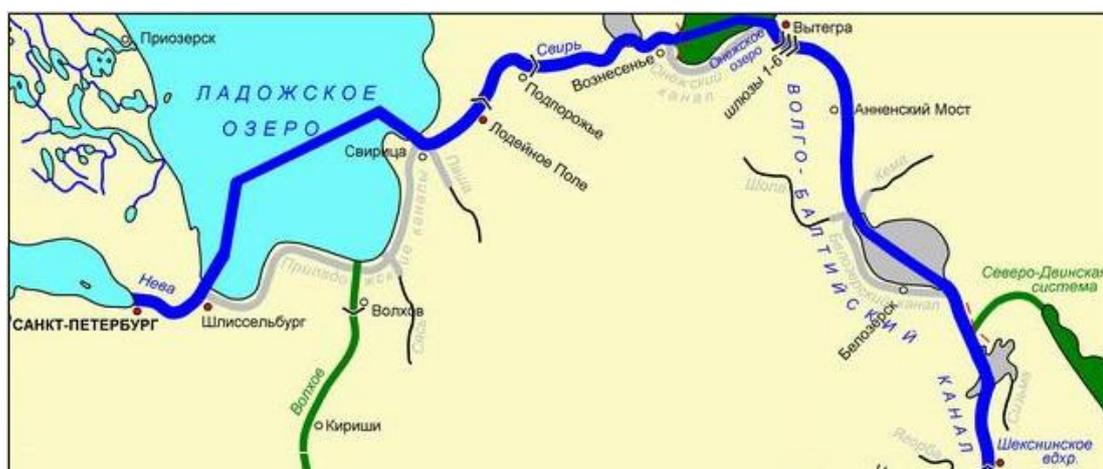


Рис. 9.3.1. Территориальные границы деятельности ГБУ «Волго-Балт»

В целом Волго-Балтийский водный путь представляет собой сложный комплекс инженерных объектов, включающий 4,9 тыс. км эксплуатируемых водных путей (в том числе 3,27 тыс. км с гарантированными габаритами), 11 шлюзов с напором от 11 до 18 м, три гидроэлектростанции, 25 земляных плотин и дамб, 12 паромных переправ, 9 мостовых переходов, 8 маяков в Ладожском озере, более 5 тыс. знаков судоходной обстановки (рис. 9.3.2). Его пропускная способность достигает 20 млн т различных грузов.

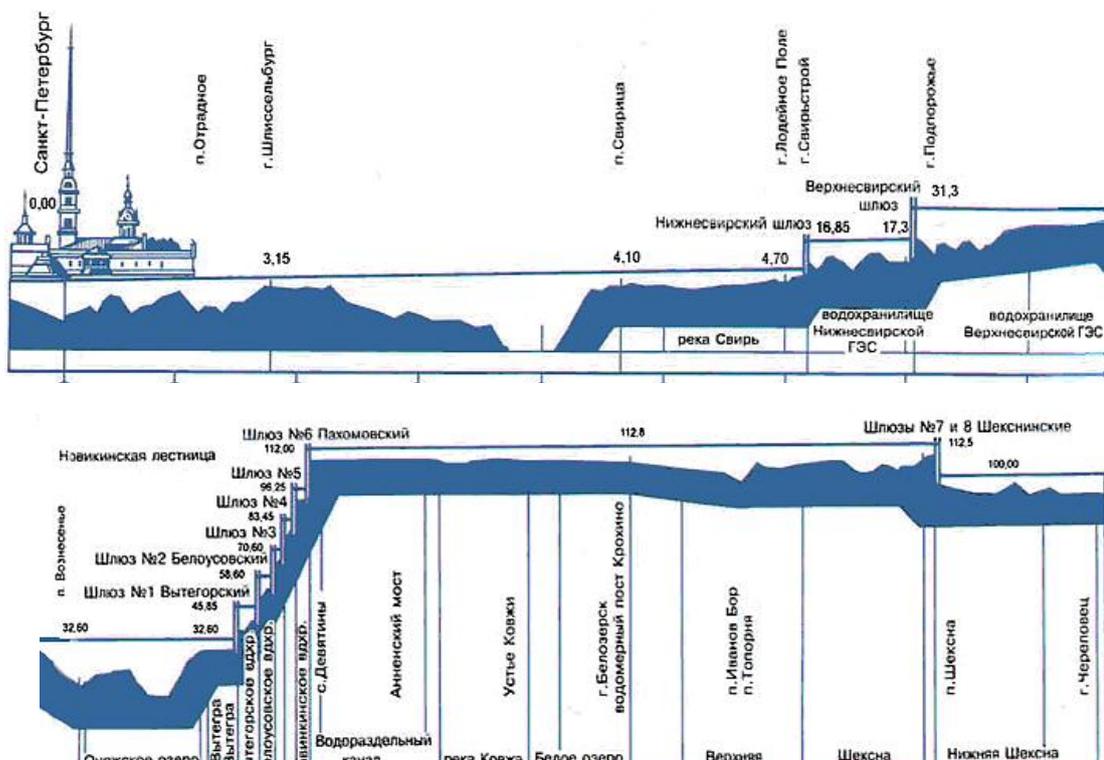


Рис. 9.3.2. Продольный профиль Волго-Балтийского водного пути.

Главная особенность судоходства по Волго-Балтийскому водному пути — это сочетание резко различающихся по своему характеру озерных (прежде всего Ладоги) и речных условий плавания. Наиболее сложными навигационными особенностями в Ладожском озере и на подходах к нему отличаются: минимальные габариты Нижнесвирского шлюза (198 x 17,6 м), где может шлюзоваться только одно судно; штормовые ветры в октябре (при северных ветрах высота волн может достигать 6 м); Кошкинский фарватер через мелководную отмель Шлиссельбургской губы; перекаты «Кривое колено» и «Ивановские пороги» на Неве; небольшие высоты неразведенных невских мостов (наименьшая 36 м).

Создание Волго-Балтийского водного пути сделало возможным сквозную перевозку грузов на судах «река-море» из портов Балтийского в порты Каспийского, Азовского и Черного морей, а также доставку импортных грузов в российские внутренние речные порты из морских портов ряда стран Западной Европы и Средиземноморья. Объемы среднегодовых перевозок достигают 15–20 млн т, из них, как правило, на строительные материалы приходится 24–36 %, на нефтепродукты — 28–31 %, металлы — 9–12 %, лесные грузы — 7–14 %, минеральные удобрения и химические грузы 3–6 %. За навигацию по Волго-Балтийскому водному пути проходит свыше 19–20 тыс. судов, в том числе 2,7–3 тыс. пассажирских (большая часть круизных), на которых ежегодно перевозится около 300 тыс. человек (рис. 9.3.3). Услугами Волго-Балта пользуется не менее 150 судоходных компаний.





Рис. 9.3.3. Суда Волго-Балта: 1 — танкер «Волгонепфть»; 2 — лесовоз; 3 — сухогруз «Окский»; 4 — погрузка леса; 5 — теплоходы у острова Валаам.

Основная часть грузов (11-14 млн т) следует в порты Балтийского моря через южную часть Ладожского озера. Всего за навигацию по этой оживленной трассе проходит более 8 тыс. судов, из них 6,5 тыс. грузовые (в том числе свыше 26% — танкеры и наливные баржи). На более чем 80 теплоходах здесь перевозится около 160 тыс. пассажиров, следующих в основном по маршруту Санкт-Петербург — Москва.

Среди грузов внутренних линий в Ладожском озере преобладают строительные материалы, сырье и лес для заводов, сельскохозяйственная продукция, товары массового спроса. Но их объемы незначительные. Вывозится водным транспортом, в основном из Карелии, строительный щебень различных фракций, щебеночно-песчаные смеси, песок из отсевов дробления и гранитные блоки.

Наиболее оживленная трасса круизных линий в Ладожском озере пролегает к острову Валаам и к живописному шхерному району Карелии. Значительное число туристских теплоходов транзитом через озеро следует по маршруту Санкт-Петербург — Москва, к Астрахани, Ростову-на-Дону и некоторым другим речным портам страны.

Маломерным судам со стационарными двигателями и электрическими подвесными моторами разрешается следовать по маршрутам движения к месту производства работ и массового отдыха на Ладожском озере с учетом обеспечения охраны природы, условий обитания рыб, водных животных и растений.

На Ладоге нет крупных портов, но имеется много гаваней, используемых как при транзитных перевозках грузов, так и при перевозке грузов и пассажиров в пределах озера. К ним относятся пристани и причалы в Свирице, Новой Ладоге, Петрокрепости, Сортавале, Лахденпохье, Питкяранте, Приозерске, бухте Монастырская на острове Валаам. Первые три из них располагают судоремонтными возможностями. Текущий ремонт малых судов возможен также в Сортавале и бухтах Моторная и Владимирская. В диспетчерском пункте «Свирица» построены новые здания центров УДС и башни связи. Гавани, расположенные на северном и отчасти западном и восточном берегах Ладожского озера, служат для обеспечения судов, отгружающих насыпные грузы и транспортирующих лес к предприятиям целлюлозно-бумажных заводов в пос. Ляскеля и г. Питкяранта, деревообрабатывающих комбинатов в г. Лахденпохья и пос. Хелюля (вблизи Сортавалы). Для отправки готовой продукции ОАО «Гранит-Кузнечное» имеется три водных причала в заливе Гладкий (вблизи селения Ровное). Их пропускная способность позволяет отгружать в течение навигационного периода более 1,3 млн т продукции карельских карьеров. Круизные суда для туристических поездок на острова Валаам и Коневец помимо Санкт-Петербурга используют причалы Сортавалы и Приозерска. Ежегодно государственный природный заповедник на острове Валаам посещает до 100 тыс. туристов.

К основным транспортно-экологическим проблемам судоходства в Ладожском озере относятся (Алхименко, 2005, 2006):

- 1) незначительная глубина подходных фарватеров и акватории на подходах к Неве (Кошкинский фарватер через мелководную отмель Шлиссельбургской губы) и реке Свирь;
- 2) старение и износ судов внутреннего водного плавания;
- 3) недостаток специализированных перегрузочных терминалов и причалов для судов пассажирского флота;
- 4) отсутствие современных яхт-клубов в инфраструктуре водного туризма;
- 5) устаревание значительной части существующих причальных сооружений;
- 6) загрязнение водных путей маломерным флотом;
- 7) несовершенство системы управления движением судов и координации действий сил, участвующих в ликвидации аварийных нефтеразливов и других чрезвычайных ситуаций;
- 8) нарушение мер по обеспечению экологической безопасности при эксплуатации судов и портов;

9) недостаточный объем инвестиций в развитие транспортной инфраструктуры;

10) несанкционированные сбросы при судоходстве.

Уменьшение негативного воздействия судоходства на окружающую среду в Ладожском озере может быть достигнуто за счет реконструкции гидротехнических сооружений на магистральных участках Волго-Балтийского водного пути (включая строительство второй ветки канала), модернизации и реконструкции существующих портов и транспортной инфраструктуры в целом, разработки и реализации современной системы локализации и ликвидации аварийных разливов нефтепродуктов, реконструкции судоходных и портовых фарватеров (каналов) с одновременным обновлением парка технических средств путевого хозяйства, судов обеспечения, средств спасения людей и обеспечения безопасности плавания, развертывания экологического мониторинга в интересах природоохранной деятельности всего транспортного комплекса.

9.4. Рекреационные ресурсы

Ладожское озеро является уникальным природным комплексом, обладающим богатейшим туристско-рекреационным потенциалом. Формирование и развитие рекреационного природопользования и рекреационного водопользования происходило и происходит здесь под влиянием социально-экономических, культурно-исторических, природоведческих, медико-биологических и других факторов, которые в свою очередь менялись во времени и пространстве. На протяжении веков Ладога была центром притяжения жителей нынешнего северо-запада России и ряда европейских государств. Здесь проходили торговые пути «из вряг в греки». На берегах Ладожского озера строились крепости, монастыри, поселения. Постепенно Приладожье осваивалось в хозяйственном отношении, что влияло на динамику расселения и изменение общей численности населения на побережье Ладожского озера. В настоящее время на его берегах, островах и акватории увеличилось разнообразие рекреационных занятий. К традиционной охоте и рыбной ловле, сбору ягод и грибов, отдыху на базах и в оздоровительных лагерях добавились многие виды рекреационного водопользования (разные виды туризма, круизы, дайвинг, виндсерфинг и др.).

Совокупность природных, культурно-исторических и социально-экономических предпосылок для организации рекреационной деятельности на побережье и акватории Ладожского озера свидетельствует о потенциальных возможностях развития туризма,

отдыха и других видов рекреационного природопользования, и прежде всего — рекреационного водопользования (Алхименко, 2008). Это обусловливается уникальным географическим положением Ладожского озера и его водосборного бассейна, значительным природно-климатическим потенциалом для развития туризма, санаторного лечения и отдыха, наличием достопримечательностей, богатым историко-культурным наследием, наметившейся тенденцией роста коллективных средств размещения туристов, сравнительно развитой транспортной инфраструктурой, возможностью использования сложившейся структуры экономики в интересах становления и развития туризма и рекреации (рис. 9.4.1).

Ладожское озеро омывает своими водами территории девяти муниципальных районов Республики Карелия и Ленинградской области с населением, превышающим 0,5 млн человек. Благодаря своему геополитическому и экономико-географическому положению оно играет значительную роль в хозяйстве северо-запада России. Уникальная водная система «Ладожское озеро — река Нева — Финский залив» обеспечивает транспортно-торговые связи региона страны, является важным звеном международных транспортных коридоров. Развитая транспортная инфраструктура способствует формированию единого рекреационного пространства на побережье Ладожского озера. Рекреационное значение озера увеличивается в связи с близостью крупнейшего туристского центра страны — Санкт-Петербурга — и ряда провинций Финляндии.

Основная часть населения приозерных районов Ленинградской области и Карелии проживает непосредственно на берегах Ладоги или вблизи побережья, где расположены шесть городов (Петрокрепость, Приозерск, Лахденпохья, Сортавала, Питкяранта, Новая Ладога), девять поселков городского типа (Свирица, Сясьстрой, им. Морозова, Кузнечное, Валаам, Ляскеля, Импилахти, Салми, Ильинский) и свыше 80 сельских населенных пунктов. Значительная часть из них может принять участие в развитии индустрии туризма и отдыха, обслуживании рекреационной деятельности. Каждый из девяти муниципальных районов, окружающих Ладожское озеро, обладает многообразным и в значительной мере уникальным природно-ресурсным потенциалом развития рекреации и туризма (Горелова, 1974; Сорокин, 2000).

Приозерский район Ленинградской области (площадь 3,6 тыс. км²) расположен в северо-восточной части Карельского перешейка. Вдоль побережья Ладожского озера он протянулся более чем на 150 км. Это один из самых популярных туристско-рекреационных районов Приладожья. Около 63% территории района занято сосновыми и смешанными лесами, 3,5% — болотами. Вуокса-Суходольская озерно-речная система, охватывающая практически всю территорию района (по разным оценкам, от 12 до 20% всей его площади), связана внутренними водными путями с озерной системой юга Финляндии и Выборгским районом Ленинградской области. В состав данной системы входит множество озер (Вуокса, Отрадное, Балахановское, Судаковское, Суходольское, Красное, Борисовское, Мичуринское, Островистое и др.) и речек (Вуокса, Бурная, Смородинка и др.). Эти водоемы очень богаты рыбой. Ихтиофауна района представлена 54 видами рыб, в том числе такими ценными для любительского и спортивного рыболовства, как сиг, форель, лосось, судак, омуль, лещ, налим и т. д. Кроме того, на реках и озерах района наблюдается большое разнообразие птиц (кряква, чирик, гоголь, луток,

средний крохоль и т. д.) — около 280 видов (это почти полный состав орнитофауны Ленинградской области). Не менее уникален животный мир. Кроме представителей среднетаежной фауны здесь обитает канадский бобр, рысь, барсук. На территории района зарегистрировано 17 баз рыболовов и охотников, в том числе «Студеная» (озеро Любимовское), «Беличье» и «Синево» (Вуоксинский разлив), «Озеро Мичуринское» (пос. Бережок), «Лосево» (река Вуокса), «Озеро Комсомольское», «Озеро Суходольское» (пос. Ольховка), «Котово» (урочище Котово). Ежегодно на знаменитых лосевских порогах, где скорость воды достигает 40 км/ч (здесь вода не замерзает даже в самые лютые морозы), проходит Международный водный фестиваль «Вуокса», который привлекает тысячи поклонников водных видов спорта. Любителям экстремальных видов спорта и туризма предоставляются услуги по сплаву на рафтинге, катамаранах или байдарках (Бондырева, 2005).

Шхеры, пляжные зоны, базы и лагеря отдыха, острова Коневец и Валаам, омываемые водами Ладожского озера, вместе с прилегающей акваторией предоставляют особые возможности для развития рекреации и туризма, связанные с водными ресурсами. Приозерский военный санаторий, база отдыха «Царство Снегурочки», комплекс «Добрый Лось», пансионат «Лосевский» и другие могут принять значительное количество отдыхающих и туристов, но особенно привлекательны базы отдыха на побережье озера: ЛИСИ (пос. Берёзово), лесная гостиница «Ладога» (пос. Сторожевое). Внимание отдыхающих притягивает не только величественная природа ладожских берегов, неповторимая красота шхер, но и яхтенно-катерный туризм, лодочные и байдарочные походы, рыболовные и охотничьи туры, сбор грибов и ягод на островах. Зимой можно покататься на лыжах и снегоходах, организовать сафари.

К слабым сторонам природно-климатического потенциала района следует отнести его климатические характеристики (переходные от континентального к морскому, с умеренно теплым летом, довольно продолжительной холодной зимой и неустойчивым режимом погоды), а также крайне небольшую долю особо охраняемых природных территорий (ООПТ) в общей площади района (0,2%). К последним относятся 4 региональных комплексных заказника: «Озеро Красное», «Озеро Ястребиное», «Гряда Вярмянселькя» и дендрологический парк «Отрадное». В то же время проектируется еще целый ряд крупных ООПТ, в том числе «Ореховский», «Долина реки Смородинки», «Моторное-Заостровье», «Озеро Вуокса». В случае организации этих новых заказников, общая площадь ООПТ района будет составлять около 30% от его территории. По мнению специалистов, наличие даже 15–20% охраняемых территорий обеспечивает условия

устойчивого развития экономики (включая туристско-рекреационную отрасль) при сохранении экологического равновесия.

В целом, природно-климатические условия Приозерского района благоприятны для всех видов летнего и зимнего отдыха. Здесь развиты водный, экологический и лечебно-оздоровительный виды рекреации и туризма, охота и рыбалка.

Всеволожский район (площадь 3 тыс. км²) примыкает к западному берегу Ладожского озера на протяжении 85 км. На территории района расположены юго-восточная и восточная части центральной возвышенности Карельского перешейка, часть Приладожской низменности и правобережья, часть Приневской низины. С востока и юга центральную возвышенность Карельского перешейка окаймляют камовые холмы — Токсовские и Лемболовские — с высотами 50–100 метров, между которыми располагаются котловины, заполненные озерами. Живописные окрестности станции Токсово и Кавголово с холмами и озерами — любимые места туристов, лыжников и отдыхающих. Здесь на Кавголовских холмах сооружены трамплины, где проводятся соревнования горнолыжников, слаломистов и биатлонистов.

Приневская и Приладожская низины представляют собой песчаные озерно-ледниковые и озерные террасы с абсолютными высотами до 30 м. Параллельно берегу Ладожского озера тянутся невысокие моренные гряды (Борисова Грива) с относительной высотой 10–20 м, а вдоль прибрежной низменности — береговые дюны высотой 3–5 м. Берег озера местами крутой, с оползнями; нагромождения валунов слагающие мысы Осиновец, Сосновец и Морьин Нос, образовались в результате размыва морены. Лесом (в основном сосна, в меньшей степени — ель) в районе занято более половины площади. На побережье Ладожского озера преобладают заросли ивы, серой ольхи, елово-мелколиственных лесов. Плоская поверхность низменностей, слабый дренаж, близкое залегание водоупорных пород — морены и ленточных глин — обуславливают значительную заболоченность территории в Приладожье (до 20%). Здесь преобладают торфяники верхового типа, но нередко встречаются переходные и низменные болота, особенно ближе к Ладожскому озеру.

Достаточно разнообразен и богат животный мир, ихтиофауна и орнитофауна. На побережье Ладожского озера расположен ряд рыболовно-охотничьих баз: «Гавань» (в 15 км к северу от пос. Морье), в пос. Кокорево, Кошкино (пгт им. Морозова) и др.

Всеволожский район — одно из любимых мест отдыха жителей Санкт-Петербурга. Здесь имеются дома отдыха, детские оздоровительные учреждения, в том числе и на побережье или вблизи него (пос. Морье, пгт им. Морозова и др.). Значителен

неорганизованный отдых и на песчаных пляжах Ладожского озера. Привлекательны для туристов некоторые из более чем 30 возможных ООПТ района (около 23% его площади).

Ценным природным объектом, подлежащим охране, является Лазаревское болото, расположенное между рекой Морье и железной дорогой Борисова Грива — Ладожское озеро. Это типичный для юго-западного Приладожья верховой болотный массив с прилегающими к нему преимущественно сосновыми лесами. Здесь находится местообитание редких видов растений — ситника стигийского, очеретника бурого, ятрышника Траунштейнера. Из птиц представляют ценность кроншнеп, белая куропатка, серый журавль, тетерев. Валунные моренные гряды мыса Морьин нос являются геологическим памятником.

К северу от реки Морье располагается Гонтовое болото. К основным объектам охраны здесь относятся редкие природные комплексы аапа-болот, места произрастания редких видов растений (очеретник свинцово-зеленый, ситник стигийский, ятрышник Траунштейнера), места обитания редких видов животных: гадюки, веретенницы ломкой, кобчика, пустельги, большого кроншнепа, дупеля, белой куропатки, серого сорокопуста, овсянки-ремеза), места стоянок пролетных гусей и журавлей во время сезонных миграций.

Между пгт им. Морозова и пос. Кокорево предполагается создать Кокоревский заказник, представляющий собой типичную лесоболотную территорию, где сохранились крупные массивы заболоченных хвойных и лиственных деревьев. Кокоревское верховое болото является местом произрастания пухоноса альпийского, росянки, очеретника бурого. Здесь находятся места гнездования редких видов птиц — кроншнеп, большой улит, белая куропатка, серый журавль, скопа. Большую ценность представляет Кокоревская бухта в Ладожском озере. Это место массового гнездования птиц, стоянки перелетных птиц во время сезонных миграций, а также нерестовая акватория для промысловых видов рыб. Природно-климатический потенциал Всеволожского района позволит развивать все виды рекреации и туризма, а в пределах побережья и акватории Ладожского озера — преимущественно экологический и водный.

Большая часть Кировского района (площадь 2,6 тыс. км²) тяготеет к Неве и ее притоку реке Мга. Протяженность береговой линии Ладожского озера, которая оконтуривает район на севере, составляет 120 км. Природа на этом южном берегу Ладоги отличается разнообразием: песчаные отмели, береговые валы, многочисленные острова, русла древнейших рек Мга и Госна. Здесь, от истоков Невы, начинаются Староладожский и Новоладожский каналы, которые предназначались для движения судов в обход Ладожского озера. Первый был открыт в 1731 г., но в связи с появлением парового флота

оказался непригодным, и параллельно ему, ближе к южному берегу, был прорыт Новолодожский канал, который использовался до реконструкции Волго-Балтийского водного пути в 1960-х гг. К известным памятникам природы относятся каньон реки Лава и Жихаревская пещера. Природно-климатический потенциал Кировского района вполне подходит для многих видов рекреации и туризма, но наиболее предпочтительны водный и экологический.

Волховский район (площадь 5 тыс. км²) расположен в бассейне нижнего течения рек Волхов, Сясь, Паша, Свирь и небольших речек, впадающих в Ладожское озеро. Его территория вытянута с запада на восток вдоль южного и юго-восточного берегов озера. Длина береговой линии превышает 160 км. Вдоль нее продолжают Старолодожский и Новолодожский каналы. Для севера и северо-востока района (Приладожская равнина) характерны низменные ландшафты (озерно-ледниковые и озерные), для юга — моренные и озерно-ледниковые глинистые. Приладожская низина состоит из плоских террас, поднимающихся от озера уступами высотой 10–30 м. Верхние озерно-ледниковые песчаные и супесчаные террасы образуют котловины, заполненные озерами и болотами. Нижние озерные песчаные террасы отличаются дюнами и береговыми валами, среди которых выделяются Коровий вал — граница Ладожского озера 4,5 тыс. лет назад. На северо-востоке в пределах верхних террас хорошо выражены долины Свири, Ояти и Паши, которые ближе к озеру вместе образуют обширную сильно заболоченную дельту. Здесь пойменные луга сочетаются с болотами и зарослями ивняка. При впадении в Ладожское озеро Свирь сильно разливается, превращаясь в Загубскую губу. Река Паша у устья соединена коротким каналом с Новолодожским, а со Свирью — Новосвирским каналами.

Сильно заболоченное побережье Ладожского озера на значительном протяжении слабо заселено. В устье реки Волхов, которая в прошлом была важным звеном торгового пути «из варяг в греки», расположен город Новая Ладога. Здесь, в черте города, на побережье находится памятник природы — параллельные ряды поросших лесом береговых песчаных дюн на расстоянии 200–300 м друг от друга. Эти дюны образовались несколько тысяч лет назад, когда береговая линия Ладожского озера постепенно отступала.

На побережье имеется большое число селений (Сторожно, Кириково, Вороново, Черное, Кобона и др.), рыболовных и рыболовно-охотничьих баз. Этому способствуют богатый мир ценных рыб, неповторимые природные ландшафты, обилие фауны. Многие базы рыболовов и охотников находятся вблизи Новолодожского канала (в устьях рек Назия, Кобона, Воронежка, в поселках Леднёво, Кивгода, Дубно, Креницы и других —

между пос. Кобона и Новой Ладогой). Следует также отметить реку Сясь, которая выделяется своей многоводностью и ранее входила в состав Тихвинского водного пути, известного еще со времен Новгорода Великого. В целом, как показывает анализ природно-климатического потенциала Волховского района, на его базе вполне возможно развивать водный, экологический и другие виды туризма и рекреации.

Лодейнопольский район (площадь 4,9 тыс. км²), граничащий с территорией Карелии, примыкает к Свирской губе на небольшом участке береговой линии Ладожского озера (около 30 км). Здесь, в низовьях Свири, располагается Нижнее-Свирский государственный орнитологический заповедник, занимающий площадь в 41 тыс. га. Он охватывает территорию суши, берега и акваторию Свирской губы. В заповеднике сохраняется и изучается флора и фауна приладожских лесов и болот и ладожских вод Свирской губы. Здесь особенно разнообразен птичий мир заповедника, а на берегу Ладоги находится одна из самых значительных стоянок пролетных птиц. Известна Свирская губа и большими зарослями насекомоядного растения альдрованды.

Река Свирь, соединяющая Ладожское и Онежское озера, играет большую роль в транспортных связях на Волго-Балтийском водном пути. Неподалеку от ее устья находится уникальный поселок Свирица, который расположен на островах, образованных рукавами, протоками и притоками рек Свири и Паши. Дома в Свирице стоят непосредственно по берегам проток, а сообщение внутри поселка летом поддерживается на катерах и лодках. Вдоль водных путей сооружены дамбы, защищающие поселок от весенних паводков. В среднем течении Свири располагается и широко известный в истории России районный центр-город Лодейное поле. Вдали от побережья большой известностью пользуется природный парк «Вепский лес». Эти и другие особенности природно-климатического потенциала Лодейнопольского района также представляют интерес для развития экологического, водного и некоторых других видов туризма и рекреации.

Также как и в Ленинградской области, природно-климатический потенциал Карелии для развития рекреации и туризма на побережье и акватории Ладожского озера отличается многообразием и неповторимостью. Как уже отмечалось, особую значимость ему придают уникальные Ладожские шхеры и расположенные вблизи побережья острова.

Олонецкий район (площадь 4 тыс. км²), граничащий с Лодейнопольским районом Ленинградской области, выходит к Ладожскому озеру значительной протяженностью береговой линии (более 100 км). По сравнению с другими прибрежными районами Карелии он обладает рядом рекреационных особенностей, которые связаны со

своеобразием его природно-климатического потенциала. В естественно-историческом плане район представляет собой довольно обширную равнину с редкими возвышенностями. Здесь на севере залегают обширные болотные массивы, богатые морошкой и клюквой. Олонецкая низменность, занятая сельскохозяйственными угодьями, весной и осенью становится местом отдыха пролетных гусиных стай, отличающихся высоким видовым разнообразием. Эти орнитологические угодья национального масштаба создают значительные возможности для их использования в туристских целях (научные исследования, наблюдения с помощью бинокля, фотоохота, ружейная охота). В то же время требуется охрана некоторых видов, занесенных в Красную Книгу России.

Приладожская полоса района, представляющая собой в основном необжитую и труднодоступную местность, на большом протяжении покрыта прекрасными сосновыми борами, изобилующими грибами и ягодами. Так как эти заповедные леса — нетронутая природа и побережье — являются излюбленными местами отдыха, здесь могут быть организованы индивидуальные средства размещения, в том числе так называемый «туризм в коттеджах». Этому способствует и наличие автомобильной и железной дорог, которые находятся в удалении от уреза воды на расстоянии от 0,5 до 3–4 км.

Своеобразным туристским ресурсом прибрежной зоны могут стать эоловые формы рельефа — дюны и песчаные валы, развитые в районах устьев рек Олонка, Видлица и в некоторых других местах. При этом Видлица и Тулокса относятся к числу лучших лососевых рек бассейна Ладоги. В сочетании с рыбными запасами прилегающих акваторий Ладожского озера они представляют ценные рыболовные угодья для самых взыскательных туристов. В летний период большой интерес для отдыха представляют многочисленные участки песчаных пляжей. В настоящее время здесь вдоль берегов насчитывается не очень много рекреационных пунктов. При следовании с юга на север к ним относятся: база отдыха в устье реки Обжанка, охотничье-рыболовная база «Ладожские зори» (в 12 км от пос. Ильинский), поселки Тулокса и Видлица. Летом в прибрежной зоне существует множество неорганизованных стоянок и бивуаков в небольших бухтах с песчаными пляжами. Таким образом, исходя из особенностей природно-климатического потенциала на акватории и побережье Ладожского озера, Олонецкий район достаточно перспективен для организации здесь разнообразных форм рекреации и отдыха, экологического, рыболовного и охотничьего туризма.

Три других прибрежных района Карелии тесно взаимосвязаны в физико-географическом отношении наличием Ладожских шхер. Этот уникальный природный комплекс, представляющий собой переплетение разнообразнейших шхерных полуостровов

и узких заливов, скалистых островов и небольших проливов, рассматривается в настоящее время в качестве особо охраняемой природной территории — государственного природного парка (площадь около 84 га), а впоследствии — национального парка «Ладожские шхеры».

По прибрежной части пересеченного рельефа проходит трасса международной «Голубой дороги» туризма. Каждый из районов отличается также определенными природными особенностями. Все они богаты ресурсами животного и растительного мира (Грибушин, 2002; Шорохов, 2001).

Рельеф Питкярантского района (площадь 2,3 тыс. км², протяженность извилистой береговой линии около 295 км) чрезвычайно изрезан, изобилует грядами и каньонообразными понижениями, которые часто служат долинами порожистых рек и ручьев, впадающих в Ладожское озеро. В районе находятся карьеры гранитных и мраморных ломок, три красивейших водопада (один из них на реке Коулисмайоки отстоит от трассы «Голубая дорога» на расстоянии около 10 км). В окрестностях озера Лоухиярви (10 км от г. Питкяранта) расположена Уксинская озовая гряда, объявленная геологическим памятником — классическим примером развития ледникового ландшафта. В г. Питкяранте (в переводе с финского «длинный берег») живописные ландшафты Ладожских шхер заканчиваются, берег поворачивает к югу, гранитные утесы уступают место песчаным пляжам. Южнее поселка Салми на побережье встречаются сосновые боры и эоловые формы рельефа — дюны. Вблизи этого крупного транспортного узла находятся привлекательные с точки зрения рекреационного потенциала большие острова Ладожского озера Мантсинсаари и Лункулансаари. На последнем расположена база отдыха «Мантсинсаари» — идеальное место для любителей рыбалки и сбора даров карельского леса.

К Сортавальской городской администрации местного самоуправления (площадь 2,1 тыс. км², длина извилистой береговой линии 280 км) относится и знаменитый Валаамский архипелаг, состоящий из 50 небольших островов. Обширный островной архипелаг Сортавалы, простирающийся от северного берега Ладоги на юго-восток, замыкает полуостров Хунукка, с южной оконечности которого в хорошую погоду виден Валаам. Здесь, в районе поселка Импилахти, расположенного в вершине узкого одноименного залива, известностью пользуется высокая нависающая гранитная стенка, на которой периодически проводят соревнования скалолазы. Популярен также старый гранатовый карьер Мурсула, где добывали полудрагоценные камни. В 18 км от Сортавалы

бурением выведены на поверхность радоновые минеральные воды. Сортавала известна и как климатический курорт с санаториями, домами отдыха и турбазами.

В Лахденпохском районе (площадь 2,2 тыс. км², длина извилистой береговой линии 275 км), находящемся в наиболее благоприятной климатической зоне Карелии, также много различных природных достопримечательностей. Помимо живописной части шхер, можно отметить наличие внутренних озер на островах, с перепадом уровней до 70 м. Однако в последнее время здесь отмечаются нарушения земельного, водного и природоохранного законодательства: незаконное строительство на побережье (почти у уреза воды) и лесозаготовительная деятельность в промышленных масштабах, в том числе вырубка крупных деревьев на расстоянии 200–300 м от берега, трелевка древесины по руслам ручьев и т. д.

Для водных путешествий по Ладожским шхерам наиболее благоприятным сезоном является период с середины июня до второй половины сентября. В жаркое лето температура воды в заливах может подниматься до 18 °С, а в небольших внутренних озерах на островах и на материке — до 25 °С. Зима — время лыжных прогулок туристов по живописным просторам шхер. В целом, природно-климатический потенциал Ладожских шхер и прибрежных районов Карелии оценивается очень высоко. На его основе перспективно дальнейшее развитие водно-спортивного, экологического, рыболовного, охотничьего, научного туризма и многих других видов рекреации.

Ладожское озеро и прилегающие к нему районы обладают богатым культурно-историческим наследием, привлекательным не только для российских туристов, но и для туристов из Финляндии, Швеции, Норвегии и других зарубежных стран (Бондырева, 2005; Даринский 1975, 2000; Медведев, 1996; Панов, 2004; Реестр туристических..., 2001; Сорокин, 2000; Шорохов, 2001 и др.). На островах и территориях приозерных районов находится огромное число памятников истории и культуры федерального, регионального и местного значения. Они как ожерелье опоясывают Ладожское озеро сплошным кольцом. К ним относятся крепости и фортификационные сооружения, многочисленные религиозные объекты, архитектурные строения, музеи, дворцы, усадьбы и т. д. Международную известность приобрели такие памятники истории и культуры, как крепости Корела, Орешек (Шлиссельбург), Старая Ладога, Валаамский и Рождество-Богородичный Коневский монастыри, «Дорога жизни» и др. На дне Ладожского озера лежит большое количество затонувших кораблей и судов, что имеет значение для организации приключенческого, научного и ритуального туризма, а также для подводной археологии.

На территории Приозерского района насчитывается более 160 памятников истории и культуры федерального, регионального и местного значения, в том числе 74 памятника архитектуры, 55 памятников археологии, 25 памятников истории, 7 памятников искусства. Большая часть культурно-исторического наследия района сконцентрирована в Приозерске, который входит в состав 12 исторических поселений Ленинградской области. Являясь одним из древнейших поселений России, этот город сохранил в своем облике следы разных исторических эпох, национальных культур и религий. Первые упоминания о нем можно найти в старинных летописях, согласно которым именно здесь, в военно-торговом центре древнекарельского общинно-родового образования, именовавшегося Кякисалми (Кукушкин пролив), в 879 г. был похоронен князь Рюрик, родоначальник царской династии Рюриковичей. В дальнейшем поселение входило в состав различных государств под разными названиями: Корела (центр карельской земли в составе Новгородской республики и Водской пятины Московского царства), Кексгольм (в составе шведского королевства и Российской империи), Приозерск.

Культурно-историческим градообразующим элементом Приозерска является крепость «Корела». На территории этого культурно-исторического объекта расположен музей, принимающий ежегодно свыше 17 тыс. человек. В городе имеется много памятников архитектуры и садово-паркового искусства. С его историей связаны имена выдающихся государственных деятелей, военачальников, представителей культуры, искусства: царей Бориса Годунова и Василия Шуйского, императоров Петра I и Александра I, полководцев Якоба Делагарди, А.В. Суворова и М.И. Кутузова, поэтов В.А. Жуковского и А.П. Барятинского, писателей Н.С. Лескова и Александра Дюма-отца, архитекторов Якоба Аренберга и Армаса Линдгрена, композитора Эрkki Мелартина и скульптора Албина Каасинена. Эти и многие другие имена великих и известных людей являются мощным культурно-историческим ресурсом для развития познавательного (экскурсионного) туризма.

К югу от Приозерска, в пяти километрах от берега Ладожского озера, на острове Коневец, находится Рождество-Богородичный Коневский мужской монастырь (XIV в.), игравший важную роль главным образом в Приладожье (вел торговлю, имел свои суда и большое хозяйство). В настоящее время монастырь стал центром духовной жизни Приозерского района и местом паломничества верующих из других регионов России, прежде всего Санкт-Петербурга.

Значительная часть культурно-исторического наследия Всеволожского района сосредоточена во Всеволожске и вокруг него. На территории современного города в

районе Румболовских высот в XVIII–XIX веках находилась усадьба «Рябово». В 1818 г. усадьбу приобрел один из богатейших людей того времени в России, В.А. Всеволожский, который создал здесь большое садово-парковое хозяйство. Во Всеволожке объектами туристского интереса являются церковь Спаса Нерукотворного, Святотроицкая церковь, историко-краеведческий музей. Вблизи Всеволожска, в усадьбе «Приютино», принадлежавшей в начале XIX в. первому директору Петербургской публичной библиотеки А.Н. Оленину, открыт литературно-художественный музей. В усадьбе Оленина бывали многие известные деятели русской культуры первой половины XIX в.: поэты и писатели А.С. Пушкин, И.А. Крылов, К.Н. Батюшков, П.А. Вяземский, В.А. Жуковский, историк Н.М. Карамзин, художники К.П. Брюллов, А.Г. Венецианов, О.А. Кипренский, С.Ф. Щедрин, композитор А.А. Алябьев и многие другие (Даринский, 1975, 2000). Здесь гостил известный польский поэт Адам Мицкевич.

На территории Всеволожского района к объектам туристского интереса относятся памятники Зеленого пояса Славы, мемориалы и обелиски «Дороги жизни», горнолыжный курорт Охта-парк (пос. Кузьмолово, пос. Кавголово). Вблизи побережья Ладожского озера — церковь Петра Афонского и княгини Ольги (пос. Морье), комплекс Осиновецкого маяка (1910–1911 гг.), включая мыс Осинец, где во время Великой Отечественной войны был создан порт, через который осуществлялась связь Ленинграда со страной.

Основной культурно-исторический потенциал Южного Приладожья, который с севера оконтуривает границы Кировского района, сконцентрирован в заказнике «Бухта Петрокрепость». Здесь, в Шлиссельбурге, расположены главные объекты туристского интереса: музей Шлиссельбургская крепость «Орешек», Благовещенский собор, Никольская церковь, часовня Казанской Божьей Матери, Гостиный двор. Отсюда, от Невы, начинаются Староладожский (Петровский) и Новоладожские каналы (старое русло XVIII–XIX вв., новое русло — XIX в.).

Жемчужиной Волховского района является Старая Ладога — один из древнейших населенных пунктов на северо-западе России (ныне крепость и музей-заповедник). Поселение на месте современной Старой Ладоги было основано в VIII в. и входило в состав Киевской Руси. По преданию, здесь умер и похоронен один из первых русских князей, Олег. В X–XII вв. Ладога была известна как крупный торгово-ремесленный центр и укрепленное поселение на древнем торговом пути «из варяг в греки» и из Балтийского моря на Волгу. В это время была построена первая в Древней Руси каменная крепость. Из Ладоги в 1240 г. Александр Невский повел своих дружинников на шведов, сюда же, по преданию, вернулся с победой. За стенами крепости находятся выдающиеся памятники

древнерусского зодчества — Георгиевский и Успенский соборы. Кроме этого к объектам туристского интереса относятся городище — остатки крепости XVI в., ансамбль Никольского монастыря с собором и колокольней XVII в., церковь Иоанна Предтечи.

В устье Волхова расположен г. Новая Ладога. Он основан Петром I в 1703 г. вблизи существовавшего еще с XV в. Никольско-Медведского мужского монастыря. Развитие города в XVIII-XIX вв. было связано с судостроительной верфью и с прорытием Ладожских обводных каналов. Здесь также находится ряд памятников истории: Никольский собор, церковь Иоанна богослова XVII в., Климентовская церковь и др. Сохранились места, связанные с деятельностью А.В. Суворова (деревянная церковь, построенная солдатами Суздальского полка, деревянный дом бывшего офицерского собрания, здание Гостиного двора). К другим культурно-историческим ресурсам Волховского района относятся: ГЭС на реке Волхов, археологические памятники VII-XIX вв. (деревни Киприно, Сторожно, Чернявино, Креницы), Церковь Николая Чудотворца (Кобона). К ним следует добавить и широко известный Троицко-Зеленецкий монастырь XVII в. (пос. Зеленец).

Культурно-историческое наследие Лодейнопольского района также включает немало объектов туристского интереса. На его территории расположены такие памятники русской духовной жизни, как Свято-Троицкий Александро-Свирский мужской монастырь (XV-XIX вв.), деревянная церковь Михаила Архангела (XVII в.), Введено-Оятский монастырь (XV в.), Покрово-Тервенический женский монастырь (XII в.), церкви и часовни в деревне Заозерье (Алеховщина). Памятниками истории богат районный центр — Лодейное поле: на местах домика Петра Великого, спуска судна «Штандарт» и т. д. Здесь в 1702 г. Петр I заложил Олонецкую судостроительную верфь, на которой за 130 лет ее существования было построено 450 судов для Балтийского флота. Наиболее известные из них шлюпы «Диана» (переход из Кронштадта на Камчатку) и «Мирный» (кругосветное плавание и открытие Антарктиды).

Олонецкий район достаточно перспективен для организации разнообразных форм культурно-познавательного туризма, что связано с насыщенной, уходящей вглубь веков, историей карельского народа, наличием отдельных памятников некогда грозной Олонецкой крепости, возможностью реализации проекта строительства культурно-этнографического центра карел «Музей под открытым небом», вовлечением в туристский оборот других культурно-исторических рекреационных ресурсов. Районный центр Олонец, имеющий статус исторического города, выгодно расположен на пересечении федеральной

дороги «Кола» и международного туристского маршрута «Голубая дорога». Ежегодно этот старейший город Карелии принимает более 10 тысяч туристов.

Богаты культурно-историческим наследием и другие районы Карелии, прилетающие к побережью Ладожского озера (Алхименко, 2008; Природные парки..., 1995). В то же время сложная историческая судьба населяющих этот край народов, связанная с чередованием войн и длительным приграничным положением, обусловила незначительную сохранность многих культурно-исторических объектов. Например, памятники Питкярантского района составляют лишь 3,2% культурного наследия республики. В совокупности их 112, в том числе 59% приходится на памятники последних войн, 28,5% — на памятники архитектуры, 12,5% — на памятники археологии. Мемориальная зона «Долина героев» связана с трагическими страницами Зимней войны 1939–1940 гг. Историко-мемориальный комплекс «Ниетъярви» представляет собой участок «линии Маннергейма» с системой траншей, дотов, дзотов, железобетонных убежищ, минных полей, противопехотных и противотанковых заграждений. Здесь шли упорные бои во время заключительного этапа Свирско-Петрозаводской операции Карельского фронта в 1944 г. Вблизи Питкяранты в 2000 г. открыт и еще один монументальный памятник «Крест скорби», символизирующий примирение и подводящий черту под трагическими событиями двух последних войн. Ряд памятников в Питкярантском районе связан со шведским присутствием: в 1618 г. на Варецком мысу вблизи села Погранкондуши в качестве порубежного знака был установлен огромный Варашев камень; столетие последней войны между Швецией и Россией символизирует оригинальный памятник у села Ууксу. Помимо исторических памятников, связанных с военными событиями, в районе имеются и архитектурные достопримечательности: Скорбященская церковь в поселке Орусъярви, церковь Николая Чудотворца в пос. Салми; архитектурные объекты в пос. Импилахти — банк, дом священника и его летняя резиденция, исторические жилые дома. Все это способствует развитию различных форм культурно-познавательного туризма.

Достаточно представлен культурно-исторический потенциал Сортавалы. Это не только один из трех исторических центров Карельского перешейка (вместе с Выборгом и Приозерском), но и город, через который лежит путь на легендарный Валаам — историко-архитектурный и природный музей — заповедник с ансамблем Валаамского Спасо-Преображенского монастыря, основанного в XIV в. За один год святыни этого памятника республиканского значения посещают до 80 тыс. паломников и туристов. Сортавала известна как погост с XII в. С 1617 г. по Столбовскому мирному договору она находилась

в составе Швеции, в 1721 г. отошла к России по Ништадскому мирному договору (город был переименован в Сердоболь), в 1918–1940 гг. входила в состав Финляндии. Заметные архитектурные объекты и жилые дома центра города в стиле модерн были построены известными финскими архитекторами, среди них Элиель Сааринен.

В Лахденпохском районе на государственном учете находятся 53 памятника. Кроме того, выделены 4 историко-культурных комплекса: загородная усадьба на территории города; военный городок в пос. Хуухканмяки; железнодорожный вокзал станции Яккима; сельская усадьба в Хийтола. Среди памятников древней истории известны городище в Куркиеки (XIV–XVI вв.), городище-убежище Суур-Микли (IX–XIV вв.), могильник Кууппала (близ Куркиеки), стоянка VI–I тыс. до н. э. и т. д. В районе сохранились культовые сооружения, среди них имеются уникальные памятники архитектуры: храм пророка Илии в Лахденпохье; Тиуровская церковь и храм преподобного Серафима Саровского в Хийтола; лютеранские кирхи в Лумиваара, Ильме и Яккима; часовня во имя преподобных Сергия и Германа Вааламских в пос. Вятиккя; храм Рождества Богородицы в пос. Куркиеки.

Таким образом, культурно-историческая составляющая рекреационного потенциала муниципальных районов Карелии и Ленинградской области на побережье и акватории Ладожского озера дополняет и обогащает природную составляющую, сочетая в совокупности материальную и духовную основу развития всех видов и форм туризма и рекреации.

В целом по результатам исследований, представленных в Главе 9, можно сделать следующие обобщения.

Ладожское озеро — безальтернативный источник питьевого водоснабжения Санкт-Петербурга и множества населенных пунктов Карелии и Ленинградской области. Анализ результатов натурных исследований по выявлению и оценке потенциальных источников водозабора позволяет сконцентрировать внимание на объемах воды, находящихся в западной и юго-западной частях акватории Ладожского озера с глубинами более 20 и 50 м. Ориентировочно запас воды в Ладоге ниже плоскостей, ограниченных изобатами 20 и 50 м, оценивается в 555 и 264 км³, соответственно.

В рыбопродукционном отношении Ладожское озеро неоднородно и может быть подразделено на две тесно связанные, но не эквивалентные части. Одна из них основная — это обширные открытые акватории озера. Происходящие здесь процессы определяют высокий продукционный потенциал озера и его долгопериодную цикличность, отражающуюся на динамике рыбного населения в целом. Вторая часть —

прибрежная мелководная зона. Она не только отличается существенными особенностями в экологическом отношении, включая динамику сырьевых ресурсов, но и уступает открытым акваториям по вкладу в суммарные биопродукционные показатели. Целесообразно разработать и приступить к практической реализации комплекса охранных и рыбоводных мероприятий, направленных на сохранение и восстановление промысловой значимости наиболее ценных ладожских рыб и стимулирование вылова слабо эксплуатируемых видов.

Ладожское озеро является важнейшим звеном в транзитном водном пути из внутренних районов страны в Балтийское море. За навигацию по Ладожскому озеру, которое является частью Волго-Балтийского водного пути, проходит свыше 19–20 тыс. судов, в том числе 2,7–3 тыс. пассажирских (большая часть круизных), на которых ежегодно перевозится около 300 тыс. человек. Услугами Волго-Балта пользуется не менее 150 судоходных компаний. Интенсивность грузовых и пассажирских перевозок продолжает расти, что требует разработки экстренных мер для уменьшения негативного воздействия судоходства на окружающую среду, серьезной модернизации и реконструкции существующих портов и транспортной инфраструктуры в целом.

Ладожское озеро является уникальным природным комплексом, обладающим богатейшим туристско-рекреационным потенциалом. Формирование и развитие рекреационного природопользования и рекреационного водопользования происходило и происходит здесь под влиянием социально-экономических, культурно-исторических, природоведческих, медико-биологических и других факторов. Сохранившаяся и воссозданная культурно-историческая составляющая рекреационного потенциала муниципальных районов Карелии и Ленинградской области на побережье и акватории Ладожского озера дополняет и обогащает природную составляющую, сочетая в совокупности материальную и духовную основу развития всех видов и форм туризма и рекреации.

Ладожское озеро является центром, внутри и вокруг которого в пределах всей водосборной площади создана сеть особо охраняемых природных территорий, которых насчитывается 17. Исключительно высокий уровень разнообразия природы Приладожья до сего времени обеспечивал ее равновесие и устойчивое развитие, несмотря на близость многомиллионного Санкт-Петербурга. Однако происходящее в последнее время интенсивное хозяйственное освоение региона, изъятие земель под промышленное, сельскохозяйственное и жилищное строительство, организация садоводств и огородничеств, а также усиление рекреационной нагрузки ведут к деградации заповедной

природы Приладожья и постепенному возрастанию гибели ценных природных экосистем. Поэтому сохранение необходимого минимума «дикой природы» с ее биоразнообразием становится главной задачей природоохранной деятельности общества

Заключение

Проведенные многолетние исследования Ладожского озера и его водосборного бассейна, основные результаты которых изложены в настоящей монографии, показали, что формирование геосистемы Ладожского озера происходило под влиянием тектонических и климатических факторов. На разных этапах своего развития озеро являлось заливом Балтийского моря или самостоятельным водоемом. Современное озеро начало формироваться около 5000 лет назад. Окончательный разрыв Ладожско - Балтийского соединения произошел около 3700 лет назад. В это время уровень озера упал до современных отметок.

Водосбор Ладожского озера расположен в зоне тайги и зоне смешанных лесов. Северная часть водосбора расположена в пределах Балтийского кристаллического щита, южная - на Русской платформе. Граница между двумя этими частями проходит приблизительно по линии г. Выборг - г. Приозерск - устье р. Видлица - исток р.Свирь. Территория водосбора покрыта густой сетью водотоков, многочисленными озерами и обширными болотами. Густота речной сети составляет в среднем 0,45 км/км². Наиболее значительными водотоками являются реки: Волхов, Свирь, Вуокса, Сясь, Оять, Паша и Мста. Реки водосбора Ладожского озера, как правило, имеют смешанное питание с преобладанием снегового с высоким половодьем, низкой летней и зимней меженью и подъемами уровня воды осенью под влиянием обложных дождей. Основными озерами водосбора Ладожского озера являются Онега, Ильмень и Сайма. Режим уровней озер характеризуется максимальным уровнем подъемов в период весеннего снеготаяния и относительно устойчивой летней и зимней меженью.

Изменения большинства параметров климатического режима на водосборе Ладожского озера являются региональными проявлениями глобального антропогенного потепления. Согласно результатам оценок исторических изменений фактических данных, привлеченных к анализу, климат водосбора Ладожского озера по сравнению с другими регионами Европы крайне отзывчив на происходящие изменения глобального климата.

Только тот выявленный факт, что в северной части водосбора тренд повышения температуры приземного воздуха в существенно выше его среднего глобального значения, свидетельствует о такой исключительной чувствительности.

Сток с водосбора – основной источник поступления в озеро химических веществ (внешней нагрузки). Если в конце 70-х начале 80-х гг. приток фосфора в Ладогу, определяющего эвтрофирование озера, составлял 6000–7000 т год⁻¹, то в настоящее время в озеро с водосбора поступает 3000 – 4000 т Р год⁻¹ в зависимости от водности года. По результатам моделирования проведена оценка вклада различных источников в формирование фосфорной нагрузки на Ладожское озеро. Показано, что в настоящее время точечные источники загрязнения формируют 12% нагрузки Р_{общ}, рассредоточенные антропогенные источники – 11%, вынос из донных отложений – 37%. Природная (фоновая) фосфорная нагрузка на озеро оценивается в 50% от значения суммарной нагрузки на озеро. По результатам мониторинга и выполнена регионализация природного (фоновое) выноса органического углерода, общего азота и общего фосфора с речных водосборов бассейна Ладожского в области Балтийского кристаллического щита и Русской равнины. Показано, что модули выноса Р_{общ} на территории бассейна озера изменяются в пределах 0.6 - 14.5 кг км⁻² год⁻¹.

Резко расчленённый, контрастный рельеф дна северной части Ладожского озера отличен от более пологой и менее холмистой его поверхностей в центральной и южной частях озера. Четко выявляются различия в строении котловины южной и северной частей озера. На севере сказывается влияние Балтийского кристаллического щита. В районе острова Валаам и севернее его, в ладожских шхерах, особенно на северо-западе озера, уклоны склонов могут превышать 5°. Для подводного рельефа указанные значения характеризуют довольно крутые склоны, которые встречаются редко. Их наличие является свидетельством того, что рельеф сложен породами, плохо поддающимися размыву. Наиболее выровненной является южная часть дна озера. Для неё характерно развитие слаборасчленённых поверхностей с незначительными относительными превышениями (1 – 3 м) и очень пологими уклонами (менее 0.2°). Срединная часть Ладожского озера представляет собой достаточно плоскую равнину, которая по статистическим характеристикам похожа на прибрежный район. Однако относительные превышения глубин возрастают. Район характеризуется холмисто-грядовыми поверхностями экзарационно-аккумулятивного рельефа.

Осадконакопление на дне Ладожского озера имеет четко проявленный асимметричный характер. В северной части озера отмечается преобладание зон аккумуляции, а в юж-

ной господствуют условия подводного размыва или «нулевой седиментации», что связано с особенностями геологического строения, рельефом дна и особенностями палеогеографического развития Ладоги. Поверхностные отложения Ладожского озера представлены всеми основными гранулометрическими типами от валунов до коллоидных частиц, распределение которых определяется особенностями рельефа Ладожской котловины и характером гидродинамических процессов. Крупность донных отложений уменьшается по мере продвижения к центру водоема, при этом содержание частиц мельче 1000 нм в зонах аккумуляции мельчайших донных отложений может достигать до 30 % от общего состава. Концентрация химических компонентов в донных отложениях возрастает по мере уменьшения размера частиц осадков от песков к алевритам и глинам. Содержания в донных отложениях Ладожского озера большинства микроэлементов, в том числе и тяжелых металлов, низки и не отличаются от фоновых значений. Исключение составляют локальные зоны, находящиеся под прямым воздействием промышленных стоков.

Гидрофизические характеристики Ладожского озера определяются взаимодействием поверхности воды и атмосферы, динамикой втекающих в озеро притоков, а также внутриводоемными процессами. Основными факторами, определяющими уровень режим озера, являются суммарный приток воды по рекам, и сток р.Нева. В период ледостава течения в озере в основном определяются стоком рек. Весной под воздействием ветра и формирующейся термической стратификации система течений имеет сложный характер с тенденцией к формированию генеральной циклонической циркуляции. В летний период стратификация в озере устойчива, поэтому в озере доминируют внутренние волны, струйные течения, а вертикальный обмен ниже слоя скачка ослаблен. Осенний период - это сезон максимальных скоростей ветра, в этот период особое значение приобретают апвеллинги. В прибрежной зоне наибольшие скорости течений приурочены к району устьев рек Свирь, Волхов, Вуокса; здесь же наблюдаются наибольшие пульсации течений. В период нагревания озера во время существования термической фронтальной зоны (термобара) пространственное распределение температуры поверхности воды определяется распределением глубин. При этом гидрофизические и химико-биологические процессы зависят от прохождения термобара. На глубинах ниже 50 метров в период с середины июня по начало октября практически не ощущается влияния межгодовой изменчивости температуры воды. В силу циклонической циркуляции в период развитой стратификации температура воды восточного берега обычно выше температуры воды западного берега. В зимний период ледовый режим Ладожского озера во многом определяет термические и динамические

характеристики на поверхности озера и в его толще. Выявлены основные фазы ледового режима и установлены связи их с температурой воздуха на основе многолетнего ряда дистанционных данных о покрытости льдом поверхности озера, оценены тренды в датах и продолжительности ледовых явлений. Прозрачность воды Ладожского озера является регулятором проникновения света вглубь водной толщи. Сезонный ход прозрачности неоднороден в отдельных районах озера, особенно ярко он выражен в глубоководной части озера с минимумом в августе.

Гидрохимические характеристики Ладожского озера главным образом зависят от внешней (сток с водосбора, атмосферные выпадения, прямые сбросы сточных вод) и внутренней (массообмен с донными отложениями) нагрузки, а также от гидрофизических параметров и взаимодействия с биотой. Доминирующая роль в формировании химического состава воды озера принадлежит речному стоку, который дает свыше 95 % химического баланса озера. Основная водная масса обладает большой гидрохимической инертностью и сравнительной однородностью. Озерная вода характеризуется низкой минерализацией (Σ и 60-65 мг л⁻¹), гидрокарбонатно-кальциевым составом, незначительным превышением содержания сульфатных ионов над хлоридными. Главной чертой кислородного режима озера является высокое содержание растворенного кислорода в течение всего года. С конца 70-х годов прошлого века наблюдается постепенное снижение в воде озера среднегодовой концентрации фосфора, в последние годы она составляет 11-13 мкг Р л⁻¹ для Р_{общ.} и 4-5 мкг Р л⁻¹ для Р_{неорг.}. Среднее содержание общего азота за период с 1976 г. практически не меняется и составляет ~ 640 мкг N л⁻¹. Поступление кремния с речными водами в озеро сохраняется на уровне 60-х годов, при этом средняя концентрация в озере растворенного минерального кремния за последние 50 лет снижалась с 0.90 мг Si л⁻¹ до 0.40-0.50 мг Si л⁻¹, а в период развития диатомовых водорослей в прибрежной зоне может достигать 0.10 мг Si л⁻¹. Специфика геохимических и климатических условий водосборной территории Ладожского бассейна обуславливают значительную обогащенность воды озера растворенным органическим веществом. В химическом составе вод как притоков, так и самого озера, преобладающим среди металлов является железо, концентрации алюминия и марганца заметно ниже, в наименьших концентрациях обнаруживаются медь, кобальт и свинец. В течение последних двух десятилетий наблюдается увеличение содержания нефтяных углеводородов в поверхностном слое воды озера с 9.0 до 88.7 мкг л⁻¹. Выявлена тенденция снижения предельных и среднегодовых концентраций фенолов в воде притоков озера, приведшая к уменьшению их поступления в озеро. По данным последних лет содержание

фенолов в воде озера преобладает на уровне 1-2 ПДК. В открытой части озера повышенное содержание фенолов имеет исключительно вторичное происхождение – это либо продукты жизнедеятельности фитопланктона, либо результат трансформации нефтяных углеводородов, попавших в озеро вследствие судоходства. В зоне экологического риска наиболее часто оказываются бухты Петрокрепость, Волховская губа с прилегающей к ним южной частью акватории озера, а также районы г. Приозерска с устьем р. Бурной (Вуоксы), г. Питкяранты и северных шхер.

Гидробиологические характеристики Ладожского озера определяются действием сложного комплекса природных факторов крупного глубоководного холодноводного водоема, из которых, прежде всего, следует выделить температурный режим, морфологию дна, перепады глубин озера, низкую минерализацию воды, благоприятный кислородный режим и высокую прозрачность воды, а также гидробиологическим режимом притоков.. Высокое биологическое разнообразие флоры и фауны экосистемы Ладоги обусловлено в большой степени значительным разнообразием биотопов и условий существования гидробионтов. Наибольшей мозаичностью местообитаний характеризуется литоральная зона озера, за счет которой во многом формируется общее биоразнообразие водоема. Но и в центральной зоне озера могут быть выделены своеобразные лимнические районы, достаточно обособленные водные массы, формирующиеся за счет особенностей морфологии озерной котловины и специфического температурного режима, и для которых характерны специфические видовые комплексы и ассоциации гидробионтов. Состав и количественное развитие в озере бентосных сообществ, прежде всего, зависит от таких факторов, как состав (гранулометрический и химический) донных отложений, температурный режим, освещенность, гидрологический режим и количество поступающей из верхних слоев водоема органики, а также биологическими инвазиями. Можно отметить, что природные процессы продолжают оставаться определяющими в формировании и функционировании биоценозов озера. Это происходит из-за того, что Ладожское озеро по природе своей обладает высокой устойчивостью к внешним воздействиям. Гомеостаз озерной экосистемы также поддерживается за счет внутренних структурных перестроек сообществ гидробионтов, что в целом приводит к стабильному состоянию озерной биоты. Объединяя данные исследований всех гидробиологических сообществ озера, на основании исследований последних лет, начиная с 2007 г., можно заключить, что трофический статус центральной части акватории озера в целом оценивается как слабomezотрофный (при олиготрофном характере гипolimниона),

северной – как олиготрофный, западной – как мезотрофный, южной части (Свирская и Волховская губы) – как слабоэвтрофный.

Настоящий период развития Ладожского озера характеризуется тем, что эволюция экосистемы приобрела «гистерезисный» характер, а возвращение экосистемы в менее трофное состояние сопровождается формированием новых специфических черт и характеристик основных сообществ водоема, что определяет совершенно новый этап в развитии Ладожского озера. К настоящему времени стабилизировались некоторые важные гидрохимические и гидробиологические показатели (концентрации металлов и фенолов, характеристики фитопланктона и хлорофилла – а). Тем не менее, несмотря на улучшение и стабилизацию многих показателей наблюдается снижение прозрачности, нестабильность численности бактериопланктона, резкие всплески цветения воды в различных участках акватории, внезапное появление токсичных веществ на водозаборах ГУП «Водоканал СПб», возрастание содержания нефтепродуктов и т.д. Содержание многих химических веществ не оценивается в рамках существующей системы мониторинга. К их числу относятся и стойкие органические соединения чрезвычайно вредные для здоровья человека. На основе изложенного можно сделать вывод о неустойчивости кажущегося равновесия в состоянии экосистемы озера.

С помощью методов математического моделирования получены количественные оценки, подтверждающие, что снижение фосфорной нагрузки не может гарантировать снижение продуктивности Ладожского озера. Т.е. снижение антропогенной нагрузки не является универсальным средством возвращения природной среды в естественное состояние или, по крайней мере, к предотвращению её дальнейшей деградации.

В скором времени следует ожидать оживления в развитии промышленности, сельского хозяйства, транспортной инфраструктуры в регионе. Все это требует усиленного внимания к состоянию Ладожского озера, остающегося безальтернативным источником питьевой воды для такого мегаполиса, как Санкт-Петербург. Некоторая стабилизация ситуации в Ладожском озере и его бассейне может быть легко нарушена при усилении существующих или появлении новых антропогенных факторов. В связи с этим особое внимание привлекают обсуждаемые варианты создания в европейской части России различных транспортных систем с выходом к побережью Балтийского моря. Это значительно увеличит транзит через Ладожское озеро грузовых и пассажирских судов, что повлечет за собой увеличение нагрузки на озеро в форме различных загрязнителей, которые традиционно сопровождают судоходство. Возникает необходимость в усилении контроля за состоянием озера и осуществлении постоянно действующего экологического

сопровождения намечаемых и осуществляемых мероприятий для того, чтобы иметь возможность своевременно применять профилактические и чрезвычайные меры по предотвращению негативных изменений в экосистеме озера.

Необходимо отметить, что в вопросах охраны Ладожского озера и его природного потенциала имеются серьезные проблемы. Объясняются они в первую очередь тем, что Ладога поделена между двумя субъектами Российской Федерации: Ленинградской областью и Республикой Карелия, а водосборный бассейн оказывается на территориях Ленинградской, Новгородской, Псковской, Тверской, Вологодской и Архангельской областей, Республики Карелия и частично расположен за границами России: в Финляндии (бассейн озера Сайма) и Белоруссии. Как показано выше, в 70 – 80-х годах прошлого века состоянию экосистемы Ладожского озера был нанесен значительный ущерб из-за несоблюдения в течение десятилетий природоохранного законодательства промышленными, сельскохозяйственными и жилищно-коммунальными предприятиями, судоходными, рыболовецкими и туристическими компаниями, а также иными организациями. В результате в конце 70-х годов по раковым заболеваниям желудочно-кишечного тракта Ленинград вышел на первое место в СССР среди городов с миллионным населением. К настоящему моменту качество воды в большей части озера отвечает требованиям, предъявляемым к источнику централизованного питьевого водоснабжения. Тем не менее, вызывает тревогу отсутствие соответствующего природоохранного регламентирования провозглашенной руководством страны модернизации экономики России, которое может повлечь строительство на водосборе Ладоги новых производств без учета специфики этого озера. Уже сейчас осуществляется строительство завода по выпуску пестицидов, в ближайшее время предполагается ввод в строй предприятий фармацевтической промышленности и nanoиндустрии. Еще один тревожный момент связан со взятым Россией курсом на расширение экспорта водоёмкой продукции, производство которой наносит наибольший вред состоянию водных объектов. На Ладоге подобное уже было в прошлом веке, когда построенные в период индустриализации крупные предприятия целлюлозно-бумажной, химической, нефтехимической, металлургической и других водоемких отраслей привели к упомянутой выше экологической катастрофе 70-80-х годов. Надо быть слишком недалёковидным, чтобы не понимать, к каким катастрофическим последствиям для Ладоги могут привести объявленные снижение роли государства в водном секторе страны и расширение производства водоёмкой продукции.

Чтобы повторно «не наступать на те же грабли», требуется принять специальный Федеральный закон «Об охране Ладожского озера», который не позволит поставить экосистему озера под угрозу деградации. Он должен полностью устранить существующие в природоохранном законодательстве изъяны по отношению к источникам централизованного питьевого водоснабжения, а также ориентировать расположенные на водосборе субъекты РФ на проведение скоординированной политики в вопросах охраны Ладоги. В процессе подготовки этого закона, возможно, потребуются одновременно внести соответствующие изменения и в Водный кодекс РФ 2006 г.

Федеральный закон должен определить генеральное направление в охране Ладожского озера и границы допустимой хозяйственной деятельности на водосборе. Для достижения поставленных Законом стратегических целей потребуются осуществление комплекса целенаправленных мер как на самом озере, так и в его бассейне. Поэтому, кроме федерального закона должна быть одновременно разработана и принята Федеральная целевая программа мер по сохранению Ладожского озера как универсального природного объекта, крупнейшего резервуара и поставщика пресной воды в Европе, имеющего для страны огромное социально-экономическое и геополитическое значение.

Вместе с тем принятие Федерального закона и Федеральной целевой программы мер по сохранению Ладожского озера не тождественно запрету на развитие хозяйственной деятельности на акватории и на водосборе. Более того, учитывая природно-ресурсный и культурно-исторический потенциалы Ладоги и Приладожья, близость Санкт-Петербурга и наличие хорошо развитой транспортной инфраструктуры весьма перспективным представляется здесь создание особой экономической зоны туристско-рекреационного типа «Ладожское ожерелье» за счет средств федерального и регионального бюджетов (Ленинградской области и Республики Карелия), а также частных предпринимателей.

В заключение следует отметить, что к Ладоге – этому важнейшему природному объекту, в стране не уделяется должного внимания. Озеро, водосбор которого находится на территории трёх независимых государств, причем, в России – в 7 административных регионах, по существу является бесхозным. Такое положение приводит к возрастанию антропогенных рисков в обеспечении безопасности водоснабжения населения северо-западного региона Российской Федерации. Если в отношении Байкала, находящегося в более благоприятных политико-административных условиях, еще в 1999 г. был принят «Федеральный закон об охране озера Байкал», то по Ладоге подобного закона до сих пор нет и принятие его недопустимо затягивается, хотя его проект, разработанный при

участии Института озераедения РАН, давно уже был представлен в директивные органы. Для решения этого вопроса, имеющего первостепенное значение не только для данного региона, но и для России в целом, требуются осознание его важности, политическая воля и дальновидность руководителей соответствующего уровня.

ЛИТЕРАТУРА

1. Авинский В.А. Зоопланктон: современное состояние и многолетняя динамика // Ладожское озеро: прошлое, настоящее, будущее / под ред. В.А. Румянцева, В.Г. Дрaбковой. СПб.: Наука, 2002. С. 191–202.
2. Александрова Д.Н., Капустина Л.Л. Бактериопланктон Ладожского озера // Антропогенное эвтрофирование Ладожского озера / под ред. Петровой Н.А. Л.:

Наука, 1982. С. 156–163.

3. Александровский А.Л., Арсланов Х.А., Давыдова Н.Н., Долуханов П.М., Зайцева Г.И., Кирпичников А.Н., Кузнецов Д.Д., Лавенто М., Лудикова А.В., Носов Е.Н., Савельева Л.А., Сапелко Т.В., Субетто Д.А. Новые данные относительно трансгрессии Ладожского озера, образования реки Невы и земледельческого освоения Северо-запада России // Доклады РАН. 2009. Т. 424. № 5. С. 682–687.
4. Алимов А.Ф. Введение в продукционную гидробиологию. Л., 1989. 150 с.
5. Алимов А.Ф., Бульон В.В., Озерцовская Н.Г., Умнова Л.П. Общая характеристика исследованных участков некоторых рек Ленинградской, Калининградской и Московской областей // Методы биологического анализа пресных вод. Л.: АН СССР ЗИН, 1976. С. 5–15.
6. Алимов А.Ф., Тесленко В.А. Структурно-функциональные характеристики речного зообентоса в зоне антропогенных воздействий // Гидробиологический журнал. 1988. Т. 24. № 2. С. 27–31.
7. 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 второй международной научно-практической конференции. СПб.: ЛГУ имени А.С. Пушкина, 2008. С. 312–331.
8. Алхименко А.П. Транспортно-экологические проблемы водной системы «Ладожское озеро — река Нева — Финский залив» // Региональная экология. СПб.: ИПРЭ РАН, 2005. № 1–2 (24). С. 109–119.
9. Алхименко А.П. Транспортно-экологические проблемы водных путей Северо-Запада России // Тезисы докладов 9-й международной конференции «Акватерра», 14–15 июня 2006 г. С. 42–44.
10. 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.
11. Алябина Г.А., Сорокин И.Н. Миграция фосфора и органического вещества в системе «водоем–водосборная площадь» // Экологическая химия. 1997. Т. 6 (3). С. 166–171.
12. Алябина Г.А., Сорокин И.Н. Особенности формирования внешней нагрузки на водные объекты в урбанизированных ландшафтах // Известия Российского Географического общества. 2001. Т. 133 (1). С. 81–87.
13. Амантов А.М. Этапы геологического развития Ладожского озера // Эволюция природных обстановок и современное состояние геосистемы Ладожского озера. СПб.: Издательство Российского Географического общества, 1993. С. 5–13.
14. Андреев А.П. Ладожское озеро. СПб, 1875. 398 с.
15. Андроникова И.Н. Зоопланктон как показатель экологического состояния заливов южного побережья Ладожского озера // Экологическое состояние рыбохозяйственных водоемов бассейна Балтийского моря (в пределах Финского

залива). СПб., 1993. С. 7–8.

16. Андроникова И.Н. Биоразнообразие и количественная оценка литорального зоопланктона // Ладожское озеро: прошлое, настоящее, будущее / под ред. В.А. Румянцева, В.Г. Драбковой. СПб.: Наука, 2002. С. 253–259.
17. Андроникова И.Н. Использование показателей зоопланктона в оценке экологического состояния прибрежной зоны Ладожского озера // Биоиндикация в мониторинге пресноводных экосистем. Сб. матер. II международной конференции. СПб.: Любавич, 2011. С. 168–174.
18. Андроникова И.Н. Многолетний мониторинг зоопланктона Щучьего залива Ладожского озера в условиях интенсивного антропогенного воздействия // Проблемы изучения краевых структур биоценозов. Саратов: Изд-во Сарат. Ун-та, 2008. С. 5–10.
19. Андроникова И.Н. Структурно-функциональная организация зоопланктона озерных экосистем разных трофических типов. СПб: Наука, 1996. 189 с.
20. Андроникова И.Н., Распопов И.М. Зоны экологического риска в прибрежных районах Ладожского озера // Биология внутренних вод. 2007. № 2. С. 3–10.
21. Антропогенное эвтрофирование Ладожского озера / под ред. Петровой Н.А. Л.: Наука, 1982. 304 с.
22. Апухтин Н.М., Краснов И.И. Корреляция опорных стратиграфических разрезов и сводная стратиграфическая схема четвертичных отложений Северо-Запада европейской части СССР // Геология четвертичных отложений Северо-Запада европейской части СССР. Л.: ЛО Недра, 1967. С. 295–317.
23. Астраханцев Г.П., Меншуткин В.В., Петрова Н.А., Руховец Л.А. Моделирование экосистем больших стратифицированных озер. СПб.: Наука, 2002. 363 с.
24. Балахонцев Е.Н. Ботанико-биологические исследования Ладожского озера // Ладожское озеро как источник водоснабжения гор. Санк.-Петербурга. СПб.: Гор. Тип., 1911. С. 171–585.
25. Балахонцев Е.Н. Ботанико-биологические исследования Ладожского озера. СПб., 1909. 410 с.
26. Балушкина Е.В. Применение интегрального показателя для оценки качества вод по структурным характеристикам донных сообществ // Реакция озерных экосистем на изменение биотических и абиотических условий. СПб. Труды ЗИН РАН. Т. 272, 1997. С. 266–292.
27. Балушкина Е.В. Функциональное значение личинок хирономид в континентальных водоемах. Л., 1987. 180 с.
28. Балушкина Е.В., Винберг Г.Г. Зависимость между массой и длиной тела у планктонных животных // Общие основы изучения водных экосистем. Л., 1979. С. 169–172.
29. Балушкина Е.В., Финогенова Н.П., Слепухина Т.Д. Изменение характеристик зообентоса в системе Ладога — р. Нева — Невская губа — Восточная часть Финского залива // Экологическое состояние водоемов и водотоков бассейна реки

Невы. СПб.: Научный центр РАН, 1996. С. 91–130.

30. Барбашова М.А. Использование структурных характеристик макробентоса для оценки качества вод юго-западного района Ладожского озера // Биоиндикация в мониторинге пресноводных экосистем. Сборник материалов международной конференции. СПб.: ЛЕМА, 2007. С. 267–272.
31. Барбашова М.А., Слепухина Т.Д. Макробентос и его многолетняя изменчивость в открытых районах озера // Ладожское озеро: прошлое, настоящее, будущее / под ред. В.А. Румянцева, В.Г. Драбковой. СПб.: Наука, 2002. С. 202–210.
32. Белавская А.П. Водные растения России и сопредельных государств. СПб., 1994. 64 с.
33. Беляков В.П. Зообентос. Состав, структура и количественные показатели // Состояние биоценозов озерно-речной системы Вуоксы / отв. ред. И.С. Трифонова. СПб.: Изд-во НИИ химии СПбГУ, 2004. С. 97–112.
34. Беляков В.П. Состав и структура зообентоса притоков Ладожского озера // Оценка экологического состояния рек бассейна Ладожского озера по гидрохимическим показателям и структуре гидробиоценозов. СПб., 2006. С. 108–113.
35. Берг Л.С. Рыбы пресных вод СССР и сопредельных стран. Часть 3. М.-Л.: Изд. АН СССР, 1949. С. 929–1382.
36. Берлянд Т.Г., Строкина Л.А. Глобальное распределение общего количества облаков Л.: Гидрометеиздат, 1980. 70 с.
37. Берлянт А.М. Образ пространства: карта и информация. М.: Мысль, 1986. 239 с.
38. Бискэ Г.С. (ред.) Ладожское озеро (развитие рельефа и условия формирования четвертичного покрова котловины). Петрозаводск: Карелия, 1978. 205 с.
39. Бискэ Ю.С., Сумарева И.В., Шитов М.В. Хронология ладожской трансгрессии // Фундаментальные проблемы квартера: итоги изучения и основные направления дальнейших исследований. Москва: ГЕОС, 2007. С. 33–36.
40. Бондырева С.В. Перспективы развития водных видов туризма на территории муниципального образования «Приозерский район» Ленинградской области // Проблемы развития водного туризма: Материалы международных научно-практических конференций. СПб.: Балтийский институт туризма, 2005. С. 123–126.
41. Борзенкова И.И. Изменение климата в кайнозое. СПб.: Гидрометеиздат, 1992. 247 с.
42. Боуден К. Физическая океанография прибрежных вод. М.: Мир, 1988. 324 с.
43. Бояринов П.М., Петров М.П. Процессы формирования термического режима глубоких пресноводных водоемов. Л.: Наука, 1991. 178 с.
44. Бульон В.В. Первичная продукция планктона внутренних водоемов. Л., 1983. 150 с.
45. Былинский Е.Н. Объем микулинского межледниковья и проблемы корреляции микулинских морских трансгрессий на севере Европы и черноморском побережье

- Кавказа // Четвертичный период, палеогеография и литология. Кишинев: Штиинца, 1989. С. 32–39.
46. Васильев В.А., Филиппова Н.В. Справочник по органическим удобрениям. М.: Росагропромиздат, 1988. 255 с.
 47. Величко И.М. Экологическая физиология зеленых нитчатых водорослей. Киев, 1982. 198 с.
 48. Винберг Г.Г. Первичная продукция водоемов. Минск, 1960. 329 с.
 49. Винберг Г.Г., Бабицкий В.А., Гаврилов С.И. и др. Биологическая продуктивность озер разного типа // Биопродуктивность озер Белоруссии. Минск, 1971. С. 5–33.
 50. Власова Т.И., Байков Е.А., Брускене Т.В. Региональный туристско-рекреационный комплекс: проблемы и пути совершенствования. СПб: Д.А.Р.К., 2004. 164 с.
 51. Водные ресурсы России и их использование / под ред. И.А. Шикломанова. СПб.: ГГИ, 2008. 600с.
 52. Воронцов П.А. О бризах Ладожского озера. Труды ГГО. 1958. Вып. 73. С. 87–106.
 53. Воронцов Ф.Ф. Волнение на Ладожском озере // Гидрологический режим и водный баланс Ладожского озера. Л.: Изд. Ленинградского университета, 1966. С. 247–264.
 54. Временные методические рекомендации по прогнозированию химического состава поверхностных вод с учетом перераспределения стока. Л.: Гидрометеиздат, 1988. 56 с.
 55. Вудивисс Ф.С. Совместные англо-советские биологические исследования в Ноттингеме в 1977 г. // Научные основы контроля качества поверхностных вод по гидробиологическим показателям. Л., 1981. С. 117–189.
 56. Генкал С.И., Трифонова И.С. Диатомовые водоросли Ладожского озера и водоемов его бассейна. Рыбинск: «Рыбинский Дом печати», 2009. 160 с.
 57. Геологические памятники природы России. М.: Лориен, 1998. 200 с.
 58. Геология четвертичных отложений Северо-Запада Европейской части СССР. Л., 1967. 150 с.
 59. Геоэкология Ладожского озера. СПб: ВНИИ геологии и минеральных ресурсов Мирового океана, 1995. 209 с.
 60. Герд С.В. Биоценозы бентоса больших озер Карелии // Труды Карело-Финского гос. университета. Петрозаводск: Изд. Карело-фин. гос. ун-та, 1949. 197 с.
 61. Герд С.В. Обзор гидробиологических исследований озер Карелии // Тр. Карелофинского отд. ВНИОРХ. 1946. Т. 2. С. 26–139.
 62. Гоби Х. Краткий отчет о поездке совершенной летом 1878 года с альгологической целью // Тр. С.-Петербургского общества естествоиспытателей. Т. 10. СПб., 1879. С. 93–97.

63. Голицын Г.С., Ефимова Л.К., Мохов И.И. и др. Долгопериодные изменения температурного режима и осадков в Санкт-Петербурге по эмпирическим данным и модельные оценки региональных изменений в прошлом и будущем // Метеорология и гидрология. 2000. № 12. С. 5–13.
64. Голицын Г.С., Мелешко В.П., Ефимова Л.К., Мохов И.И., Говоркова В.А., Сомова Н.Г., Хон В.Ч. Анализ составляющих водного и теплового балансов на водосборе Ладожского озера, рассчитанных по моделям общей циркуляции атмосферы // Известия РАН. Сер. Физика атмосферы и океана. 2000. Т. 36. № 4. С. 435–445.
65. Горелова Э.М., Кириллова В.А., Распопов И.М. Ладога. Л.: Лениздат, 1974. 140 с.
66. Грибушин А.И. Карелия: загадочная красота Русского Севера // Туристский справочник. Петрозаводск, 2002. 198 с.
67. Гричук В. Палеогеография Северной Европы в позднем плейстоцене // Последний европейский ледниковый покров. М.: Наука, 1965. С. 164–175.
68. Гузиватый В.В., Каретников С.Г., Науменко М.А. Опыт создания и использования банка термических данных Ладожского озера // География и природные ресурсы. 1998. № 3. С. 89–96.
69. Гурвич Л.И. Материалы по сырьевой базе рыбной промышленности СССР. Москва: Наркомрыбпром, 1945. 247 с.
70. Гусаков Б.Л. Критическая концентрация фосфора в озерном притоке и ее связь с трофическим уровнем водоема // Элементы круговорота фосфора в водоемах. Л., 1987. С. 7–17.
71. Гусаков Б.Л., Тержевик Ф.Ю. Лимническое районирование и особенности озерных процессов в лимнических зонах // Ладожское озеро: критерии состояния экосистемы / под. ред. Н. А. Петровой, А. Ю. Тержевика. СПб., 1992. С. 21–26.
72. Давыдов Л.К. Гидрография СССР. Т. 2. Л.: Изд-во ЛГУ, 1955. 600с.
73. Давыдова Н.Н. Диатомовые водоросли — индикаторы природных условий водоемов в голоцене. Л.: Наука, 1985. 244 с.
74. Давыдова Н.Н. Опыт районирования поверхностных донных осадков Ладожского озера по составу диатомового комплекса // Известия ВГО. 1961. Т. 93. № 3. С. 211–233.
75. Давыдова Н.Н., Краснов И.И., Рыбалко А.Е., Спиридонова М.А., Субетто Д.А. История Ладожского озера по материалам изучения его донных отложений // История современных озер. Л.: Наука, 1986. С. 29–37.
76. Давыдова Н.Н., Петрова Н.А. Эколого-систематическая характеристика водорослей Ладожского озера // Растительные ресурсы Ладожского озера. Л.: Наука, 1968. С. 175–199.
77. Давыдова Н.Н., Рыбалко А.Е., Спиридонов М.А., Субетто Д.А. Новые данные по стратиграфии донных отложений Ладожского озера // Тезисы докл. совещания в Таллинне. Таллинн, 1968. С. 24–27. (Изучение озерно-болотных формаций в целях палеогеографических реконструкций. Таллинн, 1986. С. 24-30)

78. Давыдова Н.Н., Субетто Д.А., Хомутова В.И. Позднеледниковый этап развития малых озер Северо-Запада России // История плейстоценовых озер Восточно-Европейской равнины. СПб.: Наука, 1998. С. 166–193.
79. Даринский А.В. Ленинградская область. Л.: Лениздат, 1975. 384 с.
80. Даринский А.В. Невский край. СПб.: Фирма “Глагол”, 2000. 256 с.
81. Деньгина Р.С., Соколова М.Ф. О видовом составе зоопланктона Ладожского озера // Биологические ресурсы Ладожского озера (зоология). Л., 1968. С. 117–129.
82. Дмитренко Ю.С. О промысле палии в Ладожском озере // Научно-технический бюллетень ГосНИОРХ. 1960. № 12. С. 25–27.
83. Догановский А.М. Уровенный режим Ладожского озера — показатель изменения климата: Материалы итоговой сессии учен. совета. Ч. 1. Секция метеорологии и гидрологии. СПб., 2003. С. 76–78.
84. Догановский А.М., Мякишева Н.В. Уровень Ладожского озера в различных диапазонах частот // Ладожское озеро / под ред. Н.Н. Филатова. Петрозаводск, 2000. С. 352–358.
85. Долотов Ю.С. Динамические обстановки прибрежно-морского рельефообразования и осадконакопления. М.: Наука, 1989. 270 с.
86. Домрачев П.Ф., Правдин И.Ф. Рыбы озера Ильменя и реки Волхова и их хозяйственное значение // Материалы по исследованию реки Волхова и его бассейна. Ленинград. 1926. Вып. 10, первый полутом. Исследования рыбных промыслов оз. Ильмень и р. Волхова. Ч. 2. С. 1–294.
87. Драбкова В.Г. Зональное изменение интенсивности микробиологических процессов в озерах. Л.: Наука, 1981. 212 с.
88. Драбкова В.Г. Региональная характеристика распределения микрофлоры в типовых водоемах карельского перешейка и южной Карелии. Автореф. канд. дисс. Л., 1976. 17 с.
89. Драбкова В.Г. Современное состояние и экологические проблемы Ладожского озера // Ладожскому озеру — надежную защиту. СПб.: ИНОЗ РАН, 2009. С. 50–62.
90. Драбкова В.Г., Капустина Л.Л., Летанская Г.И. Процессы самоочищения в Ладожском озере на различных стадиях антропогенного воздействия // Труды Международной конференции «Водная экология на заре XXI века», посвященная столетию со дня рождения профессора Г.Г. Винберга. СПб., 2005.
91. Драбкова В.Г., Страшкрабова В., Фукса И. Гетеротрофное усвоение глюкозы бактериопланктоном озер разного типа // Микробиология. 1990. Т. 59. № 6. С. 1112–1117.
92. Драчев С.М. Борьба с загрязнением рек, озер и водохранилищ промышленными и бытовыми стоками. М.-Л.: Наука, 1964. 272 с.
93. Ежегодник качества поверхностных вод суши по гидробиологическим показателям на территории деятельности СЗУГКС в 1986 году. Л., 1987. 90 с.

94. Ежегодник качества поверхностных вод суши по гидробиологическим показателям на территории деятельности СЗУГКС в 1987 году. Л., 1988. 130 с.
95. Ефремова Т. В., Пальшин Н.И. Сроки ледовых явлений на водоемах северо-запада России // Метеорология и гидрология. № 8. С. 89–98.
96. Жакова Л.В. Структурные особенности зарослей тростника обыкновенного *Phragmites australis* (Cav.) Trin. ex Steud. в Невской губе Финского залива и в Ладожском озере // Закономерности гидробиологического режима водоемов разного типа. М.: Научный мир, 2004. С. 175–179.
97. Заповедная природа Карельского перешейка. СПб.: АНО НПО «Профессионал», 2004. 312 с.
98. Заповедники СССР. Заповедники европейской части РСФСР. Ч. 1. М.: Мысль, 1988. 287 с.
99. Зинченко Т.Д. Биоиндикация природных и техногенных гидросистем Волжского бассейна, на примере хирономид (Diptera: Chironomidae). Автореф. дисс. докт. биол. наук. Тольятти, 2004. 38 с.
100. Знаменская О.М., Фаустова М.А., Чеботарева Н.С. Ладожский ледниковый поток // Структура и динамика последнего ледникового покрова Европы. М.: Наука, 1977. С. 54–66.
101. Иванова З.М., Кириллова В.А. Расчет речного притока в Ладожское озеро и сток реки Невы // Гидрологический режим и водный баланс Ладожского озера. Л.: Изд-во ЛГУ, 1966. С. 119–132.
102. Изменчивость гидрофизических полей в озерах. Л.: Наука, 1978. 280 с.
103. Иоффе Ц.И. Донная фауна крупных озер Балтийского бассейна и ее рыбохозяйственное значение // Известия ВНИОРХ. 1948. Вып. 2. С. 89–144.
104. Исаченко А.Г., Самарский М.В. Разработка ландшафтно-динамической основы геоинформационной системы Приладожья // География и современность. СПб.: Изд-во СПб ГУ, 1992. С. 46–65.
105. Исаченко А.Г., Дашкевич З.В., Карнаухова Е.В. Физико-географическое районирование Северо- Запада СССР. Л.: Изд-во ЛГУ, 1965. 248 с.
106. История Ладожского, Онежского, Псковско-Чудского озер, Байкала и Ханки / под ред. А.Ф.Трешникова. Л.: Наука, 1990. 280 с.
107. Калесник С.В. Ладожское озеро // Л.: Гидрометеиздат, 1968. 159с.
108. Капустина Л.Л. Особенности пространственно-временного распределения и функциональные характеристики бактериопланктона // Ладожское озеро: критерии состояния экосистемы / под. ред. Н. А. Петровой, А. Ю. Тержевика. СПб., 1992. С. 146-178.
109. Капустина Л.Л., Каурова З.Г. Современные тенденции развития бактериопланктона // Ладожское озеро: прошлое, настоящее, будущее / под ред. В.А. Румянцева, В.Г. Дробковой. СПб.: Наука, 2002. С. 180–191.

110. Капустина Л.Л., Макарецва Е.С., Трифонова И.С. Исследование состояния планктонных организмов в водах верхнего и нижнего бьефов ГЭС, расположенных на р. Вуоксе // Водные ресурсы. 1994. Т. 21. № 1. С. 51–58.
111. Квасов Д.Д. Позднеледниковая история озерной котловины // История Ладожского, Онежского, Псковско-Чудского озер, Байкала и Ханки. Л.: ЛО Наука, 1990. С. 19–21.
112. Кириллова В.А., Малинина Т.И. Речной сток и водный баланс озера // Антропогенное эвтрофирование Ладожского озера / под ред. Петровой Н.А. Л.: Наука, 1982. С. 31–39.
113. Кириллова В.А. Водный приток // Современное состояние экосистемы Ладожского озера. Л.: Наука, 1987. С. 23–27.
114. Китаев С.П. Экологические основы биопродуктивности озер разных природных зон. М., 1984. 207 с.
115. Китаев С.П., Стерлигова О.П. О зоогеографии рыб пресных водоемов Финноскандии // Тр. Кар. НЦ РАН. 2001. Вып. 2. С. 167–174.
116. Козлова Г.И. Растительность и геоботанические районы // Природное районирование Новгородской области. Л., 1978. С. 156–191.
117. Комулайнен С.Ф. Использование фитоперифитона при диагностике состояния речных экосистем // Биоиндикация в мониторинге пресноводных экосистем. СПб., 2007. С. 124–128.
118. Комулайнен С.Ф. Перифитон рек Ленинградской, Мурманской областей и республики Карелия. Петрозаводск, 1996. 38 с.
119. Комулайнен С.Ф. Экология фитоперифитона малых рек Восточной Финноскандии. Петрозаводск, 2004. 181с.
120. Кондратьев С.А. Оценка биогенной нагрузки на Финский залив Балтийского моря с российской части водосбора // Водные ресурсы. 2011. Т. 38. №1. С. 1–9.
121. Кондратьев С.А. Формирование внешней нагрузки на водоемы: проблемы моделирования. СПб.: Наука, 2007. 253 с.
122. Кондратьев С.А., Алябина Г.А., Сорокин И.Н. Метод оценки природной составляющей внешней нагрузки органическим веществом и биогенными элементами на водоемы Северо-Запада России // География и природные ресурсы. 2010. № 4. С. 130–136.
123. Кондратьев С.А., Голосов С.Д., Зверев И.С., Рябченко В.А., Дворников А.Ю. Моделирование абиотических процессов в системе водосбор-водоем (на примере Чудско-Псковского озера). СПб.: Изд-во «Нестор-История», 2010. 116 с.
124. Кондратьев С.А., Ефимова Л.К., Маркова Е.Г. Оценка изменений гидрологического режима на водосборе и притока в озеро при изменениях климата // Ладожское озеро: прошлое, настоящее, будущее / под ред. В.А. Румянцева, В.Г. Дробковой. СПб.: Наука, 2002. С. 283–291.

125. Кондратьев С.А., Ефремова Л.В., Расплетина Г.Ф., Черных О.А., Веселова М.Ф., Кулибаба В.В., Свистов П.Ф. Оценка внешней нагрузки на Ладожское озеро // Экологическая химия. 1997. Т. 6 (2). С. 73–84.
126. Кондратьев С.А., Шмакова М.В. Изучение формирования стока с речных водосборов методами математического моделирования (на примере бассейна Ладожского озера) // Труды XII съезда РГО. Т. 6. СПб.: Наука, 2005. С. 99–104.
127. Копылов А.И., Косолапов Д.Б. Микробиологические индикаторы эвтрофирования пресных водоемов // Биоиндикация в мониторинге пресноводных экосистем. СПб.: ЛЕМА, 2007. С. 176–181.
128. Коркишко Н.Н., Кулиш Т.П., Петрова Т.Н., Черных О.А. Органическое вещество воды Ладожского озера // Ладожское озеро. Мониторинг исследования современного состояния и проблемы управления Ладожским озером и другими большими озерами. Петрозаводск, 2000. С. 105–110.
129. Костикова Л.Е. Фитоперифитон и его продуктивность // Мониторинг фитопланктона. Новосибирск, 1992. С. 68–72.
130. Костикова Л.Е. Особенности состава и развития перифитона высших водных растений днепровских водохранилищ // Гидробиологический журнал. 1980. Т. 16. № 5. С. 127–128.
131. Кравчишина М.Д. Взвешенное вещество Белого моря и его гранулометрический состав. М.: Научный мир, 2009. 264 с.
132. Красная книга Карелии. Петрозаводск: Карелия, 1995. 286 с.
133. Красная книга природы Ленинградской области. СПб.: Мир и Семья, 2002. 479 с.
134. Красная книга природы Ленинградской области. Том I. Особо охраняемые природные территории. СПб.: Акционер и К^о, 1999. 352 с.
135. Красная книга Российской Федерации (животные). М.: АСТ Астрель, 2001. 862 с.
136. Краснов И.И., Арсланов Х.А., Казарцева Т.И., Тертычная Т.В., Чернов С.Б., Плешивцева Э.С. Опорный разрез верхнеплейстоценовых отложений в Приневской низменности в карьере Келково // Регион. геология и металлогения. 1995. № 4. С. 88–99.
137. Крючков А.М. Влияние динамики вод на формирование водной массы р. Невы // Современное состояние экосистемы Ладожского озера. Л., 1987. С. 180–186.
138. Крючков А.М. Электропроводность воды // Антропогенное эвтрофирование Ладожского озера / под ред. Петровой Н.А. Л.: Наука, 1982. С. 57–61.
139. Крючков А.М. Электропроводность воды как показатель степени антропогенного воздействия на экосистему // Ладожское озеро: критерии состояния экосистемы / под ред. Н. А. Петровой, А. Ю. Тержевика. СПб., 1992. С. 60–67.
140. Крючков А.М., Удельная электрическая проводимость Ладожского озера // Ладожское озеро. Атлас. СПб.: ИНОЗ РАН, 2002. С. 82–83.

141. Кудерский Л.А. Динамика рыбопродукционного потенциала Ладожского озера // VII съезд Гидробиологического общества РАН. Материалы съезда. Т 2. Казань, 1996. С. 199–200.
142. Кудерский Л.А. Долгопериодные изменения уловов рыбы в восточной части Финского залива как отражение их динамики в Балтийском море в целом // Материалы региональной научной конференции «Экологическая школа в г. Петергофе – Наукограде Российской Федерации: проблемы национального сектора Балтийского региона и пути их решения». СПб.: БИН С-Пб ГУ, 2007. С. 145–156.
143. Кудерский Л.А. История озера по данным об ихтиофауне // История Ладожского, Онежского, Псковско-Чудского озер, Байкала и Ханки. Л.: Наука, 1990. С.63–65.
144. Кудерский Л.А. История формирования ихтиофауны больших озер бассейна Финского залива // Охрана и рациональное использование водных ресурсов Ладожского озера и других больших озер. СПб.: ИНОЗ РАН, 2003. С. 468–474.
145. Кудерский Л.А. Осетровые рыбы в бассейнах Онежского и Ладожского озер // Сборник научных трудов ГосНИОРХ. 1983. Вып. 205. С. 128–149.
146. Кудерский Л.А. Плейстоценовый этап формирования ихтиофауны Ладожского озера // История плейстоценовых озер Восточно-Европейской равнины. СПб.: Наука, 1998. С. 140–147.
147. Кудерский Л.А. Пути формирования ихтиофауны Ладожского озера // Общество, среда, развитие. 2007. № 3 (4). С. 102–110.
148. Кудерский Л.А. Роль ихтиологических данных в изучении путей формирования водных систем Северо-Запада и Севера европейской части СССР // Сборник научных трудов ГосНИОРХ. 1987. Вып. 264. С. 147–156.
149. Кудерский Л.А. Состав и промысловое значение рыбного населения Ладожского озера // Сборник научных трудов ГосНИОРХ. 2009а. Вып. 334. С. 138-212
150. Кудерский Л.А. Состояние рыбных ресурсов Ладожского озера // Ладожскому озеру — надежную защиту. Санкт-Петербург: ИНОЗ РАН. 2009б. С. 73–85.
151. Кудерский Л.А. Состояние рыбных ресурсов Ладожского озера, р. Невы и восточной части Финского залива // Экологическое состояние водоемов и водотоков бассейна реки Невы. СПб., 1996а. С. 131–154.
152. Кудерский Л.А. Специфика динамики численности рыб в больших озерах и равнинных водохранилищах // Теория формирования численности и рационального использования стад промысловых рыб. М.: Наука, 1985. С. 137–157.
153. Кузнецов С. И. Микрофлора озер и ее геохимическая деятельность. М.: Наука, 1970. 230 с.
154. Кузнецов С.И., Дубинина Г.А. Методы изучения водных микроорганизмов. М.: Наука, 1989. 285 с.
155. Кулиш Т.П. Гидрохимические исследования системы органического углерода озерной воды // Ладожское озеро: прошлое, настоящее, будущее / под ред. В.А. Румянцева, В.Г. Драбковой. СПб.: Наука, 2002. С. 107–111.

156. Курашов Е.А. Мейобентос озера Констанц: количественное развитие и распределение по глубине // Биология внутренних вод. 2004. № 3. С. 72–83.
157. Курашов Е.А. Мейобентос как компонент озерной экосистемы. СПб.: «Алга-Фонд», 1994. 224 с.
158. Курашов Е.А. Мейобентос озерных экосистем: экология и реакция на антропогенные воздействия. Автореф. дисс. на соискание ученой степени доктора биологических наук. СПб. 1997. 52 с.
159. Курашов Е.А. Мейобентос профундали и закономерности его изменения // Ладожское озеро: прошлое, настоящее, будущее / под ред. В.А. Румянцева, В.Г. Дрabbковой. СПб.: Наука, 2002. С. 211–224.
160. Курашов Е.А., Авинский В.А., Летанская Г.И., Капустина Л.Л., Барбашова М.А. Современное состояние экосистемы Ладожского озера // VI Всероссийский гидрологический съезд, 28 сентября – 1 октября 2004 г., Санкт-Петербург. Тезисы докладов. Секция 4. Экологическое состояние водных объектов. Качество вод и научные основы их охраны. СПб.: Гидрометеиздат, 2004. С. 206–207.
161. Курочкина А.А. Характеристика донных отложений и особенности их стратификации, связанные с процессом эвтрофирования // Антропогенное эвтрофирование Ладожского озера / под ред. Петровой Н.А. Л.: Наука, 1982. С. 191–201.
162. Ладожское озеро: критерии состояния экосистемы / под ред. Н. А. Петровой, А. Ю. Тержевика. СПб., 1992. 328 с.
163. Ладожское озеро: прошлое, настоящее, будущее / под ред. В.А. Румянцева, В.Г. Дрabbковой. СПб.: Наука, 2002. 328 с.
164. Ладожское озеро. Атлас. СПб.: ГУНИО., 2002. 130 с.
165. Ладожское озеро. Атлас. СПб.: ИНОЗ РАН, 2002. 128 с.
166. Ладожское озеро. Мониторинг, исследование современного состояния и проблемы управления Ладожским озером и другими большими озерами. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2000. 490 с.
167. Лапин И.А., Красюков В.Н. Роль гуминовых веществ в процессах комплексообразования и миграции металлов в природных водах // Водные ресурсы. 1986. №1. С.134–135.
168. Лебедев В.В., Медрес П.Л. Ледовый режим Ладожского озера по материалам авиаразведок. Сборник работ ГМО. Вып. 3. Л., 1966, С. 135–182.
169. Леонов А.Г., Тесля А.Я. Рыбные ресурсы Ладожского озера и их использование в начале XXI века // Сб. научн. трудов ГосНИОРХ. 2009. Вып. 334. С. 121–137.
170. Летанская Г.И. Современное состояние фитопланктона и тенденции его изменения в период летней стратификации озера // Ладожское озеро: прошлое, настоящее, будущее / под ред. В.А. Румянцева, В.Г. Дрabbковой. СПб.: Наука, 2002. С. 165–175.

171. Летанская Г.И. Фитопланктон и его продукция // Эколого-продукционные особенности озер различных ландшафтов Южного Урала. Л., 1978. С. 81–106.
172. Летанская Г.И. Фитопланктон и первичная продукция озер Кольского полуострова // Озера различных ландшафтов Кольского полуострова. Л., 1974. С. 78–119.
173. Летанская Г.И., Распопов И.М., Рычкова М.А. Продуктивность автотрофных сообществ мелководных заливов // Современное состояние экосистемы Ладожского озера. Л.: Наука, 1987. С. 111–116.
174. Летанская Г.И. Мониторинг фитопланктона Ладожского озера // Ладожское озеро. Мониторинг исследования современного состояния и проблемы управления Ладожским озером и другими большими озерами. Петрозаводск, 2000. С. 168–178.
175. Летанская Г.И. Оценка первичной продукции и деструкции органического вещества планктоном Ладожского озера в период летней стратификации (1993–2001 гг.) // Первичная продукция водных экосистем. Материалы международной конференции. Ярославль, 2004. С. 58–59.
176. Летанская Г.И. Структурно-функциональные показатели фитопланктона Ладожского озера в современных условиях // Автореферат диссертации на соискание ученой степени к. б. н. СПб., 2002. 26 с.
177. Летанская Г.И., Протопопова Е.В. Осенний мониторинг фитопланктона Ладожского озера (1992–2002 гг.) // Озерные экосистемы: биологические процессы, антропогенная трансформация, качество воды. Материалы II Международной научной конференции 22–26 сентября 2003 г., Минск – Нарочь. Минск, 2003. С. 299–301.
178. Лисицын А.П. Осадкообразование в океанах. М.: Наука, 1974. 438 с.
179. Лисицына Л.И., Папченков В.Г. Флора водоемов России. Определитель сосудистых растений. М.: Наука, 2000. 237 с.
180. Лисицына Л.И., Папченков В.Г., Артеменко В.И. Флора водоемов Волжского бассейна. Определитель сосудистых растений. М.: Товарищество научных изданий КМК, 2009. 219 с.
181. Лозовик П.А., Потапова И.Ю. Поступление химических веществ с атмосферными осадками на территорию Карелии // Водные ресурсы. 2006. № 33 (1). С. 111–118.
182. Лузанская Д.И. Рыбохозяйственное использование внутренних водоемов СССР. Справочник. М.: Пищ. пром., 1965. 597 с.
183. Лузанская Д.И., Савина Н.О. Рыбохозяйственный водный фонд и уловы рыбы во внутренних водоемах СССР. Справочник. М.-Л.: ВНИОРХ, 1956. 514 с.
184. Макрушин А.В. Библиографический указатель по теме «Биологический анализ качества вод» с приложением списка организмов-индикаторов загрязнения. Л., 1994. 53 с.
185. Макрушин А.В. Биологический анализ качества вод. Л., 1974. 60 с.

186. Малинина Т.И. Водный баланс Ладожского озера // Гидрологический режим и водный баланс Ладожского озера. Л.: Изд. ЛГУ, 1966. С. 182–203.
187. Медведев П.П., Реут О.Ч. Архитектурно-природная среда и рекреационные ресурсы Северного Приладожья // Региональная экология, 1996. № 3–4. С. 47–52.
188. Медрес П.Л. Ледовый режим Ладожского озера по материалам авиаразведок // Труды ГГИ. Вып. 66. Л.: Гидрометеиздат, 1957. С. 92–140.
189. Менжулин Г.В., Тетеревков И.А. Анализ антропогенной компоненты термического режима приземного воздуха в мегаполисах, основанный на процедуре пространственной интерполяции и расчетах по моделям изменений глобального климата // Материалы Всероссийской конференции «Современные проблемы климатологии», посвященной 100-летию профессора О.А. Дроздова. СПб., 20–22 октября 2009 г. СПб.: Изд-во ВВМ-СПбГУ, 2009. С.107–109.
190. Менжулин Г.В., Тетеревков И.А. Выявление антропогенной компоненты термического режима приземного воздуха мегаполисов // Материалы Всероссийской конференции «Нерешенные проблемы глобальной климатологии», посвященной 90-летию академика М.И. Будыко. СПб., 10–11 июня 2010 г. СПб.: Изд-во ВВМ-СПбГУ, 2010. С. 54–56.
191. Меншуткин В.В., Слепухина Т.Д., Меншуткина М.В., Суворова Т.П. Пространственная неоднородность распределения макрозообентоса // Современное состояние экосистемы Ладожского озера. Л., 1987. С. 126–136.
192. Методические рекомендации по сбору и обработке материалов при гидробиологических исследованиях на пресных водоемах. Фитопланктон и его продукция. Л.: ЗИН, 1981. 32 с.
193. Методы изучения гидрологического режима водных объектов. Л.: Гидрометеиздат, 1982. 392 с.
194. Моисеенко Т.И. Теоретические основы нормирования антропогенных нагрузок на водоемы Субарктики. Апатиты: Изд. ИППЭ Севера, 1997. 261 с.
195. Молчанов И.В. Ладожское озеро. Л.-М.: Гидрометеиздат, 1945. 552 с.
196. Науменко М.А., Каретников С.Г. Ладожское озеро и его водосбор: цифровая модель и новые результаты // Труды XII съезда РГО. 2005. Т. 6. С. 82–86.
197. Науменко М.А., Каретников С.Г., Гузиватый В.В. Пространственно-временная термическая дифференциация вод Ладожского озера // Доклады РАН. 2000. Т. 373. № 2. С. 247–250.
198. Науменко М.А., Гузиватый В.В. Климатические вариации температурного режима Ладожского озера для периода открытой воды // Региональная экология. 2010. № 3 (29). С.104–108.
199. Науменко М.А. Горизонтальные градиенты температуры в термической фронтальной зоне крупного пресноводного озера // Метеорология и гидрология. 1989. № 6. С. 89–92.
200. Науменко М.А. Новое определение морфометрических характеристик Ладожского

- озера // Доклады Академии Наук. 1995. Т. 345. № 4. С. 514–517.
201. Науменко М.А. Новое определение морфометрических характеристик Онежского озера // Доклады РАН. 2000. Т. 370. № 3. С. 393–396.
 202. Науменко М.А. Сравнительный анализ морфометрических характеристик Ладожского и Онежского озёр // Ладожское озеро / под ред. Н.Н. Филатова. Петрозаводск, 2000. С. 319–324.
 203. Науменко М.А., Гузиватый В.В., Каретников С.Г., Петрова Т.Н., Протопопова Е.В., Крючков А.М. Натурный эксперимент «Термический фронт-Ладога-2010» // Доклады РАН. 2012. Вып. 444. № 1. С. 83–87.
 204. Науменко М.А., Гузиватый В.В., Каретников С.Г. О климатических трендах температуры поверхности воды Ладожского озера в безлёдный период // Доклады РАН. 2006. Т. 408. № 5. С. 675–678.
 205. Науменко М.А., Каретников С.Г. Ладожское озеро и его водосбор: цифровая модель и новые результаты // Труды XII съезда Русского географического общества. 2005. Т. 6. С. 82–86.
 206. Науменко М.А., Каретников С.Г. Морфометрия и особенности гидрологического режима Ладожского озера // Ладожское озеро: прошлое, настоящее, будущее / под ред. В.А. Румянцева, В.Г. Драбковой. СПб.: Наука, 2002. С.16–49.
 207. Науменко М.А., Каретников С.Г. Сезонная эволюция пространственного распределения температуры поверхности воды Ладожского озера в связи с его морфометрией // Доклады РАН. 2002. Т. 386. № 2. С. 250–253.
 208. Науменко М.А., Каретников С.Г., Догановский А.М., Иванова Ю.А. Новое определение топографических характеристик водосбора Ладожского озера // Труды IV Межд. симпозиума по Ладожскому озеру «Охрана и рациональное использование водных ресурсов Ладожского озера и других больших озёр». СПб., 2003. С. 412–415.
 209. Науменко М.А., Каретников С.Г. Использование ИК-спутниковой информации для изучения термического состояния Ладожского озера // Исследование Земли из космоса. 1993. № 4. С. 69–78.
 210. Нежиховский Р.А. Изменения гидрометеорологического режима Ладожского озера, р. Невы и Невской губы // Межзональное перераспределение водных ресурсов Л.: Гидрометеиздат, 1980. С. 133–151.
 211. Огородникова В.А. Характеристика видовой структуры и функционирование сообщества зоопланктона южной части Ладожского озера в многолетнем аспекте // Сб. науч. тр. ГосНИОРХ. 1995. Вып. 314. С. 192–230.
 212. Озерецковский Н. Путешествие академика Н. Озерецковского по озерам Ладожскому, Онежскому и вокруг Ильменя. Второе издание. Санкт-Петербург, 1812. 559 с.
 213. Оксий О.П., Жукинский В.Н., Брагинский Л.П., Линник П.Н., Кузьменко М.И., Кленус В.Г. Комплексная экологическая классификация качества поверхностных вод суши // Гидробиол. журн. 1993. Т. 29. № 4. С. 62–76.

214. Опекунов А.Ю. Экологическое нормирование. СПб, 2001. 216 с.
215. Орлов В.Г. Водные ресурсы рек Сев.-Зап. региона России // Вопросы экологии и гидрологические расчёты. Вып. 116. РГМИ, 1994. С. 30–34.
216. Основные показатели агропромышленного и рыбохозяйственного комплекса Ленинградской области в 2007 г. СПб.: Комитет по агропромышленному и рыбохозяйственному комплексу Ленинградской области, 2000. 28 с.
217. Охалкин А.Г. Структура и сукцессия фитопланктона при зарегулировании речного стока (на примере р. Волги и ее притоков). Автореф. дисс. на соискание ученой степени докт. биол. наук. Нижний Новгород, 1997. 46 с.
218. Охлопкова А.Н. Исследование течений Ладожского озера с использованием динамического метода // Океанология. Т.1. 1961. С. 1025–1033.
219. Охлопкова А.Н. Течения Ладожского озера // Гидрологический режим и водный баланс Ладожского озера. Л., 1966. С. 265–278.
220. Оценка экологического состояния рек бассейна Ладожского озера по гидрохимическим показателям и структуре гидробиоценозов / отв. ред. И.С. Трифонова. СПб.: Изд-во «Лемма», 2006. 130 с.
221. Почвы Ленинградской области / под ред. В.К. Пестрякова. Л.: Лениздат, 1973. 343 с.
222. Природное районирование Новгородской области / под ред. Н.В. Разумихина. Л.: Изд-во ЛГУ, 1978. 245с.
223. Панов Н.И., Чибинёв А.М. Проблемы развития туристского потенциала Ленинградской области: методология, экономика, инвестиции. СПб.: СПбГУ, 2004. 128 с.
224. Папченков В.Г. Растительный покров водоемов и водотоков Среднего Поволжья. Ярославль: ЦМП МУБиНТ, 2001. 200 с.
225. Петрова Н.А. Сукцессии фитопланктона при антропогенном эвтрофирование больших озер. Ленинград: Наука, 1990. 198 с.
226. Петрова Н.А. Фитопланктон и рост его продуктивности в процессе антропогенного эвтрофирования озера. 1. Уровень количественного развития и флористический состав // Антропогенное эвтрофирование Ладожского озера / под ред. Петровой Н.А. Л.: Наука, 1982. С. 124–130.
227. Петрова Н.А. Фитопланктон Ладожского озера // Растительные ресурсы Ладожского озера. Л.: Изд-во ЛГУ, 1968. С. 74–119.
228. Петрова Н.А., Антонов С.Е., Протопопова Е.В. Структурные и функциональные характеристики фитопланктона // Ладожское озеро: критерии состояния экосистемы / под. ред. Н. А. Петровой, А. Ю. Тержевика. СПб., 1992. С. 119-145.
229. Петрова Н.А., Иофина И.В., Капустина Л.Л., Кулиш Т.П., Петрова Т.Н., Расплетина Г.Ф. Антропогенное эвтрофирование Ладожского озера (Этапы трансформации экосистемы, 1975–2004) // Экологическая химия. 2005. Т. 14. С. 209–234.

230. Плешивцева Э.С., Гаркуша В.И., Горшкова С.С. Микулинские озера в междуречье Паши и Ояти (Ленинградская область) // История плейстоценовых озер Восточно-Европейской равнины. СПб.: Наука, 1998. С. 111–114.
231. Подводные ландшафты Байкала / под ред. К.М. Петрова. Новосибирск: Наука, 1990. 182 с.
232. Поддубный С.А., Бычкова М.Б., Ляшенко Г.Ф. Районирование прибрежной зоны верхневолжских водохранилищ по комплексу признаков // Водные ресурсы. 1998. Т. 25. № 5. С. 541–552.
233. Подушка С.Б. Поимка атлантического осетра *Acipenser sturio* в Ладожском озере // Научно-технич. бюлл. лаборат. ихтиол. ИНЭНКО. Санкт-Петербург. 1999. № 1. С. 5–10.
234. Положение об осуществлении государственного мониторинга водных объектов. Утверждено постановлением Правительства РФ от 10.04.2007. № 219. 6 с.
235. Правдин И.Ф. Ладожское озеро и перспективы его рыбного хозяйства // Рыбное хозяйство Карело-Финской ССР. 1947. Вып. 6. С. 109–139.
236. Прибрежно-водные экотоны больших озер / под ред. И.М. Распопова. СПб., 1998. 54 с.
237. Приймайченко А.Д. Фитопланктон и первичная продукция Днепра и Днепровских водохранилищ. Киев: Наук. думка, 1981. 278 с.
238. Природные парки в территориальной организации Южной Карелии // Сб. научных трудов. СПб.: РГО, 1995. 147 с.
239. Прыткова М.Я., Виноградова О.М. Районирование бассейна Ладожского озера по условиям формирования годового стока рек // География и природные ресурсы. 2007. № 1. С. 76–83.
240. Прыткова М.Я., Воронцова Н.К., Котрехов Е.П. Водные ресурсы рек Карельского перешейка. //Изд-во РГО. 2000. т. 132. вып.3. с 48-56.
241. Пырина И.Л., Трифонова И.С. Исследования продуктивности фитопланктона Ладожского озера // Гидробиол. журн. 1979. Т. 15. № 4. С. 26–31.
242. Раскина Е. Е. Фитопланктон и обрастания реки Невы и притоков // Загрязнение и самоочищение реки Невы. Л.: Наука, 1968. С. 168–192.
243. Расплетина Г.Ф. Особенности гидрохимии Ладожского озера в условиях антропогенного воздействия. Диссертация на соискание ученой степени кандидата географических наук. Л.: Институт озероведения, 1984. 254 с.
244. Расплетина Г.Ф. Режим биогенных элементов // Антропогенное эвтрофирование Ладожского озера / под ред. Петровой Н.А. Л.: Наука, 1982. С. 79–100.
245. Расплетина Г.Ф., Гусаков Б.Л. Применение прямого и косвенного методов для расчета биогенной нагрузки и концентрации веществ в воде Ладожского озера // Антропогенное эвтрофирование Ладожского озера / под ред. Н.А. Петровой. Л.: Наука, 1982. С. 222–242.

246. Расплетина Г.Ф., Кулиш Т.П., Петрова Т.Н. Гидрохимическая характеристика рек – притоков Ладожского озера и р. Невы. Оценка экологического состояния рек бассейна Ладожского озера по гидрохимическим показателям и структуре гидробиоценозов / под ред. Трифионовой И.С. СПб.: Изд-во «Лема», 2006. С.11–35.
247. Расплетина Г.Ф., Сусарева О.М. Биогенные элементы // Ладожское озеро: прошлое, настоящее, будущее / под ред. В.А. Румянцева, В.Г. Дробковой. СПб.: Наука, 2002. С. 77–86.
248. Распопов И.М. Видовое разнообразие высших водных и прибрежно-водных растений в литоральной зоне Ладожского озера // Фиторазнообразие восточной Европы. № 7. Тольятти: Изд. «Кассандра», 2009. С. 173–180.
249. Распопов И.М. Высшая водная растительность Ладожского озера // Растительные ресурсы Ладожского озера. Л.: Изд. Ленинградского университета, 1968. С. 16–72.
250. Распопов И.М. Высшая водная растительность шхерного района Ладожского озера // Комплексные исследования шхерной части Ладожского озера. М.-Л.: Изд-во АН СССР, 1961. С. 193–210.
251. Распопов И.М. Высшие водные растения как структурообразующий фактор в развитии гидробиоценозов // Ладожское озеро: прошлое, настоящее, будущее / под ред. В.А. Румянцева, В.Г. Дробковой. СПб.: Наука, 2002. С. 242–245.
252. Распопов И.М. Макрофиты, высшие водные растения (основные понятия) // Первая Всесоюзн. Конф. по высшим водным и прибрежно-водным растениям. Тез. докл. Борок, 1977. С. 91–94.
253. Распопов И.М. О некоторых понятиях гидробиологии // Гидробиологический журнал. 1978. Т. 14. № 3. С. 20–26.
254. Распопов И.М. Высшая водная растительность больших озер Северо-Запада СССР. Л.: Наука, 1985. 200 с.
255. Распопов И.М., Адамец Л., Гусак Ш. Зарастание двух разнотипных заливов Ладожского озера в многолетнем аспекте // Ладожское озеро. Мониторинг, исследование современного состояния и проблемы управления Ладожским озером и другими большими озерами. Петрозаводск, 2000. С. 245–248.
256. Распопов И.М., Андроникова И.Н., Слепухина Т.Д., Расплетина Г.Ф., Рычкова М.А. Барбашова М.А., Доценко О.Н., Протопопова Е.В. Прибрежно-водные экотоны больших озер. СПб.: ИНОЗ РАН, 1998. 54 с.
257. Распопов И.М., Воронцов Ф.Ф., Слепухина Т.Д., Доценко О.Н., Рычкова М.А. Роль волнения в формировании биоценозов бентоса больших озер. Л.: Наука, 1990. 114 с.
258. Распопов И.М., Рычкова М.А. Геоботаническая характеристика заливов западной части шхерного района Ладожского озера // Очерки по растительному покрову Карельской АССР. Петрозаводск, 1971. С. 60–72.
259. Реестр туристских ресурсов Ленинградской области. СПб.: Невский Фонд, 2001. 20 с.
260. Реймерс Н.Ф., Штильмарк Ф.Р. Особо охраняемые природные территории. М.: Мысль, 1978. 168 с.

261. Рекомендации. Расчет поступления биогенных элементов в водоемы для прогноза их эвтрофирования и выбора водоохраных мероприятий. М.: Росагропромиздат, 1989. 48 с.
262. Родина А.Г., Кузьмицкая Н.К. Количество и распределение микроорганизмов в Волховской губе Ладожского озера // Гидробиологический журнал. 1968. Т. 4. № 1. С. 42–50.
263. Родина А.Г., Кузьмицкая Н.К. Численность и распределение бактериопланктона в Ладожском озере // Микробиология. 1963. Т. XXXII. Вып. 2. С. 288–295.
264. Романенко В.И. Микробиологические показатели качества воды и методы их определения // Водные ресурсы. 1979. № 6. С. 140–153.
265. Романенко В.И. Первичная продукция и деструкция органического вещества фитопланктона во внутренних водоемах // Всесоюз. конф. «Экология и геохимическая деятельность микроорганизмов круговорота углерода». М., 1974. С.1–3.
266. Романенко В.И., Кузнецов С.И. Экология микроорганизмов пресных водоемов. Л.: Наука, 1974. 194 с.
267. Руководство по методам гидробиологического анализа поверхностных вод и донных отложений. Л.: Гидрометеиздат, 1983. 239 с.
268. Румянцев В.А., Ефимова Л.К., Голицын Г.С. и др. Моделирование температурно-влажностного режима водосборного бассейна Ладожского озера // Изв. РАН. Сер. География. 2007. № 1. С.130–135.
269. Румянцев В.А., Ефимова Л.К., Голицын Г.С., Хон В.Ч. Вариации температурного и гидрологического режима региона водосборного бассейна Ладожского озера в XX и XXI вв. по данным современных моделей климата // Известия РАН. Сер. Физика атмосферы и океана. №1. С. 26–34.
270. Румянцев В.А., Кондратьев С.А., Поздняков Ш.Р., Рыбакин В.Н., Крючков А.М., Моисеенков А.И., Шмакова М.В., Ершова А.А. Экспериментальные исследования и моделирование формирования качества воды в реке Нева // Изв. Русского географического общества. 2010. Т. 142 (2). С. 24–31.
271. Русанов А.Г. Пространственное распределение высшей водной растительности Ладожского озера в зависимости от природных и антропогенных факторов // Литоральная зона Ладожского озера. СПб., 2011. С. 68–102.
272. Русанов А.Г. Современное состояние высшей водной растительности Ладожского озера с учетом зон повышенного экологического риска // Современные экологические проблемы и их решения: взгляд молодежи. Материалы конференции. СПб., 2008. С. 50–58.
273. Рычкова М.А. Индикаторные возможности перифитона (водорослей обрастаний) в литорали Ладожского озера // Биоиндикация в мониторинге пресноводных экосистем. СПб., 2007. С. 132–134.
274. Рычкова М.А. Перифитон литоральной зоны // Ладожское озеро: прошлое, настоящее, будущее / под ред. В.А. Румянцева, В.Г. Драбковой. СПб.: Наука, 2002. С. 246–250.

275. Рычкова М.А. Перифитон озера и его продуктивность. // Современное состояние экосистемы Ладожского озера. Л.: Наука, 1987. С. 116–118.
276. Рычкова М.А. Сезонная сукцессия эпифитона Ладожского озера // Озерные экосистемы: биологические процессы, антропогенная трансформация, качество воды. Минск, 2003. С. 345–348.
277. Свицерская М.Д., Храбрый В.М. Сохраним для потомков: Особо охраняемые природные территории Ленинградской области. Л.: Лениздат, 1985. 141 с.
278. Свод правил экологически безопасной сельскохозяйственной практики в условиях Ленинградской области России. Часть 1. Содержание крупного рогатого скота и кормопроизводство. СПб.-Хельсинки, 2007. 68 с.
279. Свод правил экологически безопасной сельскохозяйственной практики в условиях Ленинградской области России. Часть 2. Промышленное птицеводство. СПб.-Хельсинки, 2007. 60 с.
280. Север Европейской части СССР. М.: Наука, 1966. 452с.
281. Семенович Н.И. Донные отложения Ладожского озера. М.-Л.: Изд-во АН СССР, 1966. 124 с.
282. Сергеева В.А. Состояние и распределение зоопланктона в очагах загрязнения Ладожского озера // Сборник научных трудов ГосНИОРХ. 1988. Вып. 285. С. 114–128.
283. Скориков А.С. Зоологические исследования ладожской воды как питьевой // Ладожское озеро как источник водоснабжения. СПб., 1911.
284. Сладечек В. Общая биологическая схема качества воды // Санитарная и техническая гидробиология. М.: Наука, 1967. С. 26–31.
285. Слепухина Т.Д. Зообентос как индикатор качества вод в озерах // Водные ресурсы. 1987. № 5. С. 145–148.
286. Слепухина Т.Д. Экология макрозообентоса больших озер Северо-Запада СССР. Автореф. дисс. на соискание ученой степени д. б. н. Л., 1991. 40 с.
287. Слепухина Т.Д., Алексеева Н.А. Донные беспозвоночные // Антропогенное эвтрофирование Ладожского озера / под ред. Петровой Н.А. Л.: Наука, 1982. С.181–190.
288. Смирнова Т.С. Зоопланктон // Антропогенное эвтрофирование Ладожского озера / под ред. Петровой Н.А. Л.: Наука, 1982б. С. 173–180.
289. Смирнова Т.С. Зоопланктон западного района Ладожского озера и губы Петрокрепость как кормовая база рыб // Сб. науч. Тр. ГосНИОРХ. Вып. 248. Л., 1986а. С. 61–75.
290. Смирнова Т.С. Локализация продуктивных зон пелагиали больших озер в связи с неоднородностью вод // Тр. ЗИН АН СССР. 1986а. Вып. 152. С. 172–182.
291. Смирнова Т.С. Современное состояние зоопланктона Волховской губы и прилегающего района Ладожского озера // Сб. науч. тр. ГосНИОРХ. Вып. 179. Л.,

- 1982а. С. 90–98.
292. Современное состояние рыбного хозяйства на внутренних водоемах России. СПб.: ГосНИОРХ. 2000. 285 с.
293. Современное состояние рыбного хозяйства на внутренних водоемах России. СПб.: ГосНИОРХ. 2002. 297 с.
294. Современное состояние рыбного хозяйства на внутренних водоемах России. СПб.: ГосНИОРХ. 2004. 580 с.
295. Современное состояние экосистемы Ладожского озера / под ред. Н.А. Петровой и Г.Ф. Расплетинной. Л., 1987. 213 с.
296. Соколов А.А. Гидрография СССР. Л.: Гидрометеиздат. 1964. 536 с.
297. Соколова М.Ф. Зоопланктон Ладожского озера // Изв. ВНИОРХ. 1956. Т. 38. С. 33–65.
298. Соколова М.Ф. К зоопланктону Ладожского озера // Исследование реки Невы и ее бассейна. 1930. Вып. 6. С. 53–67.
299. Соловьёва Л.Ф. Гидрохимия притоков Ладожского озера // Гидрология и гидрооптика Ладожского озера. Л.: Наука, 1967. С. 5–59.
300. Соловьёва Н.Ф. Гидрохимия притоков Ладожского озера и Невы // Гидрохимия и гидрооптика Ладожского озера. Л., 1967. С. 5–59.
301. Сорокин П.Е., Козырев А.И. Подводные исследования в акваториях Валаама // Изучение памятников морской археологии. 2000. № 4. С. 183–194.
302. Сорокин Ю. И. Бактериальная продукция в водоемах // Итоги Науки и Техники. ВИНТИ АН СССР. 1973. Т. 1. С. 47–102.
303. Сорокин Ю.И. Количественная оценка роли бактериопланктона в биологической продуктивности тропических вод Тихого океана // Функционирование пелагических сообществ тропических районов океана. М., 1971. С. 92–122.
304. Сорокин Ю.И., Федоров В.Д. Определение первичной продукции и деструкции органического вещества в Онежском озере // Тр. Ин-та биологии внутр. вод. 1969. Вып. 19 (22). С. 1–8.
305. Состояние биоценозов озерно-речной системы Вуоксы / отв. ред. И.С. Трифонова. СПб.: Изд-во НИИ химии СПбГУ, 2004. 146 с.
306. Справочник агрохимика. М., Россельхозиздат, 1976. 351 с.
307. Стальмакова Г.А. Зообентос Ладожского озера // Биологические ресурсы Ладожского озера (Зоология). Л., 1968. С. 4-70.
308. Станиславская Е.В. Перифитон притоков Ладожского озера // Охрана и рациональное использование водных ресурсов Ладожского озера и других больших озер. Труды IV Международного симпозиума по Ладожскому озеру. СПб., 2003. С. 249–253.

309. Станиславская Е.В. Структура перифитона как показатель состояния притоков Ладожского озера и реки Невы // Оценка экологического состояния рек бассейна Ладожского озера по гидрохимическим показателям и структуре гидробиоценозов. СПб., 2006. С. 91–103.
310. Станиславская Е.В., Горченко А.С. Разнообразие водорослей перифитона в притоках Ладожского озера // Новости сист. низш. раст. 2005. Т. 39. С. 79–98.
311. Стратиграфия СССР; четвертичная система. Полутом 1. М.: Недра, 1982. 443 с.
312. Субетто Д.А. Донные отложения озер: палеолимнологические реконструкции. СПб.: Изд. РГПУ им. А.И. Герцена, 2009. 344 с.
313. Субетто Д.А. История формирования Ладожского озера и его соединения с Балтийским морем // Общество, среда, развитие. 2007. № 1 (10). С. 111–120.
314. Субетто Д.А. Поздне-последледниковая трансформация озерных седиментационных обстановок на Северо-Западе России // Экологический вестник научных центров ЧЭС. 2006. Приложение. С. 90–96.
315. Судольский А.С. Динамические явления в водоемах. Л.: Гидрометеиздат, 1991. 262 с.
316. Таматорина Н.Л., Каурова З.Г. Гетеротрофное усвоение глюкозы бактериопланктоном Ладожского озера // Озерные экосистемы: биол. процессы, антропоген. трансформация, качество воды. М., 1999. С. 157–158.
317. Тержевик А.Ю., Крючков А.М., Гусаков Б.Л. Основные особенности формирования гидрофизических полей Ладожского озера // Современное состояние экосистемы Ладожского озера. Л., 1987. С. 42–62.
318. Тихомиров А. И. Термика крупных озёр. Л.: Наука. 1982. 232 с
319. Тихомиров А.И. Температурный режим и запасы тепла Ладожского озера // Гидрологический режим и водный баланс Ладожского озера. Л., 1968. С. 114–218.
320. Трегубова Т.М., Кулиш Т.П., Капустина Л.Л. Особенности режима органического вещества в современный период // Современное состояние экосистемы Ладожского озера. Л., 1987. С. 148–167.
321. Трифонова И.С. Исследование фитопланктона реки Вуоксы // Биологические ресурсы Белого моря и внутренних водоемов Европейского Севера. Петрозаводск, 1995. С. 73–76.
322. Трифонова И.С. Соотношение продукционно-деструкционных процессов как показатель качества воды // Особенности формирования качества воды в разнотипных озерах Карельского перешейка. Л.: Наука, 1984а. С. 216–221.
323. Трифонова И.С. Фитопланктон и его роль в продукции органического вещества // Особенности формирования качества воды в разнотипных озерах Карельского перешейка. Л.: Наука, 1984б. С. 169–192.
324. Трифонова И.С. Экология и сукцессия озерного фитопланктона // Л.: Наука, 1990. 178 с.

325. Трифонова И.С., Афанасьева А.Л., Павлова О.А. Видовой состав и биомасса притоков Ладожского озера и р. Невы // Ботанический журнал. 2001. Т. 86. № 11. С. 10–15.
326. Трифонова И.С., Афанасьева А.Л., Павлова О.А. Таксономический состав фитопланктона основных притоков Ладожского озера и р. Невы // Новости систематики низших растений. 2001. Т. 45. С. 34–55.
327. Трифонова И.С., Павлова О.А. Оценка трофического состояния притоков Ладожского озера и реки Невы по фитопланктону // Водные ресурсы. 2004. Т. 31. № 4. С. 732–741.
328. Усачев В.Ф., Прокачева В.Г., Бородулин В.В. Оценка динамики озерных льдов, снежного покрова и речных разливов дистанционными средствами. Л.: Гидрометеиздат, 1985. 103 с.
329. Усикова Т.В., Малаховский Д.Б., Гарбар Д.И. Домикулинские озерные отложения Северо-Западного Приладожья // История озер. Труды Всесоюзного симпозиума. Вильнюс, 1970. С. 123–133.
330. Филатов Н.Н. (Ред.). Климат Карелии. Изменчивость и влияние на водные объекты и водосборы. Петрозаводск, 2004. 223 с.
331. Филатов Н.Н. Гидродинамика озер. СПб.: Наука, 1991. 196 с.
332. Филатов Н.Н. Динамика озер. Л.: Гидрометеиздат, 1983. 166 с.
333. Филатов Н.Н. Изменение климата Восточной Фенноскандии и уровня воды крупнейших озер Европы. Петрозаводск, 1997. 148с.
334. Филатов Н.Н., Сало Ю.А. Изменчивость некоторых характеристик климата и общей увлажненности территории Карелии // Тез. юбил. науч. конф. «50 лет Карельскому научному центру РАН». Петрозаводск, 1996. С. 108–111.
335. Филенко Р.А. Гидрологические особенности Карельского перешейка // Учёные записки ЛГУ. 1960. Сер. географ. наук. Вып. 14. № 292. С. 136–138.
336. Финогенова Н.П., Алимов А.Ф., Оценка степени загрязнения вод по составу донных животных // Методы биологического анализа пресных вод. Л.: АН СССР ЗИН, 1976. С. 95–106.
337. Фурсенко М.В. Микробиологическая оценка сапробности воды и функциональные особенности бактериопланктона // Гидробиологические исследования самоочищения водоемов. Л.: Наука, 1976. С. 5–17.
338. Хазанович К.К. Геологические памятники Ленинградской области. Л.: Лениздат, 1982. 77 с.
339. Хохлова Т.Ю., Токарев П.М., Антипин В.К. Особо охраняемые природные территории Карелии. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2000. 312 с.
340. Хрисанов Н.И., Осипов Г.К. Управление эвтрофированием водоемов. СПб.: Гидрометеиздат, 1993. 278 с.

341. Цветков В.Ю., Сорокин И.Н. Финский залив – природный и морехозяйственный комплекс России. СПб.: Институт озероведения РАН, НОУ ДПО “ИПК “Прикладная экология”, 2009. 223 с.
342. Чеботарев Е.Н. Количественная характеристика бактериопланктона как показатель качества воды в озерах. // Особенности формирования качества воды в разных озерах Карельского перешейка. Л.: Наука, 1984. С. 133–151.
343. Чеботарев Е.Н. Численность и функциональная активность бактериопланктона Вуоксы // Состояние биоценозов озерно-речной системы Вуоксы / отв. ред. И.С. Трифонова. СПб.: Изд-во НИИ химии СПбГУ, 2004. С. 73–87.
344. Чеботарев Е.Н. Оценка состояния озерно-речной системы Вуоксы по бактериопланктону // Тезисы докладов на Международной конференции «Биоиндикация в мониторинге пресноводных экосистем». СПб., 23–27 октября 2006 г. С. 158.
345. Чеботарева Н.С. Общая характеристика последнего ледникового покрова // Последний ледниковый покров на Северо-Западе Европейской части СССР. М.: Наука, 1969. С. 276–299.
346. Черняева Ф.А. Морфометрическая характеристика Ладожского озера // Гидрологический режим и водный баланс Ладожского озера. Л.: Изд. Лен. гос. университета, 1966. С. 58–80.
347. Численко Л.Л. Роль Naegrasticoida в биомассе мезобентоса некоторых биотопов фитали Белого моря // Зоол. журн. 1961. Т. 40. № 7. С. 983–996.
348. Шевченко Т.Ф. Фитоперифитон Киевского и Каховского водохранилищ // Гидробиолог. журн. 1994. Т. 30. № 4. С. 13–21.
349. Шилькрот Г.С. Типологические изменения режима озер в условиях культурных ландшафтов. М., 1979. 168 с.
350. Шитиков В.К., Розенберг Г.С., Зинченко Т.Д. Количественная гидроэкология: методы, критерии, решения. Кн. 1. М.: Наука, 2005. 281 с.
351. Шнитников А.В. Внутривековая изменчивость компонентов общей увлажненности. Л.: Наука, 1969. 246 с.
352. Шнитников А.В. Внутривековая изменчивость общей увлажненности бассейна Ладожского озера // Гидрологический режим и водный баланс Ладожского озера. Л., 1966. С. 5–57.
353. Шорохов Е.А., Кучко А.А. Туристский потенциал городов и районов Республики Карелия. Петрозаводск, 2001. 72 с.
354. Штина Э.А. Изменения альгофлоры реки Вятки за 60 лет // Гидробиотаника — 2000. V всерос. конф. по водным растениям. Борок, 2000. С. 77–78.
355. Шушкина Э.А., Виноградов М.Е., Лебедева Л.И., Умнов А.А. Энергетика и структурно-функциональная характеристика планктонных сообществ Черного моря // Экосистема пелагиали Черного моря. М., 1980. С. 223–243.

356. Экосистема озера Ильмень и его поймы / под. ред. И.Н. Сергеева. СПб.: Изд-во СПбГУ, 1997. 275 с.
357. Яковлев В. А. Оценка качества поверхностных вод Кольского Севера по гидробиологическим показателям и данным биотестирования. Апатиты, 1988. 25 с.
358. Яковлев В.А. Изменение структуры зообентоса Северо-Восточной Фенноскандии под влиянием природных и антропогенных факторов. Автореф. дисс. док. биол. наук. СПб., 1999. 49 с.
359. Andronikova I., Avinski V. General characteristics of Lake Ladoga zooplankton at present // Report of Lake Ladoga research in 1991–1993. University of Joensuu. Publicatios of Karelian Institute. № 111. Joensuu, 1994. P. 81–91.
360. Andronikova I.N. Monitoring of zooplankton in the Shchuchiy Bay of Lake Ladoga // Proceedings of the Second international Lake Ladoga Symposium. Joensuu, 1997. P. 254–260.
361. Andronikova I.N. Zooplankton characteristics in monitoring of Lake Ladoga // Hydrobiologia. 1996. Vol. 322. P. 173–179.
362. Assel R. A. Great lakes ice cover, first ice, last ice, and ice duration. NOAA Technical Memorandum GLERL-125. NOAA, Great Lakes Environmental Research Laboratory, 2003, Ann Arbor, MI. 49 p.
363. Avinsky Valentin A., Kapustina Larisa, Letanskaja Galina, Protopopova Elena. Plankton communities of Lake Ladoga under thermal bar conditions // Proceedings of the Third International Lake Ladoga Symposium. Joensuu, 2000. P. 21–26.
364. Bakker D., De Vries W., Van de Plassche W., Van Pul W. Manual for performing risk assessments for persistent organic pollutants in aquatic ecosystems. Guidelines for critical limits, calculation methods and input data. TNO-report // TNO-MEP – R 98/376. 90 p.
365. Behrendt H., Dannowski R. (eds.). Nutrients and heavy metals in the Odra River system. Berlin: Weissensee Verlag, 2007. 337 p.
366. Beletsky D.V. Numerical modelling of large-scale circulation in Lake Onega and Ladoga. Hydrobiologia. 1996. V. 322. P.75–80.
367. Bennet E. Characteristics of the thermal regime of Lake Superior // Journal of Great Lakes Research. 1978, 4 (3–4). P. 310–319.
368. Bini L.M., Thomaz S.M., Murphy K.J., Camargo A.F.M. Aquatic macrophyte distribution in relation to water and sediment conditions in the Itaipu Reservoir, Brazil. // Hydrobiologia. 1999. Vol. 415. P. 147–154.
369. Carlton M.N. Laurentian Great Lakes monitoring: biology and the Lake Erie case // Proceedings of a workshop on monitoring of Large Lakes. Joensuu, 1999. P. 136–146.
370. Caulcott E. Significance tests. Routledge & Kegan Paul: London, 1973.
371. Chambers P.A. Nearshore occurrence of submersed aquatic macrophytes in relation to wave action // Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences. 1987. Vol. 44. № 9. P. 1666–1669.

372. Chapra S.C. Application of the phosphorus loading concept to the Great Lakes // Phosphorus management strategies for lakes. Ed. R.C. Loehr, C.S. Martin, W. Rast. Ann Arbor Science Publishers, Inc.: Ann Arbor, 1980. P. 135–152.
373. Cole J.J., Findlay S., and Pace M.L. Bacterial production in fresh and saltwater ecosystems: A cross-system overview // Marine Ecology-Progress Series. 1988. V. 43. P.1–10/
374. Cronberg G., Lindmark G., Bjork S. Mass development of the flagellate *Gonyostomum semen* (Raphidophyceae) in Swedish forest lakes // Hydrobiologia. 1988. V. 161. P. 217–237.
375. Davydova N., Kurashov E., Simola H., Slepukhina T., Subetto D. The estimation of the present state of bottom sediments and benthic communities in the Sortavala archipelago of Lake Ladoga // Intercalibration of research methods in Lake Ladoga. Joensuu, 1992. P. 41–51.
376. De Vries W., Bakker D., Sverdrup H. Manual for calculation critical loads of heavy metals for aquatic ecosystems. DLO Winand Staring Center Rep. 165. Netherlands, 1998. 91 p.
377. del Giorgio P.A., Peters R.H. Patterns in planktonic P: R ratios in lakes: Influence of lake trophity and dissolved organic carbon // Limnology and Oceanography. Vol. 39. 1994. P. 772–787.
378. Dillon P. J., Rigler F.H. The phosphorus – chlorophyll relationship in lakes // Limnology and Oceanography. Vol. 19. 1974. P. 767- 773.
379. Doganovski A.M. Evolution of tendencies of Lake Ladoga level regime to account for natural and anthropogenic factors // Proceedings of the Second international Lake Ladoga Symposium. Joensuu, 1997. P. 191–195.
380. Doganovski A.M. Evolution of tendencies of Lake Ladoga level regime to account for natural and anthropogenic factors // Proceedings of the Second international Lake Ladoga Symposium. Joensuu, 1997. P. 191–195.
381. Doganovski A.M., Davydov Y.A., Rusakov O.V. Characteristic properties of the level regime of North European lakes // Simola H., Vilianen M., Slepukhina T. Abstracts of the first international Lake Ladoga symposium. University of Yoensuu, 1993. P. 89–95.
382. Drabkova V. Monitoring, sampling and analyzing hydrobiological and physicochemical data on Lake Ladoga // Proceedings of a workshop on environmental data systems for large lakes. Joensuu, 1999. P. 59–64.
383. ECMWF Re-analysis Sample Data 1979–1993. 1997 // European Centre for Medium-Range Weather Forecasts. Copyright ECMWF CD-ROM.
384. 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. V. 13. № 3–4. Arch. Hydrobiol. Suppl. 141/3–4. P. 341–352.
385. Filatov N.N., Nazarova L.E. Salo Yu.A., Terzhevik A.Yu., Rukhovets L.A., Astrakhantsev G.P. Time-space changes of climate and water systems of Karelia // 16th International Northern Research Basins Symposium and Workshop. Petrozavodsk

(Russia), 27 August – 2 September, 2007.

386. Giere O. *Meiobenthology: The Microscopic Fauna in Aquatic Sediments*. Berlin: Springer-Verlag, 1993. 328 p.
387. Golitsyn G.S., Efimova L.K., Mokhov I.I. et al. Changes of temperature of air and precipitation for the lake Ladoga basin according to results of long-term integration of ECHAM4/OPYC and HadCM3 models. 2003 // *Proceedings of the Fourth International Lake Ladoga Symposium 2002*. Joensuu, 2003. P. 449–455.
388. Golosov S., Maher O.A., Shipunova E., Terzhevik A., Zdorovenнова G., Kirillin G. Physical background of the development of oxygen depletion in ice-covered lakes. // *Oecologia*. 2007. Vol. 151. P. 331–340.
389. Goodnight C. J., Whitley L. S. Oligochaetes as indicators of pollution // *Proc. 15-th Ind. Waste Conf.* Vol. 1961. 106. P. 139–142.
390. Gray C.B., Neilson M., Johannsson O., Fitzsimmons J., Millard S. & Dermott R. Lake Ontario // *The book of Canadian Lakes*. The Canadian Association on Water quality. Monograph series: 3. 1994. P. 14–36.
391. Gritchenko Z.G., Ivanova L.V., Pantelev Y.A., Tishkova N.A., Ikaheimonen T.K., Ilis E., Saxen R. Joint Russian-Finnish study of radioactive contamination in the NW part of Lake Ladoga. // *Hydrobiologia*. 1996. Vol. 322. P.125–128.
392. Guidelines for the compilation of waterborne pollution to the Baltic Sea (PLC-water). HELCOM, Helsinki, 2005, 80 p.
393. Hakkari L. Zooplankton species as indicators of environment // *Aqua Fennica*. Helsinki, 1972. P. 46–54.
394. Heinonen P. Quantity and composition of phytoplankton in Finnish inland waters // *Publications of the Water Research Institute*. Helsinki, 1980 (№ 37). P. 1–31.
395. Hendriksen A., Kamari J., Posch M., Wilander A. Critical loads of acidity: Nordic surface waters // *AMBIO*. 1992. Vol. 21. P. 356–363.
396. Hobbie L. E., R. I. Daley & S. Jasper. Use of nucleopore filters for counting bacteria by fluorescence microscopy // *Appl. and Environ. Microb.* 1977. Vol. 33 (5). P. 1225–1228.
397. Holopainen A.-L. & Letanskaya G.I. Effects of nutrient load on species composition and productivity of phytoplankton in Lake Ladoga // *Boreal Environment Research*. 1999. Vol 4. P. 215–227.
398. Hutchinson G. E. *A treatise on limnology // Introduction to lake biology and the limnoplankton*. Vol. 2. Wiley: New York, 1967. 1115 p.
399. Ignatieva N.V. Nutrient exchange across the sediment-water interface in the eastern Gulf of Finland // *Boreal Environment Research*. 1999. Vol. 4. P. 295–305.
400. International Satellite Cloud Climatology Project Data: Monthly Cloud Products. July 1983 // December 1990, NASA 1992.
401. IPCC. 2007. *Climate Change 2007: The Physical Science Basis: Working Group 1 Contribution to the Intergovernmental Panel on Climate Change Fourth Assessment*

Report. Technical Summary

402. Irbe J.G. Some unusual surface water temperature patterns in the Great Lakes, as detected by airborne radiation thermometer surveys, In Proceedings 12 th Conference on Great Lakes Research, Ann Arbor, Michigan, 1969, p.583 - 607.
403. Johengen, T.H., Johansson, O.E., Pernie, G.L. & Millard, E.S. Temporal and seasonal trends in nutrient dynamics and biomass measure in Lakes Michigan and Ontario in response to phosphorus control. //Can. J.Fish. Aquat.Sci. 51. 1994. P. 2570- 2578.
404. Jonsson G.St. Photosynthesis and production of epilithic algal communities in Thingvallavatn. //Oikos. 1992. V.64. N.1-2. P. 222-240.
405. Kalnay E., Kanamitsu M., Kistler R. et al. 1996. The NCEP/NCAR 40-Year Reanalysis Project // Bulletin of the American Meteorological Society, March 1996. P. 437–471
406. Kapustina L.L. Bacterioplankton of lake Ladoga under diminishing human impact. / Proceedings the Fourth International Lake Ladoga Symposium. Joensuu, 2002. P. 154-159.
407. Kapustina L.L. Recent dynamic of bacterial community in lake Ladoga. / Boreal Environment Reserches. 1999. Vol. 4. P. 263–267.
408. Karetnikov S., Naumenko M. Lake Ladoga ice phenology: mean condition and extremes during last 65 years. Hydrological processes 2011, 25, 2859-2867. DOI:10.1002/hyp.8048
409. Karetnikov S., Naumenko M. Recent trends in Lake Ladoga ice cover. Hydrobiologia,2008, vol.599, no 1 pp.41-48.
410. Karjalainen J., Rahkola M., Viljanen M., Andronikova I.N., Avinski V.A. Comparison of methods used in zooplankton sampling and counting in the joint Russian-Finnish evaluation of the trophic state of Lake Ladoga // Hydrobiologia. 1996. Vol. 322. P. 249-253.
411. Keddy P.A. Quantifying within lake gradients of wave energy: interrelationships of wave energy, substrate particle size and shoreline plants in Axe Lake, Ontario // Aquatic Botany. 1982. Vol. 14. № 1. P. 41–58.
412. Keough J.R., Thompson T.A., Guntenspergen G.G., Wilcox D.A. Hydrogeomorphic factors and ecosystem responses in coastal wetlands of the Great Lakes // Wetlands. 1999. Vol. 19. P. 821–834.
413. Klaveness D. Ecology of the Cryptomonadida: a first review // Growth and reproductive strategies of freshwater phytoplankton / ed. by C.D. Sandgren. Cambridge, 1991. P. 105–133.
414. Kovalenko V. Chlorophyll-a studies // Filatov N. & Heinonen P. (eds.). Results of the Finnish-Russian joint study of the Lakes Onega, Ladoga and Saimaa conducted in the summer of 1990. Helsinki, 1997. P. 25–29.
415. Kudersky L.A. History of fish fauna in Lake Ladoga // Proceeding of the second international Lake Ladoga symposium 1996. Joensuu, 1997. P. 284–288.

416. Kuparinen J. Glucose assimilation: its contribution to carbon flux in the pelagial and use in monitoring heterotrophic activity // Arch. Hydrobiol. Beih. Ergebn. Limnol. 1984. Vol. 19. P. 15–22.
417. Lamark J. *Anodonta sulcata* aus Ladogasee // Histoire naturelle des animank sans vertebres. Vol. 6. Paris, 1819. 566 p.
418. Lavrentyeva G.M., Ogorodnikova V.A., Susloparova O.N. & Tereshenkova T.V. Changes in the structure of plankton communities in southern Lake Ladoga under conditions of technogenic pressure // Proceedings of the Second International Lake Ladoga Symposium 1996. Joensuu, 1997. P. 94–102.
419. Lepisto L. Phytoplankton studies // Filatov N. & Heinonen P. (eds.). Results of the Finnish-Russian joint study of the Lakes Onega, Ladoga and Saimaa conducted in the summer of 1990. Helsinki, 1997. P. 34–42.
420. Likens G.E. Primary production inland aquatic ecosystems // Primary productivity of the biosphere. Berlin, 1975. P.185–202.
421. Livingstone D.M. Break-up dates of alpine lakes as proxy data for local and regional mean surface air temperatures // Climatic Change. Vol. 37. P. 407–439.
422. Livingstone D.M. Ice break-up on southern Lake Baikal and its relationship to local and regional air temperatures in Siberia and to the North Atlantic oscillation // Limnology and Oceanography. Vol. 44. P. 1486–1497.
423. Lougheed V.L., Crosbie B., Chow-Fraser P. Primary determinants of macrophyte community structure in 62 marshes across the Great Lakes basin: latitude, land use, and water quality effects // Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences. 2001. Vol. 58. P. 1603–1612.
424. Lozovik P., Raspletina G. Nutrients in lake monitoring in Russia // Proceedings of a workshop on monitoring of Large Lakes. Joensuu, 1999. P. 64–74.
425. Menzhulin G.V. 2001. Empirical Analysis of Modern Changes of Temperature and Precipitation and Development of Alternative Scenarios of Future Climate in Mediterranean Regions // Materials of International Conference on Integrated Water Management. Agricultural Research Institute Publ. 11–13 May, 2001, Nicosia, Cyprus.
426. Munawar M. Stadelman P. & Munawar I. Phytoplankton biomass, its species composition and primary production at a nearshore and midlake station of Lake Ontario during IFYCL // Proceedings of the 17th Conference of Great Lakes Research. International Association of Great Lakes Research. Ann Arbor, MI, 1974. P. 629–652.
427. Naumenko M., Karetnikov S., Guzivaty V. 3-D thermal structure of Lake Ladoga: a new approach and results // Proceedings of the 7th Workshop on Physical processes in natural waters. 2–5 July 2003. Northern Water Problems Institute. Petrozavodsk. P. 45–49.
428. Naumenko M., Karetnikov S., Guzivaty V. Spatial distribution of daily mean surface temperatures in Lake Ladoga from May to November // Peltonen A., Gronlund & Viljanen (eds). Proceedings of the 3rd International Lake Ladoga Symposium 1999. Joensuu, 2000. P. 442–447.
429. Naumenko M.A. Some Aspects of the Thermal Regime of Large Lakes: Lake Ladoga and Lake Onega. Water Pollution Research Journal of Canada. 1994. Vol. 29. № 2/3.

- P. 423–439.
430. Niinioja R., Raspletina G., Susareva O., Lozovik P. Hydrochemical characteristics of Lake Ladoga in 1993–95 // Proceedings of the Second International Lake Ladoga Symposium 1996. Joensuu, 1997. P. 59–65.
 431. *OECD*. Eutrophication of waters // Monitoring, assessment and control *OECD*. Paris, 1982. 154 p.
 432. Overbeck J. Dark CO₂ uptake – biochemical background and its relevance to in situ bacterial production // *Ergebnisse der limnologie*. 1979. Vol. 12. № 12. P. 1012–1021.
 433. Overbeck J. Distribution pattern of phytoplankton and bacteria, microbial decomposition of organic matter and bacterial production in eutrophic, stratified lake // *Productivity problems of freshwaters*. Warszawa-Krakow, 1972. P. 227–236.
 434. Palmén F. Zur Kenntnis der Flora und Vegetation eines Uferabschnitts am Laatokkasee nördlich der Syväri-Mündung // *Ann. Bot. Soc. Zool.-Bot. Fenn. Vanamo*. 1943. Vol. 19. № 2. S. 1–93.
 435. Panov V. E. Establishment of the Baikalain endemic amphipod *Gmelinoides fasciatus* Stebb in Lake Ladoga // *Hydrobiologia*. 1996. Vol. 322. P. 187–192.
 436. Pantle R., Buck H. Die biologische Überwachung der Gewässer und die Darstellung der Ergebnisse // *Gas- und Wasserfach*. 1955. Vol. 96 (18). P. 1–604.
 437. Penfound W.T. An outline for ecological life histories of herbaceous vascular hydrophytes // *Ecology*. 1952. Vol. 33. P. 123–128.
 438. Penning W.E., Mjelde M., Dudley B., Hellsten S., Hanganu J., Kolada A., van den Berg M., Poikane S., Phillips G., Willby N., Ecke F. Classifying aquatic macrophytes as indicators of eutrophication in European lakes // *Aquatic Ecology*. 2008. Vol. 42. P. 237–251.
 439. Petrova N. The phytoplankton of Ladoga and Onega lakes and its recent successional changes // *Arch. Hydrobiol. Beih. Ergebn. Limnol.* 1987. № 25. P. 11–18.
 440. Pieczynska E., Ozimek T., Rybak J. Long-term changes in littoral habitats and communities in lake Mikolajskie (Poland) // *J. Intern. Revert. Hydrobiol.* 1988. Vol. 73. № 4. P. 361–378.
 441. Pitkänen H., Kondratyev S., Lääne A., Gran V., Kauppila P., Loigu E., Markovets I., Pachel K., Rumyantsev V. Summary report of the working group loading // Proceedings of the Final Seminar of the Gulf of Finland Year 1996 / Ed. by J. Sarkkula. Helsinki, Finland, 1999. P. 9–18.
 442. Pomeroy L.R. The ocean's food web, a changing paradigm // *Bioscience*. 1974. Vol. 24. P. 49–504.
 443. Rahkola M., Avinsky V., Holopainen A.-L., Jurvelius J., Karjalainen J., Viljanen M. Interacting in the dark: a study of the diel vertical migrations of pelagic plankton and fish in Lake Ladoga // *Boreal Environment Research*. 1999. Vol. 4, № 3. P. 245–256.
 444. Rahkola M., Karjalainen J., Avinsky V.A. Individual weight estimates of zooplankton based on length-weight regressions in Lake Ladoga and Saimaa Lake System // *Nordic*

- Journal of Freshwater Research. 1998. Vol. 74. P. 110–120.
445. Rai H., Hill G. Establishing the pattern of heterotrophic bacterial activity in three Central Amazonian lakes // *Hydrobiology*. 1982. Vol. 86. P. 121–126.
 446. Raspopov I.M., Andronikiva I.N. Barbashova M.A. et al. Long-term monitoring of the ecosystem of a bay of Lake Ladoga heavily impacted by pulp and paper mill waste waters // *Proceedings of the Fourth International Lake Ladoga Symposium*. Joensuu, 2003. P. 411–413.
 447. Raspopov I.M., Andronikova I.N., Dotsenko O.N., Kurashov E.A., Letanskaya G.I., Panov V.E., Rychkova M.A., Telesh I.V., Tchernykh O.A., Vorontsov F.F. Littoral zone of Lake Ladoga: ecological state evaluation // *Hydrobiologia*. 1996. Vol. 322. P. 39–47.
 448. Rekolainen S. 1989. Phosphorus and nitrogen load from forest and agricultural areas in Finland // *Aqua Fennica*. 1989. Vol. 19 (2). P. 95–07.
 449. Reynolds C.S., Descy J.-P. The production, biomass and structure of phytoplankton in large rivers // *Archiv. für Hydrobiol.* 1996. Beih. 113. S. 161–187.
 450. Rodgers G.K. The thermal bar in the Laurentian Great Lakes // *Proceedings of the 8th Conference on Great Lakes Research*. Toronto, 1965. P. 89–96.
 451. Rummukainen M., Räisänen J., Bringfelt B., Ullerstig A., Omstedt A., Willén U., Hansson U., and Jones C. A regional climate model for northern Europe: model description and results from the downscaling of two GCM control simulations // *Climate Dynamics*. 2001. Vol. 17. 339–359.
 452. Rychkova M.A. Periphyton of Lake Ladoga // *Abstracts of the First International Lake Ladoga Symposium 1993*. Joensuu, 1995. P. 165–168.
 453. Saarnisto M., Grönlund T. Shoreline displacement of Lake Ladoga – new data from Kilpolansaari // *Hydrobiologia*. 1996. Vol. 322. P. 205–215.
 454. Sand-Jensen K., Riis T., Vestergaard O., Larsen S.E. Macrophyte decline in Danish lakes and streams over the past 100 years // *Journal of Ecology*. 2000. Vol. 88. P. 1030–1040.
 455. Sawyer C. N. Fertilization of lakes by agricultural and urban drainage // *New England Water Works Assoc.* 1947. Vol. 61. № 2. P. 109–127.
 456. Sculthorpe CD. *The biology of aquatic vascular plants*. New-York. 1971. 610 p.
 457. Sladeczek V. System of water quality from the biological point of view // *Archiv für Hydrobiologie. Ergebnisse der Limnologie*. 1973. Beih. 7. P. 1–218.
 458. Slepukhina T.D., Belyakova I.V., Chichikalyuk Y.A., Davydova N.N., Frumin G.T., Kruglov E.M., Kurashov E.A., Rubleva E.V., Sergeeva L.V. & Subetto D.A. Bottom sediments and biocoenoses of northern Ladoga and their changes under human impact // *Hydrobiologia*. 1996. Vol. 322. P. 23–28.
 459. Slepukhina T.D., Kurashov E.A. Zoobenthos in lake monitoring in Russia // *Proceedings of a workshop on monitoring of large lakes*. Joensuu, 1999. P. 173–175.
 460. Sorokin J.I., Kadota M. *IBP handbook 23*, Blackwell Scientific Publications: Oxford, 1972. 112 p.

461. Stewart A.J., Wetzel R.G. Cryptophytes and other microflagellates as couplers of planktonic community // *Archiv für Hydrobiologie*. 1986. Beih. 106. S. 1–19.
462. ter Braak C.J.F., Šmilauer P. CANOCO Reference Manual and Users Guide to Canoco for Windows: Software for Community Ordination (Version 4). Ithaca, NY. 1998. 351 p.
463. Ter Braak C.J.F., van Dam H. Inferring pH from diatoms: a comparison of old and new calibration methods // *Hydrobiologia*. 1989. Vol. 178. P. 209–223.
464. Tezuka Y. Methods for estimating respiration rates of plankton and bacteria in natural waters // *Techniques for the assessment of microbial production and decomposition in fresh waters*. IBP Handbook 23, Blackwell Scientific Publications. Oxford – London, 1972. P. 16 – 18.
465. The Langley 8-year Shortwave and Longwave Surface Radiation Dataset, July 1983 – June 1991 // National Aeronautics and Space Administration. Langley Research Center.
466. Trifonova I., Genkal S. Planktonic diatoms of the order THALASSIOSIRALES from Lake Ladoga, its inflows and some lakes in its catchment // *Proceedings of the 18th International Diatom Symposium* (A. Witkowski, ed.). Bristol.: Biopress Limited. 2006. P. 417-429.
467. Trifonova I., Genkal S. Species of the genus *Aulacoseira* Thwaites in lakes and rivers of the Russian North-West (Distribution and ecology) // *Proceedings of the 16th International Diatom Symposium*. Athens. 2001. (A. Economou-Amilli ed.). P. 315-323.
468. Trifonova I., Pavlova O., Rusanov A. Phytoplankton as an indicator of water quality in the rivers of the Lake Ladoga basin and its relation to environmental factors // *Arch. Hydrobiol. Suppl.* 2007. Bd. 167, N 3-4. S. 527-549.
469. UNESCO/SCOR. Monographs on oceanographic methodology. Determination of photosynthetic pigments in sea water. UNESCO Paris. 1966. P. 1-69.
470. Vehviläinen B., and Huttunen M. 1997. Climate change and water resources in Finland // *Boreal Environ. Res.* 2, 3–18.
471. Viljanen M., Holopainen A.-L. & Silvennoinen R. Fluorometer measurements and transmission of light in different parts of Lake Ladoga // *Boreal Environment Research*. 1999. Vol. 4. P. 239–244.
472. Vollenweider R.A., Dillon P.I. The application of the phosphorus loading concept to eutrophication research // National Research Council of Canada. NRC Associate Committee on Scientific Criteria for Environmental Quality. 1974. № 13690. 42 p.
473. Vollenweider R.A. Input-output models with special reference to the phosphorus loading concept in limnology // *Schweizerische Zeitschrift für Hydrologie*. 1975. Beih. 37. S. 53–84.
474. Vollenweider R.A. Scientific fundamentals of the eutrophication of lakes and flowing waters with particular reference to nitrogen and phosphorus as factors in eutrophication Paris, Rep. Organization for Economic Cooperation and Development, DAS/CS/68.27. 1968. 159 p.
475. Vollenweider R.A., Munawar M., Stsdelman P. A comparative review of phytoplankton and primary production in the Laurentian Great Lakes // *Journal of the Fisheries Research*

Board of Canada. 1974. № 31. P. 739–762

476. Wetzel R.G. Limnology. Saunders Publishing: Philadelphia, 1982. 365 p.
477. Willen E. Phytoplankton and reversed eutrophication in Lake Malaren, Central Sweden, 1965–83 // *British Phycological Journal*. 1987. № 22. P. 193–208.
478. Woodiwiss F. S. The biological system of stream classification used by the Trend River Board // *Chemistry and Ind.* 1964. Vol. 11. P. 443–447.
479. Yaguchi E.M. Nutrients and productivity as indicators of the thermal effluent-upwelling interactions in Lake Michigan // *Journal of Great Lakes Research*. 1977. Vol. 3, №.1-2, p.57-64.
480. Zelinka M., Marvan P. Zur Prazisierung der biologischen Klassifikation des Reinheit fliessender Gewasser // *Archiv für Hydrobiologie*. 1961. Vol. 57. S. 389–407.