

АКАДЕМИЯ НАУК СССР
КАРЕЛЬСКИЙ ФИЛИАЛ
ОТДЕЛ ВОДНЫХ ПРОБЛЕМ

ЭКОСИСТЕМА ОНЕЖСКОГО ОЗЕРА

И ТЕНДЕНЦИИ ЕЕ ИЗМЕНЕНИЯ

Под редакцией
З.С. КАУФМАНА



ЛЕНИНГРАД
„НАУКА“
ЛЕНИНГРАДСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ
1990

Экосистема Онежского озера и тенденции ее изменения. — Л.: Наука, 1990. — 264 с.

В монографии изложены результаты многолетних комплексных исследований, проведенных на Онежском озере. Уделяется большое внимание гидрофизическим особенностям водоема, динамике его водных масс, тонкой термической структуре приповерхностного слоя. Рассматриваются закономерности формирования химического состава воды и донных отложений, режима биогенных элементов. Характеризуются большинство трофических уровней и изменения их структуры под влиянием антропогенной нагрузки. Анализируется влияние биогенов на развитие токсического процесса. Выявляется тенденция изменения экосистемы озера.

Книга предназначена для лимнологов и других специалистов, интересующихся проблемами охраны окружающей среды. Лит. 288 назв. Ил. 47. Табл. 67.

Рецензенты:

И. В. ВОЛКОВ, С. А. ГОРБАЧЕВ, С. П. КИТАЕВ,
А. М. КУТУЗОВ, Г. В. НОВОСЕЛЬЦЕВ

Научное издание

**ЭКОСИСТЕМА ОНЕЖСКОГО ОЗЕРА
И ТЕНДЕНЦИИ ЕЕ ИЗМЕНЕНИЯ**

*Утверждено к печати
Карельским филиалом Академии наук СССР*

Редактор издательства С. И. Лукомская
Художник В. М. Иванов
Технический редактор М. Л. Гофман

Корректоры О. И. Буркова и Н. В. Романенкова

ИБ № 44143

Набор выполнен в издательстве на наборно-печатающем автомате. Подписано к печати 19.02.90. М-18066 Формат 60 X 90 $\frac{1}{16}$. Бумага офсетная № 1. Печать офсетная. Усл. печ. л. 16.50. Усл. кр.-от. 16.75. Уч.-изд. л. 19.25. Тираж 600. Тип. зак. № 2058 Цена 3 р. 80 к.

Ордена Трудового Красного Знамени издательство „Наука“
Ленинградское отделение. 199034, Ленинград, В-34, Менделеевская лин., 1

Ордена Трудового Красного Знамени Первая типография издательства „Наука“
199034, Ленинград, В-34, 9 линия, 12

Э 1805040700-530
042(02) - 90 447-90, I полугодие

© Коллектив авторов, 1990

ISBN 5-02-024514-3

Онежское озеро — один из крупнейших водоемов нашей страны. Роль его в экономике Северо-Запада СССР весьма значительна. В нем содержатся вековые запасы пресной воды высокого качества, которая используется для водоснабжения населенных пунктов и крупных промузлов, расположенных на его побережье. Кроме того, озеро является важной водно-транспортной магистралью, водохранилищем Верхне-Свирской ГЭС, имеет большое рыбохозяйственное значение, а также служит приемником промышленных, коммунально-бытовых и сельскохозяйственных стоков, загрязняющих его воду. В связи с ростом промышленности антропогенная нагрузка на этот водоем возрастает. Без разработки научных основ рационального использования ресурсов Онежского озера, пока еще сохраняющего олиготрофный характер, вода его необратимо утратит все свои высокие качества.

Онежское озеро характеризуется хорошо выраженной лимнической гетерогенностью, обусловленной не только его огромными размерами, но и особым геологическим строением котловины, неравномерным распределением приточности и различной степенью антропогенной нагрузки.

Озеро обследовалось неоднократно и относится к категории сравнительно полно изученных водоемов. Особенно детально исследованию оно подвергалось в 1964—1967 гг., когда по предложению Совета Министров Карельской АССР была создана Онежская комплексная экспедиция. В ее состав входили Отдел водных проблем Карельского филиала АН СССР, Институт озероведения АН СССР, СевНИОРХ и Петрозаводская обсерватория УГМС. Позднее, в 1970—1971 гг., Отделом водных проблем было предпринято комплексное изучение Кондопожской губы, а в 1976—1980 гг. — Петрозаводской и залива Большое Онего, причем работы на последнем проводились совместно с Зоологическим институтом и Вычислительным центром АН СССР. В 1981—1985 гг. Отделом водных проблем выполнялись комплексные лимнологические исследования Кондопожской и Петрозаводской губ, Петрозаводского и Свирского истока р. Свири. Кроме того, были проведены эпизодические исследования Центрального Онего, Повенецкого и Заонежского заливов, устьевых районов рек, впадающих в озеро, и других его районов. Наблюдениями было охвачено более чем 200 станций.

Комплекс работ предусматривал гидрологические, гидрохимические (включая и химию донных отложений), гидробиологические, охватывающие почти все трофические уровни (бактерио- и фитопланктон, протозойный и макропланктон, бентос), и водохозяйственные исследования. Изучение озера проводилось методом сезонных комплексных съемок по сетке стандартных разрезов и станций почти во всех его районах, а также лабораторных экспериментов. Материалы исследований опубликованы в ряде сборников и коллективных монографий [43, 54, 55, 61, 65, 93–96, 126, 141–143, 147, 162, 163, 256 и др.].

1. ФИЗИКО-ГЕОГРАФИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ОЗЕРА

Онежское озеро – второй по величине после Ладожского пресноводный водоем в Европе, одно из великих озер мира. Оно расположено на путях соединения 4 морей: Балтийского, Белого, Каспийского и Черного.

Озеро и его крупнейший приток р. Илекса – Водла являются верхним звеном водной системы р. Невы. Площадь его бассейна (с учетом самого озера) составляла в естественном состоянии 62 800 км², но после строительства в 1953 г. на р. Свири Верхне-Свирской ГЭС оно стало водохранилищем и площадь его водосбора возросла на 5.5%, достигнув 66 284 км² [267]. Около 70% этой территории относится к Карельской АССР, остальная часть расположена в Архангельской, Вологодской и Ленинградской областях (рис. 1). Площадь одного только водосбора составляет 56 341 км², из них в Карельской АССР – 39 315 км².

Бассейн Онежского озера вытянут в широтном направлении: протяженность его с запада на восток около 300, а с севера на юг – 160–190 км. Озеро делит бассейн на 2 неравные части: большую (64%) западную и меньшую (36%) восточную, с чем связана его правая асимметричность.

Сочетание тектонических процессов в доледниковый период с эрозионно-аккумулятивной деятельностью ледников обусловили сложные геологическое строение и рельеф бассейна. Он расположен на стыке 2 крупных геологических структур (Балтийского щита и Русской плиты), древнейшие кристаллические и метаморфические породы которых архейской, протерозойской и палеозойской эр перекрыты сравнительно небольшой толщей четвертичных отложений. Рельеф характеризуется значительной расчлененностью и большими колебаниями относительных высот, абсолютные отметки меняются от 40 до 300–400 м.

Геологические и геоморфологические факторы наложили отпечаток и на развитие и распределение гидрографической сети. В северной части бассейна реки более молодые, образовавшиеся в период тектонических движений по линиям разломов и понижениям земной коры, с неразработанными порожистыми руслами, большими уклонами. Южные реки более старые, отличаются хорошо выработанными руслами, меньшей озерностью и большей заболоченностью [269].

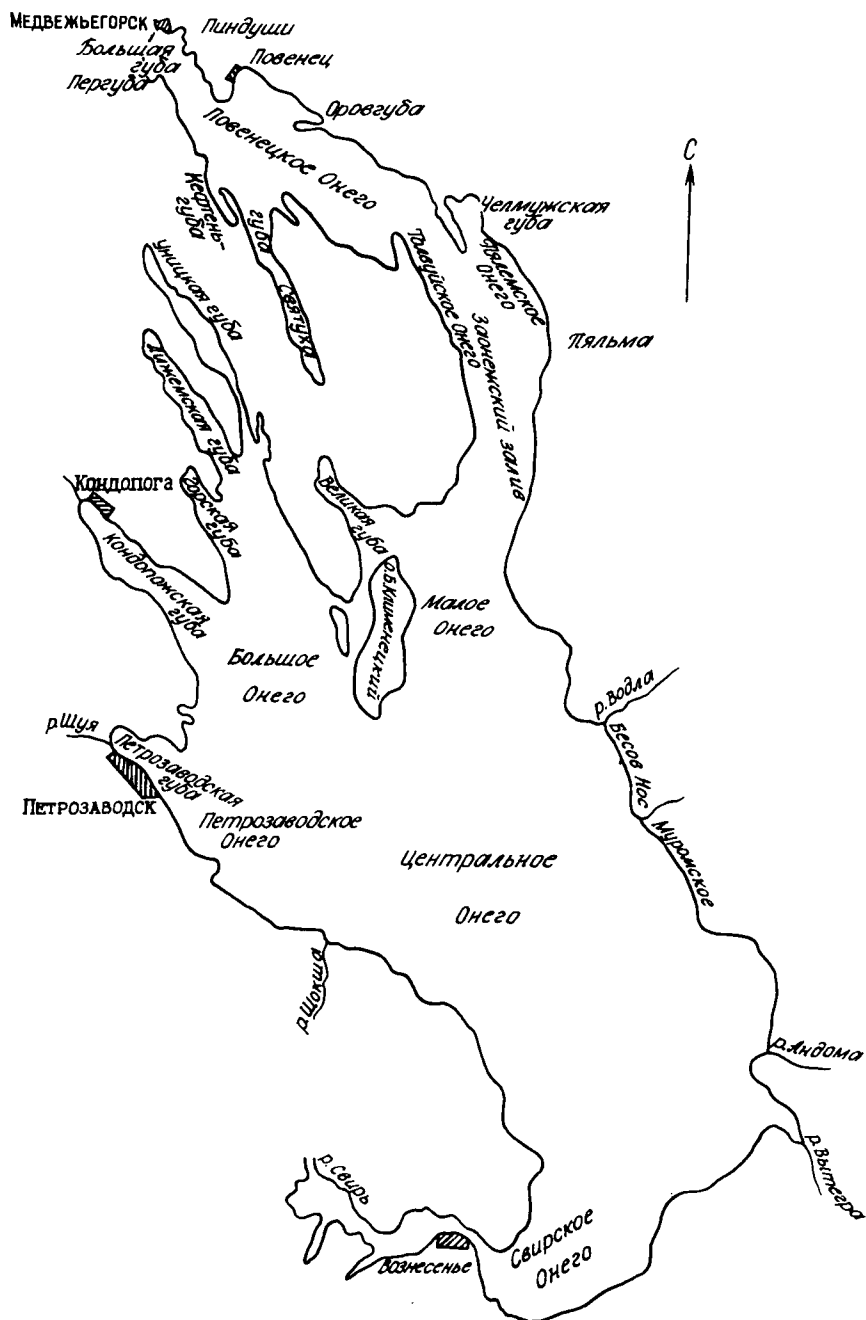


Рис. 1. Карта-схема Онежского озера.

Водную сеть бассейна Онежского озера образуют 6765 рек общей длиной 22 741 км и 9516 озер общей площадью 13 441 км², составляющей 21% от общей площади водосбора. Из водотоков 95% их количества (6422) и 65% длины (14 798 км) приходится на самые малые (длиной менее 10 км), и только 8 рек имеют протяженность более 100 км [270]. Коэффициент густоты речной сети составляет 0,44, причем его значение в северной части значительно выше, чем в южной.

Большую часть водоемов (9144, или 96%) составляют озера площадью менее 1 км², однако в сумме их доля не превышает 5% (671,7 км²) [270]. К наиболее крупным относятся Водлозеро (322 км²), Сямозеро (266), Сандал (185), Палье (109), Лижемозеро (84,8 км²). Озерность в водосборах рек северной части колеблется от 3 до 18, а южной — от 1 до 3%; заболоченность — 5–20%, в бассейне р. Водлы достигает 24% [269].

Притоками Онежского озера являются 1152 реки, из которых лишь 52 имеют длину более 10 км [270]. Основные из них: Шуя (площадь водосбора 10,3 тыс. км²), Водла (9,1 тыс. км²) и Суна (7,7 тыс. км²). Вытекает из озера лишь одна река — Свирь, являющаяся основным притоком Ладожского озера.

Форма Онежского озера отличается крайне сложным строением, характеризуется вытянутостью в меридиональном направлении и сильной изрезанностью береговой линии в северной и северо-западной частях (рис. 2). Площадь его зеркала после превращения в водохранилище почти не изменилась и равна 9692,6 км² (с островами — 9943,3 км²). * Объем водной массы — 291,2 км³. На заливы и губы приходится 25% поверхности озера. Длина между крайними точками его оси равна 290, наибольшая ширина (по параллели) — 82 км. Общая протяженность береговой линии составляет 1810 км [267]. Средняя глубина озера 30, наибольшая — 120 м [128]. Преобладают глубины от 20 до 60 м (на 57% площади озера), 10% его зеркала находится в границах 10-метровой изобаты и относится к литоральной зоне [75].

Котловина Онежского озера расположена в краевой части Балтийского щита на стыке его с Русской плитой и представляет собой сочленение блоков земной коры, имеющих разную геологическую историю [20], что обуславливает ее чрезвычайно сложную структуру. Здесь развиты разные по возрасту и строению породы.

Наибольшее по площади распространение имеют нижнепротерозойские породы (кварциты, карбонатные породы, сланцы, суйсарские вулканиды), слагающие Онежскую мульду, в пределах которой расположена северо-западная, северная и северо-восточная части Онежского озера. Восточное побережье от оз. Муромского до р. Тубы сложено архейскими породами, которые представлены различными по составу гнейсо-гранитами.

* Морфометрические параметры озера даны без учета Ивинского разлива, образовавшегося после наполнения водохранилища на середине участка р. Свири между Онежским озером и створом ГЭС, с площадью зеркала 116–183 км² [269].

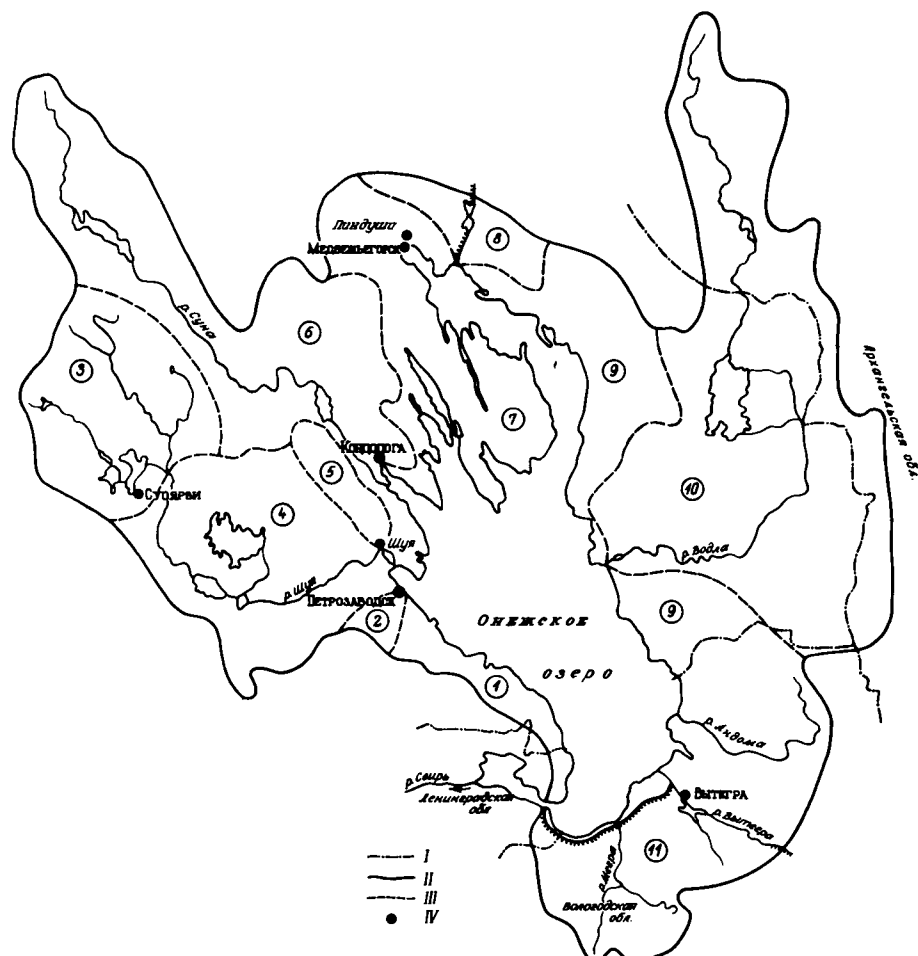


Рис. 2. Гидрография бассейна Онежского озера.

Границы: I — административные, II — бассейна Онежского озера, III — гидрографических районов; IV — узлы промышленного водопотребления. Цифры в кружках — номера гидрографических районов: 1 — юго-западное побережье, 2 — бассейн рек Лососинки и Неглинки, 3 — Верхняя Шуя, 4 — Нижняя Шуя, 5 — Кончезерская группа озер, 6 — бассейн р. Суны, 7 — Заонежье, 8 — бассейн р. Повенецки (ББК), 9 — восточное побережье, 10 — бассейн р. Водлы, 11 — южное побережье.

В юго-западной части побережья Онежского озера от пос. Вознесенье до г. Петрозаводска развиты верхнепротерозойские породы — кварцито-песчаники, перемежающиеся с маломощными слоями алевритов и гравелитов. Южное побережье сложено палеозойскими осадками: на юго-западе это преимущественно глины, на юго-востоке — алевриты и песчаники.

Четвертичные отложения распространены повсеместно, но имеют различную мощность. В северной части котловины и на прилегающих к ней участках она, как правило, не превышает 10 м, в южной достигает 60–80, а на отдельных участках и 120 м. Наибольшие ее значения отмечены в местах развития краевых образований ледника и глубоких понижениях рельефа.

Неоднородность геологического строения котловины Онежского озера в северной и южной частях определяет и ряд геоморфологических особенностей, выражающихся прежде всего в строении береговой линии.

Северная часть котловины расположена в пределах Онежской наложенной мульды, образовавшейся в среднем протерозое и представляющей собой изометрическую структуру с пологим падением крыльев к центру. Внутреннее строение мульды осложнено структурами более мелкого порядка, в результате чего здесь сформировался резко расчлененный рельеф.

В северной части береговая линия сильно изрезана, здесь наблюдаются многочисленные узкие заливы (например, Повенецкий) и губы (Лижемская, Уницкая, Кондопожская и др.). Берега большей частью обрывистые и сложены кристаллическими породами. Все формы рельефа ориентированы с северо-запада на юго-восток — по направлению движения ледника. Отличительной чертой северной части является и большое количество островов, особенно в Уницкой губе, Кижских шхерах, Повенецком заливе. Всего в озере насчитывается около 1500 островов.

Южная часть котловины озера приурочена к грабену, который представляет собой опущенный по разломам свод Восточно-Онежского поднятия. Берега здесь плоские, с плавной, слабо расчлененной береговой линией, часто заболоченные, островов мало.

Две резко различные морфоструктурные зоны выделяются в строении не только побережья, но и дна озера. Для северной половины характерен чрезвычайно сложный и контрастный рельеф дна: глубокие впадины (90–100 м) сочетаются с грядовыми возвышенностями, глубины над которыми всего 1–1.5 м. Крутые подводные склоны имеют наибольшее падение в Большом Онеге и в западной части Центрального.

В пределах развития южной морфоструктурной зоны наблюдается совершенно иная картина. Рельеф дна ровный, глубины не превышают 50 м. Изобаты 10–30 м проходят параллельно берегу, за исключением мелководного участка (глубины менее 10 м) у истока р. Свири. Характерно широкое развитие мощной толщи озерно-ледниковых и озерных отложений в отличие от северной части, где они маломощны или отсутствуют. Отмеченная особенность вызвана тем, что северная и южная части образовались в разное время и развивались в обстановке с неодинаковым тектоническим режимом. Формирование котловины в северной части, находящейся на Балтийском щите, происходило на фоне преобладающих поднятий, а южной, расположенной на Русской плите, — преобладающих погружений.

Обе части разделяет приуроченная к стыку щита и плиты переходная зона, сочетающая элементы как той, так и другой. Граница ее проходит приблизительно по разрезу устье р. Шуи—устье р. Водлы.

По характеру рельефа побережье Онежского озера можно разделить на несколько районов [19]. Юго-западный возвышенный район, расположенный вдоль юго-западного побережья озера, включает северное окончание Олонецкой возвышенности и Шокшинскую гряду (высота 100–200 м), простирающуюся от пос. Шокша до пос. Вознесенье. Северо-западный сельговый район охватывает побережье озера от Шуйской равнины на юге до г. Медвежьегорска на севере. В его состав входят все крупные острова и полуострова озера. Он отличается крайне расчлененным рельефом, ориентировкой всех форм последнего с северо-запада на юго-восток и наличием узких длинных гряд (сельг). Абсолютные высоты обычно не более 200 м. Северо-восточный равнинный район занимает северо-восточное побережье Повенецкого залива и представляет собой довольно ровную местность, часто заболоченную. Равнинность территории местами нарушают выходы кристаллических пород фундамента и флювиогляциальные отложения — озы и камы. Южный низменный район простирается от оз. Муромского до пос. Вознесенье. Это низменная заболоченная равнина с большим количеством остаточных озер.

В результате зарегулирования стока среднегодовой уровень Онежского озера повысился приблизительно на 30 см, а сроки наступления характерных уровней стали запаздывать. По средним многолетним данным, в зарегулированном состоянии минимальный уровень стал отмечаться на 17, а максимальный — на 23 сут позже [217]. В целом же гидрологический режим изменился мало.

Ледостав на Онежском озере начинается, как правило, в конце ноября—начале декабря с замерзания мелководных участков и губ. К середине декабря лед устанавливается над глубинами 20–30, а к концу месяца — до 50 м. Открытая глубоководная часть из-за большого запаса аккумулированного летом тепла и сильного ветрового волнения замерзает только в конце января, причем в мягкие зимы участки Большого и Центрального Онега с глубинами более 70 м могут остаться незамерзшими. Нарастание льда наиболее интенсивно происходит в первые 2–3 декады после установления ледяного покрова. В конце марта его толщина достигает максимальной величины, которая в среднем составляет 55–65 (до 90–100) см [131].

Очищение озера от льда происходит в более короткие сроки. Вскрываться оно начинает в устьях рек в конце апреля. Большая часть площади озера очищается во 2-й декаде мая в течение недели. Самое раннее вскрытие отмечалось в середине апреля, самое позднее — в начале июня.

Среди атмосферных процессов, обуславливающих термодинамический режим Онежского озера, важнейшим является поле ветра. Ветровой режим над водоемом зависит от общей циркуляции атмосферы и тесно связан с особенностями распределения барических центров повышенного в течение всего года давления в южной части европейской

территории страны и резко выраженной сезонной смены давления в северной, где в холодный период преобладает пониженное, а в теплое время — повышенное давление. По этой причине над озером доминируют ветры от южного до западного направлений. В холодный период из-за больших горизонтальных градиентов давления отмечаются более устойчивые сильные ветры, в летнее время с уменьшением разницы давлений они ослабевают. В июне—июле среднемесячная скорость ветра минимальна и составляет 4–5 м/с, в августе—сентябре наблюдается ее увеличение до 6–7, а с октября по декабрь — до 7–9 м/с [15, 110, 201].

Кроме общих циркуляционных факторов большое влияние на поле ветра над водоемом оказывает орография. Многочисленные заливы и губы, вытянутые преимущественно с северо-запада на юго-восток, искажают ветровой поток у поверхности земли, направляя его вдоль оси заливов и высоких берегов.

Вместе с тем Онежское озеро, являясь крупным водоемом, обуславливает местную циркуляцию воздуха, которая приводит к образованию в летнее время бризов, возникающих из-за неравномерного нагревания и охлаждения водной массы и суши в разное время суток. Их действие распространяется на 3–10 км в сторону озера и до 20 км в глубь побережья [64].

2. СОВРЕМЕННАЯ СТРУКТУРА И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ВОДНОГО ХОЗЯЙСТВА В БАССЕЙНЕ ОЗЕРА

Основными факторами, определяющими современное состояние экосистемы Онежского озера, являются масштабы и характер антропогенной деятельности на его водосборе. В первую очередь это объем и качество сточных и дренажных вод, поступающих как с речным притоком, так и непосредственно в водоем. Исходя из этого и дан анализ настоящего положения и перспектив развития водного хозяйства в его бассейне.

Важнейшей природной предпосылкой развития экономики рассматриваемого региона служат водные ресурсы. Наиболее значимый их вид – ресурсы речного стока, являющиеся основной базой современного и перспективного функционирования народного хозяйства внутренних районов бассейна. Это обстоятельство определило необходимость предварить анализ хозяйственного использования воды краткой характеристикой водоресурсной основы.

Гидрологическая изученность бассейна Онежского озера является одной из наиболее высоких на европейском Севере. Наблюдения за режимом рек были начаты в 90-х гг. прошлого столетия. В настоящее время фактические наблюдения за стоком в озеро ведутся на площади около 36.6 тыс. км² (71% территории).

Благоприятное сочетание климатических и физико-географических условий – значительные осадки (650–750 мм), малые величины испарения (около 400 мм), расчлененный рельеф с большим количеством замкнутых впадин и относительная близость водонепроницаемых пород – способствовало формированию большого числа рек и множества озер. Значительная озерность определяет не только структуру гидрографической сети, но и специфический режим рек: озера действуют как водохранилища, выравнивая сток во времени. Коэффициент естественной зарегулированности стока колеблется по речным бассейнам от 0.5 до 0.85.

По распределению стока внутри года реки бассейна относятся к восточноевропейскому типу, характеризующемуся высоким половодьем, низкими летней и зимней меженьями и повышенным стоком осенью. С учетом озерности внутригодовое распределение стока можно принять следующим: весна – 42–55%, лето–осень – 37–43 и зима – 8–25%. Значения среднемноголетнего годового стока по бассейну Онежского озера изменяются в пределах 8–14 л/(с·км²), хотя

в отдельных речных бассейнах с искусственно зарегулированным стоком наблюдаются модули до 15–16 л/(с·км²). Пространственная изменчивость годового стока определяется неоднородностью геоморфологического строения бассейна, гидрогеологических условий, различиями в растительном покрове и неравномерностью выпадения осадков по территории.

Особенностью зоны избыточного увлажнения является тесная связь стока с осадками. Коэффициент корреляции между ними за гидрологический год колеблется от 0.8 до 0.9. Основные водостоки бассейна – реки Водла, Шуя, Суна, Андома. Сток этих рек составляет примерно 60% от общего притока в озеро. Распределение водных ресурсов по основным водосборам и гидрологические характеристики рек представлены в табл. 1.

Водные ресурсы за среднемноголетний период и за год с 95%-ной обеспеченностью оценены для 71% площади водосбора Онежского озера по гидрометрическим измерениям, для остальной территории – путем гидрологических расчетов. Суммарный среднемноголетний годовое стока в Онежское озеро равен 17.8 км³, сток, формирующийся в пределах КАССР, составляет 72% от него. В маловодный год с 95%-ной обеспеченностью ресурсы снижаются до 11.4 км³.

Водообеспеченность населения водными ресурсами в бассейне очень высокая, изменяется по частным водосборам в широких пределах – от 28 м³/сут на 1 чел. в бассейне Нижней Шуи до 422 в бассейне рек Кумсы и Вички. В среднем по бассейну водообеспеченность равна 127 м³/сут на 1 чел.

Коэффициент использования стока, показывающий соотношение водных ресурсов и потребности в воде, оценивается десятками долями процента от величины всех водных ресурсов и только в бассейне р. Суны достигает 5.6%.

Водное хозяйство бассейна Онежского озера представлено водопотребителями (промышленность, коммунально-бытовое, сельское и рыбное хозяйство, рекреация) и комплексом водопользователей (гидроэнергетика, водный транспорт, лесосплав, рыбное хозяйство, рекреация, лесная и сельская мелиорация). Водные объекты бассейна являются также приемниками сточных и дренажных вод.

Потребление воды на нужды народного хозяйства оцениваются в 160.7 млн м³ (1988 г.). Ведущий водопотребитель в бассейне – промышленность (63.7%), имеющая многоотраслевую структуру: целлюлозно-бумажная, деревообрабатывающая, лесозаготовительная, машиностроительная и металлообрабатывающая, строительных материалов, легкая, пищевая. Но ведущая роль в промышленном водопотреблении принадлежит целлюлозно-бумажному производству (68%), представленному Кондопожским ЦБК, Медвежьегорским канифольно-экстракционным заводом (КЭЗ) и Суоярвской картонной фабрикой.

Вторым по объему водопотребления является коммунально-бытовое хозяйство, включающее в себя и рекреацию (29.3%). На территории бассейна проживает 499 тыс. чел., из них в Карельской АССР – 92.5%, в Вологодской и Ленинградской областях – 6.4 и 1.1%

Таблица 1
Ресурсы речного стока бассейна Онежского озера

Водосбор	F	Годовой сток				Водообеспеченность населения, м ³ /сут на 1 чел.	Кoeffициент использования стока, %
		средний		в год с 95 %-ной обеспеченностью			
		М, л/(с·км ²)	Q, м ³ /с	W	Q, м ³ /с		
Всего по бассейну Онежского озера	$\frac{52.8}{100}$	—	—	$\frac{17.8}{100}$	—	$\frac{11.4}{100}$	1.7
В том числе бассейн рек:							
Шуя	$\frac{10.3}{19.5}$	9.4	96.8	$\frac{3.06}{17.2}$	5.4	$\frac{1.76}{15.4}$	0.9
Суны	$\frac{7.67}{14.5}$	10.3	79.0	$\frac{2.49}{14.0}$	6.0	$\frac{1.45}{12.7}$	5.6
Водны	$\frac{13.7}{25.9}$	10.1	138.0	$\frac{4.36}{24.5}$	5.9	$\frac{2.55}{22.4}$	0.12

Примечание. F — общая площадь бассейна Онежского озера: над чертой — км² · 10³, под чертой — % от общей площади; M — модуль стока; Q — суммарный среднемесячный годового стока; W — объем стока; W — суммарный среднемесячный годового стока: над чертой — км³, под чертой — % от общего стока.

соответственно (по данным переписи 1989 г.). Статус городских поселений имеет 20 населенных пунктов (6 городов и 14 поселков городского типа), в которых проживает свыше 80% населения бассейна. Города, за исключением Петрозаводска, где насчитывается 269.9 тыс. чел. (54% всего населения бассейна), относятся к категории малых, с населением до 37 тыс. чел.

На современном этапе развития рыбное и сельское хозяйства не являются крупными водопотребителями — их доля составляет 4.9 и 2.1% соответственно. Сельскохозяйственное производство представлено 24 совхозами, 6 колхозами и 3 птицефабриками, поставляющими мясомолочную продукцию, пушнину, птицу, овощи и картофель, а также подсобными хозяйствами. Основным водопотребителем в этой отрасли является животноводство, чьи предприятия снабжаются водой в основном через свои системы. К рыбному хозяйству относятся 2 предприятия: рыбоводный завод по выращиванию посадочного материала ценных видов промысловых рыб в п. г. т. Шуя и комбинат по выращиванию товарной рыбы в бассейне Нижней Шуи.

Водопотребление учреждений туризма, отдыха и санаторно-курортного лечения незначительно. По территории они распределены неравномерно и концентрируются в основном в пригородной зоне наиболее крупного поселения бассейна Онежского озера г. Петрозаводска. Основным водопотребителем здесь являются садоводческие товарищества, занимающие площадь около 1400 га. Их количество увеличилось с 92 в 1980 г. до 161 в 1985-м и продолжает расти.

Развитие отраслей народного хозяйства, увеличение объемов водопотребления обуславливают и рост количества сбрасываемых сточных вод. По данным на 1988 г., в водные объекты бассейна поступило всего 145.2 млн м³ сточных вод; структура водоотведения по отраслям народного хозяйства следующая (в скобках — %):

Коммунально-бытовое *	39.1 (26.9)
Промышленное	97.4 (67.1)
Сельскохозяйственное	0.8 (0.6)
Рыбохозяйственное	7.9 (5.4)

* С учетом рекреационных учреждений (санатории, базы отдыха и т. д.).

Основной объем сточных вод поступает в водные объекты от промышленных предприятий. Значительным источником загрязнения является и коммунальное хозяйство. С развитием канализационных систем, повышением комфортности жилого фонда коммунально-бытовое водоотведение будет постоянно расти. Рыбное хозяйство не является крупным загрязнителем, по качеству его стоки относятся к категории нормативно чистых без очистки. Стоки сельскохозяйственных предприятий незначительны по объему (0.6%), но являются серьезным фактором загрязнения природных вод. Кроме того, большинство предприятий расположено в пределах водоохраных зон.

Расположение народнохозяйственных объектов-водопотребителей на территории бассейна показано на рис. 3. Необходимо отметить, что преобладающая часть водопотребителей тяготеет к устьевым участкам

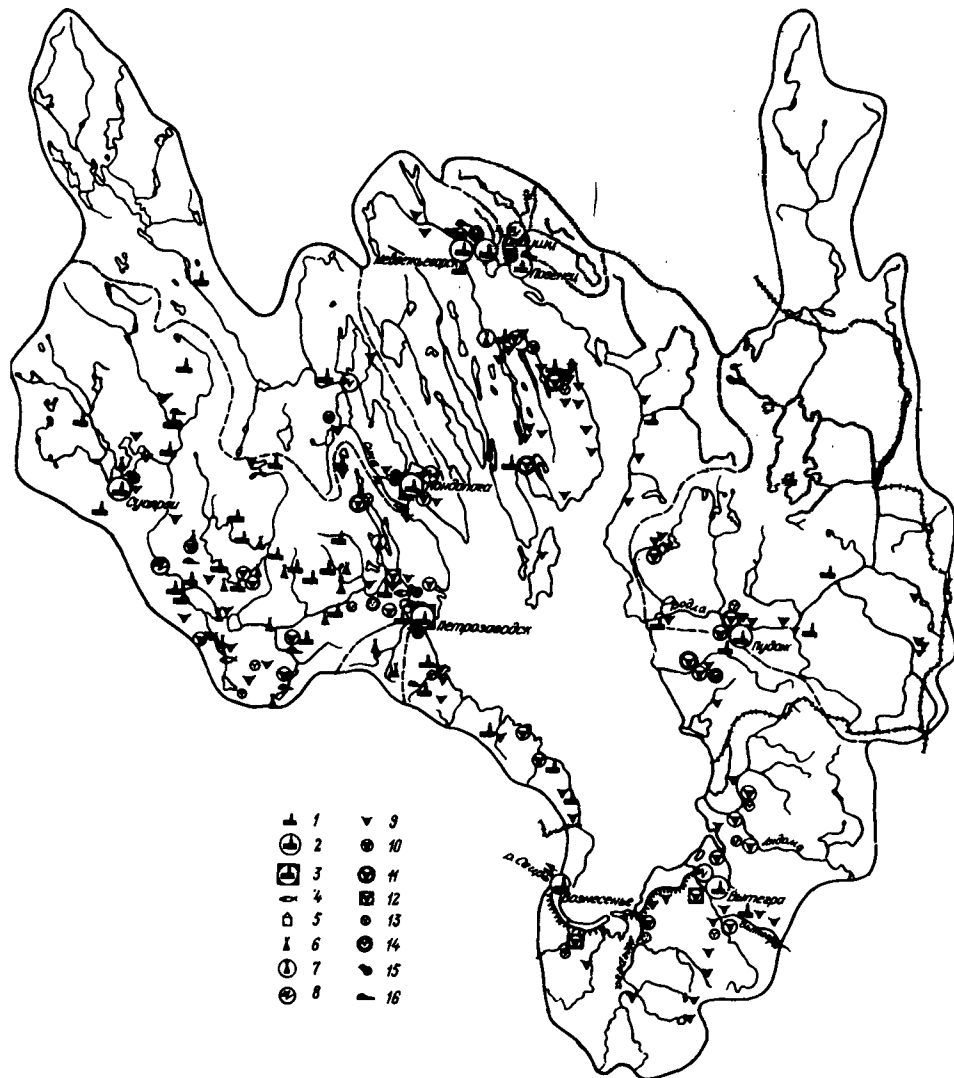


Рис. 3. Размещение объектов водопотребления.

1 – промышленные предприятия, 2 – промышленные узлы, 3 – крупные промышленные узлы, 4 – рыбозаводы, 5 – тепличные хозяйства, 6 – рекреационные предприятия, 7 – комплексы рекреационных предприятий, 8 – ГЭС. Фермы КРС с поголовьем: 9 – до 500, 10 – от 501 до 1000, 11 – от 1001 до 2000, 12 – свыше 2000; 13 – свинофермы; 14 – свинотоварные комплексы; 15 – птицефермы; 16 – зверофермы.

рек и побережью Онежского озера. В поселениях, расположенных на побережье, проживает $\frac{3}{4}$ населения, на них приходится около 90% общего водопотребления.

В табл. 2 приведено распределение объемов сточных вод по частным водосборам бассейна.

Таблица 2
Водоотведение (млн м³) в бассейне Онежского озера

Частные водосборы	Отведение вод				Применянки сточных вод		
	всего	в том числе			реки	озера	в том числе Онежское озеро
		нормативно чистых без очистки	загрязненных без очистки	пропущенных через КОС			
Верхняя Шуя	2.7	0.1	0.4	2.2	0.2	2.5	-
Средняя Шуя	0.9	0.6	0.1	0.2	0.2	0.7	-
Сямозеро	0.2	-	-	0.2	0.2	-	-
Нижняя Шуя.	8.2	7.3	-	0.9	7.7	0.5	-
Суна	76.1	3.2	4.9	68.0	0.2	75.9	75.5
Водла	1.0	0.25	0.75	-	0.8	0.2	-
Вытегра	0.4	-	0.05	0.35	0.4	-	-
Всего по бассейну:	145.2	12.8	11.3	121.1	10.3	134.9	130.5
Кроме того, дренажные и ливневые воды	6.2	-	-	6.2	-	6.2	6.2

Таблица 3
Сосредоточенные выпуски сточных вод (млн м³) на побережье Онежского озера

Промузел	Объем сточных вод						Приемники сточных вод			
	всего	в том числе		прошедших через КОС		реки	озера	в том числе Онежское озеро		
		без очистки		всего	в том числе биологических					
		загрязненных	нормативно чистых							
Петрозаводский	49.9	1.0	1.1	47.8	44.9	0.3	49.6	49.6		
Медвежьегорский*	4.9	4.0	0.2	0.7	0.7	-	4.9	4.9		
Кондопожский	75.5	4.7	3.2	67.6	62.8	-	75.5	75.1		
Повенецкий	0.2	-	-	0.2	0.2	-	0.2	0.2		
Рыборецкий	0.1	0.1	-	-	-	-	0.1	0.1		
Шокшинский	0.2	-	-	0.2	0.2	0.1	0.1	0.1		
Шелтозерский	0.1	-	-	0.1	0.1	-	0.1	0.1		
Янинольский	0.4	-	-	0.4	0.4	-	0.4	0.4		
Прочие	0.1	0.1	-	-	-	-	0.1	0.1		
Итого:	131.3	9.8	4.5	117.0	109.3	0.4	130.9	130.5		
Кроме того, дренажные и ливневые воды	6.2	-	-	6.2	5.7	-	6.2	6.2		

* Включая п. г. т. Пиндуши.

Непосредственно в Онежское озеро через сосредоточенные выпуски промузлов поступило 130.5 млн м³ сточных вод, или более 87% от общего объема водоотведения в бассейне (табл. 3).

Снижению вредного воздействия стоков на природные воды, улучшению санитарного состояния водных объектов способствует строительство канализационных очистных сооружений (КОС). По данным на 1988 г., через очистные сооружения было пропущено 127.3 млн м³ сточных, дренажных и ливневых вод (84.1%), в том числе через биологические очистные — 119 млн м³ (см. табл. 2). Размещение КОС по территории бассейна представлено на рис. 4. В связи с неэффективной работой КОС весь объем сточных вод, прошедших очистку, отнесен к категории недостаточно очищенных. Кроме того, количество стоков, сброшенных без очистки, составило 11.3 млн м³ (см. табл. 2). Таким образом, в водные объекты бассейна в 1988 г. поступило 132.4 млн м³ (91.2%) сточных вод, загрязненных в той или иной степени.

Каждый кубометр сточных вод, поступающих в водные объекты, загрязняет десятки и даже сотни кубометров чистой природной воды. Фактическое водопотребление должно учитывать не столько количество свежей воды, используемой для нужд народного хозяйства, сколько объемы загрязняемых природных вод (экологическое водопотребление). Расчеты, проведенные по минимальным нормативам (10-кратное разбавление для нормативно чистых без очистки вод и 50-кратное — для загрязненных и недостаточно очищенных), показали, что экологическое водопотребление составило 7900 млн м³ (69% от годового стока при 95%-ной обеспеченности).

Развитие отраслей народного хозяйства обуславливает привлечение все больших объемов свежей воды для удовлетворения нужд населения, промышленности, сельского и рыбного хозяйства, рекреации. Расчеты показывают, что к 2000 г. для этих целей будет использоваться 205 млн м³ воды, несмотря на проводимые и планируемые мероприятия по водосбережению. Соответственно возрастут и объемы водоотведения.

Повышение уровня комфортности жилого фонда, развитие сферы обслуживания создают предпосылки для дальнейшего развития коммунального хозяйства. Объем сбрасываемых бытовых сточных вод возрастет до 60 млн м³. Нарастание промышленного производства базируется в основном на существующем его размещении. Предполагается реконструкция Медвежьегорского КЭЗ со строительством цеха древесностружечных плит и прекращением канифольно-экстракционного производства, внедрение двухступенчатой варки и увеличение водооборота на Кондопожском ЦБК, ввод в эксплуатацию систем повторного и оборотного водоснабжения на предприятиях Петрозаводского промузла. При условии экономии в использовании воды на производственные нужды объем промышленных стоков составит свыше 109 млн м³.

Выполнение Продовольственной программы вызовет дальнейший рост сельскохозяйственного производства, при этом ожидаемый объем водоотведения будет равен примерно 2 млн м³. В связи со снижением рыбопродуктивности многих естественных водоемов возрастает роль

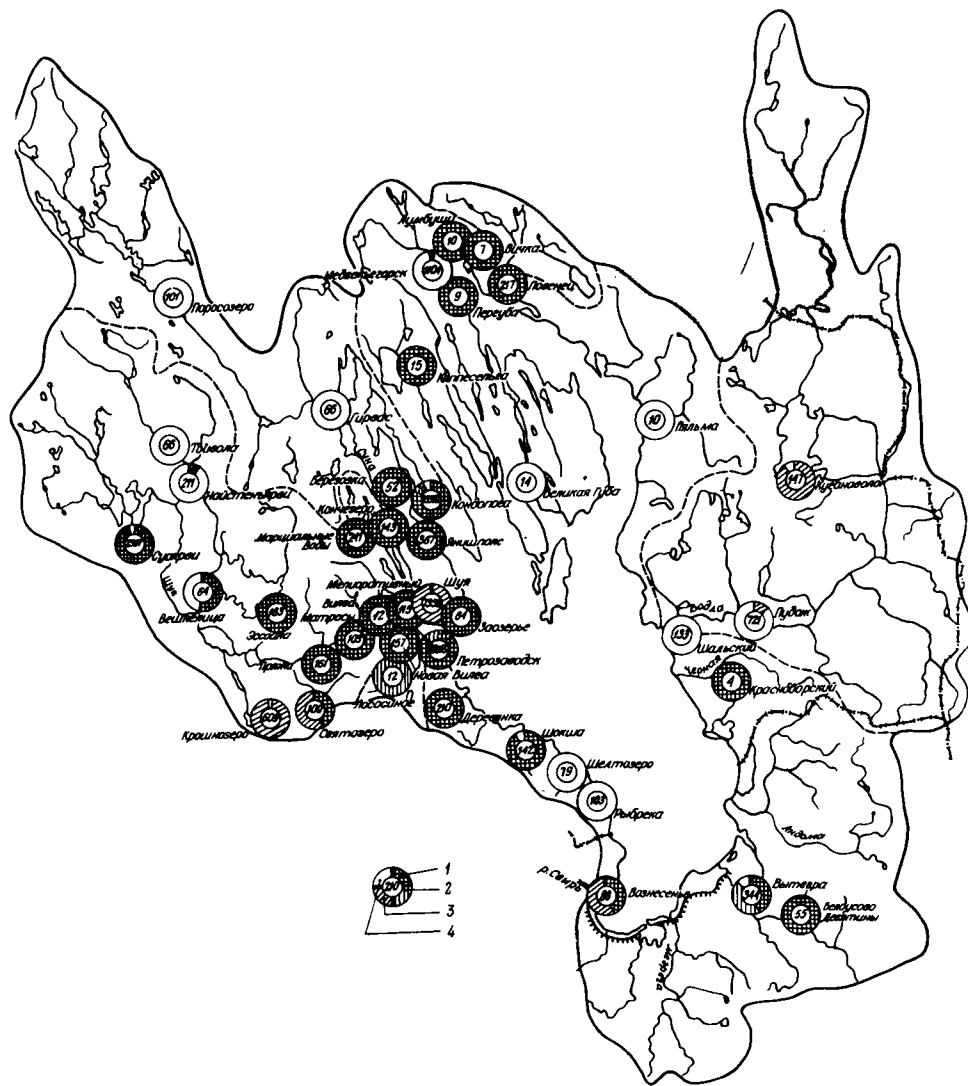


Рис. 4. Сточные воды (объем 210 тыс. м³) и их очистка.

Очищены: 1 – биологически, 2 – механически; 3 – нормативно чистые воды, 4 – без очистки.

товарного рыбоводства. Планируется проведение ряда мероприятий для развития рыбного хозяйства на внутренних водоемах. Возможный расход воды, а следовательно, и сточных вод достигнет 12 млн м³.

Таким образом, в перспективе объем водоотведения в бассейне Онежского озера возрастет до 183 млн м³. Непосредственно в озеро поступит порядка 155 млн м³ сточных вод (84.7%). Все сосредоточенные

Таблица 4
Основные характеристики лесосплава

Водный объект	Вид сплава	Протяженность, км	Объем по пуску, м ³ (1988 г.)	Максимальная продолжительность, сут
Реки:				
Колода	Молевой	50	57.7	25
Рагнукса	„	36	57.1	24
Водла	„	93	1004.4	148
			Проплав	–
			Судовой	–
Онежское озеро (в пределах КАССР)	„	–	239.5	–
			Плотовой	–
			659.6	–
Реки:				
Самина	Молевой	18	80.0	18
Андома	Плотовой	18	Нет сведений	

выпуски сохраняются на перспективу, получают развитие Пяльмский и Шальский промузлы, Великогубский и Толвуйский сельскохозяйственные центры. При условии нормативной очистки всех сбрасываемых вод экологическое водопотребление уменьшится до 1830 млн м³ (16% годового стока при 95%-ной обеспеченности).

На качество воды поверхностных источников оказывают влияние и водопользователи, основными из которых являются лесосплав, лесная и сельскохозяйственная мелиорация.

Лесосплав до недавнего времени был одним из ведущих водопользователей в системе водного хозяйства бассейна Онежского озера. В связи с исчерпанием лесных ресурсов и переходом на сухопутную транспортировку леса к настоящему времени сплав молею осуществляется только по р. Водле, ее притокам Рагнуксе и Колоде, р. Самине (см. рис. 2), причем сплавная навигация на реках Рагнуксе и Колоде была последней. Ниже сплотно-формировочных рейдов, которые располагаются в 28 км от устья р. Водлы, при впадении р. Самины в р. Андому (18 км от устья), в 2 км от устья р. Мегры, сплав леса осуществляется в плотах.

Для улучшения прохождения молевого сплава созданы водохранилища, регулирующие сток рек в период сплавной навигации. Сведения о протяженности сплавных путей, видах и сроках сплава приведены в табл. 4.

Согласно постановлению Совета Министров РСФСР, молевой сплав древесины в бассейне Онежского озера должен быть полностью прекращен в 1995 г. На р. Самине последний сплав планируется провести в 1990 г. К 1992 г. на реках Вологодской области в пределах Онежского бассейна должны быть полностью ликвидированы последствия сплава. На территории Карельской АССР в 1989 г. Кареллеспромом расчищено и сдано органам Госнадзора 738 км рек и озер. Однако некоторые эксперты считают, что прекращение молевого сплава по р. Водле

Т а б л и ц а 5
Интенсивность лесосушения в бассейне Онежского озера
по состоянию на 1.01.1989 г.

Район	Площадь осушенных земель	
	га	% от площади района
Вологодская область	—	—
Архангельская область:	—	—
от южной границы КАССР до бассейна р. Лососинки	11387	10.0
бассейны рек Лососинки и Неглинки	5545	15.9
бассейн р. Шуи, в том числе:	123839	12.0
Верхняя Шуя	41025	9.7
Средняя Шуя	38881	13.7
Сямозеро	28324	15.6
Нижняя Шуя	15314	13.1
Кончезерская группа озер	295	0.7
бассейн р. Суны	50295	6.6
Заонежье:	8014	1.8
бассейны рек Кумсы и Вички	3600	4.2
Восточное побережье:	30636	6.7
бассейн р. Водлы	32661	3.6
бассейны рек Черной и Муромки	15012	15.0
Всего:	280989	5.4

к 1995 г. нереально, так как выполнение вышеуказанного постановления не обеспечено серьезной материальной базой. Реальные сроки перехода на сухопутную транспортировку древесины находятся за пределами 2000 г.

С конца 50-х гг. в связи с исчерпанием лесных ресурсов в Карелии осуществляется систематическая осушительная мелиорация заболоченных территорий. Интенсивные лесомелиоративные работы в бассейне Онежского озера начались с 60-х годов. К настоящему времени (на 1.01.1989 г.) осушено 281 тыс. га заболоченных земель, что составляет 5.4% от площади бассейна (без площади Онежского озера). На территории Архангельской и Вологодской областей лесомелиоративное строительство не проводилось и в ближайшее время не планируется. Водосбор Онежского озера в пределах КАССР осушен на 7.2%. Значительного увеличения лесосушительных работ в дальнейшем не предполагается, в основном будет проводиться реконструкция существующих систем. Распределение осушенных земель по отдельным районам бассейна представлено в табл. 5.

Для нужд сельского хозяйства в бассейне осушено 27 тыс. га земель (1988 г.), основные площади которых расположены в среднем и нижнем течении р. Шуи, Заонежье и на восточном побережье озера. С учетом

целевой комплексной программы Карельской АССР на 1985—1990 гг. „Земля-90” эта цифра к 1990 г. составит свыше 35 тыс. га.

Одним из важных направлений мелиоративных работ в зоне избыточного увлажнения признано орошение. Однако двустороннего регулирования увлажнения в настоящее время в бассейне Онежского озера не проводится, площади земель, нуждающихся в таком мероприятии, не установлены, и определить объемы воды на орошение не представляется возможным.

Результаты выполненных водохозяйственных исследований в дальнейшем послужат базой для разработки научных основ комплексного использования и охраны водных ресурсов бассейна Онежского озера.

3. ГИДРОЛОГИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ОЗЕРА

3.1. Водный баланс

Онежское озеро дренирует значительную территорию с разнообразным рельефом, различную по геологическому строению, орографии и гидрографии, находящуюся под влиянием преимущественно атлантических и арктических воздушных масс. В отличие от озер Ладожского и Ильмень Онежское имеет большую асимметричность бассейна, резко различные по густоте речную и озерную сети в его южной и северной частях. Основной водосбор сосредоточен в его северной части.

Водный баланс Онежского озера, превратившегося в водохранилище, является показателем вариации климатических и гидрологических условий в сформировавшихся экосистемах водохранилища и его бассейна.

Рассматриваемый ниже водный баланс и его составляющие рассчитаны за 32-летний зарегулированный период с 1953 по 1984 г. и дополняют ранее опубликованные данные [123, 269–274]. Для характеристики режима уровня воды водохранилища, отражающего совокупность изменения всех элементов водного баланса, были вычислены его среднемесячные и годовые, наименьшие и наивысшие значения по 18 водомерным постам. Среднеголетний уровень водохранилища определен по тяготеющим площадям и равен 33.07 м БС (Балтийская система). Наивысший уровень наблюдался на 26 см ниже нормального подпорного горизонта (НПГ) и равен 33.74 м БС, а наименьший — 32.42 м БС. Наибольшая амплитуда между наивысшим и наименьшим годовыми уровнями составила 132 см (1960–1961 гг.), а наименьшая — 35 см (1960 г.).

Приток. Приток воды в водохранилище зависит от процессов, происходящих в его бассейне, рельефа, развития речной сети и ее водности.

Онежское озеро, являясь базисом эрозии для всего бассейна, принимает сток с водосборной площади 56 341 км². Учет его ведется на 33 реках и 4 каналах: Беломорско-Балтийском у пос. Повенец, Волго-Балтийском (шлюз-6 и ГЭС-31 на р. Вытегре) у г. Вытегра, Пионерском (Пальеозерская ГЭС) и Кондопожском (Кондопожская ГЭС).

Приток воды в водохранилище учитывался как на основных 6 реках (Водла, Шуя, Суна, Кумса, Андома, Мегра), так и на более мелких, впадающих непосредственно в водохранилище, по 29 замыкающим

гидростворам с площадью 40 598 км², составляющей 72% от общего водосбора. В том числе с площади 9395 км² учет притока осуществлялся на ГЭС и шлюзах, с территории 31 203 км² — по гидрометрическим измерениям и с остальной площади 15 988 км², для которой нет данных измерений, — путем гидрологических расчетов.

Среднеголетние модули стока изменяются от 8 л/(с·км²) в северо-западной до 14 в юго-восточной части бассейна. Коэффициент изменчивости C_v годового притока в водохранилище составляет 0.24, а асимметрии C_s для большинства рек равен 0.70 и южных притоков — 0.50. В общий поверхностный приток включен и подземный, поэтому данные о нем отдельно не приводятся.

Сток с устьевых участков рек ниже замыкающих гидростворов, где не проводилось измерений расходов, а также с неизученных рек получен по карте модулей стока и графически по связи $Q = f(F)$, построенной по среднемесячным и годовым расходам воды (Q — объем стока, F — площадь водосбора).

Средний годовой приток воды в Верхне-Свирское водохранилище за 1953–1984 гг. с водосбора равен $17\,600 \cdot 10^6$ м³, или 1760 мм слоя на площадь водного зеркала.

Сток. Масса воды, поступающая в Онежское озеро поверхностным и подземными путями, а также в виде осадков на зеркало, только частично накапливается в озере. Остальная ее часть, за исключением потери на испарение и подземный отток, сбрасывается через р. Свирь в Ладожское озеро.

Определение стока из озера за расчетный период произведено по выработанной за сутки электроэнергии Верхне-Свирской ГЭС. В общий расход воды через сооружения ГЭС-II включены расходы воды через турбины, водопропускные устройства, на шлюзование, сбросы и фильтрационные потери.

Естественная зарегулированность стока р. Свири Онежским озером мало отличается от таковой р. Невы, сток которой зарегулирован Ладожским озером, что подтверждает сходство коэффициентов зарегулированности их стока — 0.89 и 0.90 соответственно. С образованием водохранилища зарегулированность стока р. Свири повысилась. Весенний сток, при ее естественном состоянии достигавший 28%, понизился до 23, а зимний повысился с 25 до 31%.

Средний годовой сток за расчетный период составил $18\,600 \cdot 10^6$ м³, или 1860 мм.

Осадки. Атмосферные осадки, выпадающие на площадь озера, формируются под влиянием атмосферной циркуляции и рельефа бассейна. Преобладающей воздушной массой в течение года является морской воздух с Атлантики, который обуславливает и большое их количество, которое на возвышенных участках бассейна с северной стороны увеличивается, а с подветренной с переходом к зеркалу водохранилища уменьшается.

Данные о количестве осадков получены по наблюдениям (показания осадкомеров) на 2 островных метеостанциях (Маячный и Василисин), 8 береговых (Петрозаводск, Кондопога, Бор-Пуданцев, Медвежьегорск,

Теребовская, Павликовская, Вытегра и Вознесенье) и 5 гидрометпостях (Лонгасы, Шелтозеро, Кяпсесельга, Черный Наволок, Уница).

Измеренные на островных метеостанциях осадки в теплый период года были приведены к показаниям дождемера, установленного при испарителе ГГИ-3000 на о-ве Маячном, так как их значения были занижены на величины до 10% в связи с их выдуванием ветром. На береговых метеостанциях и постах в осадкомерах, где осадки более защищены от этого, их количество оказалось близким к величине запасов воды в снеге и поэтому в холодный период было принято таким же, без поправки на ветровой недоучет.

Толщина слоя осадков, выпавших на поверхность озера, определялась 3 методами: среднеарифметическим, средневзвешенным по тяготеющим площадям и методом изогнет.

В результате анализа наблюдений было установлено, что наиболее близко к действительному количеству осадков, вычисленное за январь—май и декабрь в 15 пунктах по карте изогнет, а за лето и осень (июнь—ноябрь) — на 2 островных станциях. Эти данные были распространены на всю площадь зеркала водохранилища и приняты при расчетах. Наибольшее годовое количество осадков (861 мм) наблюдалось в 1935 г., а наименьшее (365 мм) — в маловодном 1972 г.

Средний годовой слой осадков за расчетный период с учетом поправки на смачивание был равен 546 мм.

Испарение. При расчете испарения с водной поверхности водохранилища использовалась формула, предложенная А. П. Браславским и З. А. Викулиной [123]:

$$E = 0.14 \cdot \pi (l_0 \cdot l_{200}) \times (1 + 0.72 \cdot W_{200}),$$

где E — испарение, в мм; l_0 — максимальная упругость водяного пара при температуре поверхности воды, в мб; l_{200} — абсолютная влажность воздуха на высоте 2 м, в мб; W_{200} — скорость ветра на уровне 2 м, в м/с; π — число дней в месяце. За основу для расчета испарения были приняты данные островной метеостанции Маячный (кроме температуры воды), приведенные к высоте 2 м.

Температура поверхности воды, отличающаяся в различных частях водоема в осенне-зимний и весенний периоды, использована для расчета испарения как средняя арифметическая 3 выделенных зон (мелководной — от уреза воды до глубины 20 м, средних глубин — от 20 до 40 м и глубоководной — с глубинами более 40 м) и уточнена результатами рейдовых наблюдений береговых постов и показаниями термических разрезов.

Для расчета испарения со снежного покрова и льда водохранилища использована формула П. П. Кузьмина

$$E = 0.24 \cdot \pi (l_n - l_{200}) \times (0.075 + 0.041 \cdot W_{1000}),$$

где E — испарение, в мм; l_n — максимальная упругость водяного пара при температуре испаряющей поверхности, в мб; l_{200} — абсолютная влажность воздуха на высоте 2 м, в мб; W_{1000} — скорость ветра на высоте 10 м, в м/с.

Среднее годовое испарение за расчетный период составило 369 мм. Наибольшее годовое испарение (453 мм) приходится на довольно теплый, с ранней весной 1970 г., а наименьшее (290 мм) — на влажный 1961 г.

Водный баланс. Для анализа водного баланса за расчетный многолетний период были построены интегральные кривые $U_m = \sum_1^m (x_i - \bar{x})$ средних годовых уровней озера и притока воды в него, которые позволили установить, что расчетный 32-летний период охватывает внутривековой цикл с много- и маловодной фазами.

Для расчета водного баланса принято уравнение

$$X + Y_{\text{пр}} + W_{\text{пр}} - Y_{\text{ст}} - E - W_{\text{ст}} = \Delta H,$$

где X — осадки, $Y_{\text{пр}}$ — поверхностный приток, $W_{\text{пр}}$ — подземный приток, $Y_{\text{ст}}$ — сток из водохранилища, E — испарение, $W_{\text{ст}}$ — подземный сток, ΔH — приращение уровня. Так как приток воды в водохранилище и сток из него подсчитаны для каждого месяца и года суммарно с учетом подземного, то последний отдельно не приводится, а уравнение водного баланса принимает вид

$$X + Y_{\text{пр}} - Y_{\text{ст}} - E = \Delta H.$$

Приходная часть баланса складывается из осадков и поверхностного притока, а расходная — из стока и испарения, отнесенных к среднему уровню воды и соответствующей ему площади зеркала водохранилища. Разность между приходом и расходом должна соответствовать накоплению или сработке воды в водохранилище, а при точном учете элементов баланса — приращению уровня воды.

Уравнение водного баланса позволяет контролировать надежность определения его составляющих. Однако наблюдения имеют определенную погрешность, поэтому разность между значениями прихода—расхода и приращением уровня воды при расчете баланса составляет невязку. Вычисленные допустимые невязки за средний многолетний период и характерные по водности годы распределяются между составляющими баланса с учетом точности их определения.

Уравненные водные балансы приведены в табл. 6. Из данных таблицы видно, что средний многолетний приток равен $16\,800 \cdot 10^6 \text{ м}^3$, или 1730 мм слоя. Основной приходной частью баланса является речной приток (75.3%). Доля осадков — 24.7%. Средний многолетний сток составил $18\,600 \cdot 10^6 \text{ м}^3$, или 1920 мм слоя (83.4%), а испарение — 16.6%. Общий объем приходной и расходной части баланса равен $22\,300 \cdot 10^6 \text{ м}^3$, или 2.3 м.

В многоводный 1962 г. в приходной части приток возрос до 79.9%, а доля осадков уменьшилась до 20.1%. В расходной части сток увеличился до 90.8%, а испарение снизилось до 9.2%. Общий объем приходной и расходной частей баланса составил $31\,168 \cdot 10^6 \text{ м}^3$, или 3.1 м.

В отличие от средних многолетних значений составляющих баланса и показателей многоводного 1962 г. в самый маловодный 1960 г. приток

Таблица 6

Средний многолетний уравненный водный баланс Онежского озера за 1953–1984 гг.

Элементы прихода	Объем, 10^6 м^3	Слой, мм	%	Элементы расхода		Объем, 10^6 м^3	Слой, мм	%
				Сток	Испарение			
Осадки	5460	562	24.7	Сток	18600	1920	83.4	
Речной приток	16800	1730	75.3	Испарение	3690	380	16.6	
Общий приход	22300	2300	100	Общий расход	22300	2300	100	
За многоводный 1962 г.								
Осадки	6278	642	20.1	Сток	28283	2892	90.8	
Речной сток	24890	9545	79.9	Испарение	2885	295	9.2	
Общий приход	31168	3187	100	Общий расход	31168	3187	100	
За маловодный 1960 г.								
Осадки	4954	515	30.0	Сток	12592	1309	76.0	
Речной приток	11620	1208	70.0	Испарение	3982	414	24.0	
Общий приход	16574	1723	100	Общий расход	16574	1723	100	

снизился до 70%, сток до 76, а осадки и испарение возросли до 30 и 24% соответственно. Общий объем приходной и расходной частей за маловодный год составил $16\,574 \cdot 10^6 \text{ м}^3$, или 1.7 м.

Онежское озеро, превратившееся в водохранилище, обладает большими запасами пресной воды, которые при среднемноголетнем уровне 33.07 м БС за расчетный период имеют объем 291 км^3 , тогда как средний приток относительно этого объема равен всего 16.8 км^3 (5.7%), осадки 5.5 км^3 (1.8%), сток 18.6 км^3 (6.3%), испарение 3.7 км^3 (1.2%). Общий приход–расход – 22.2 км^3 (7.5% от вековых запасов).

3.2. Изменчивость водного баланса и уровня

До сих пор дискуссионным является вопрос о наличии квазипериодических составляющих, трендов в рядах геофизических данных, в частности элементов водного баланса (ЭВБ) и уровня крупных озер, характеризующих внешний водообмен. Ряд авторов предполагает наличие этих составляющих в спектрах, характеризующих внутри- и межгодовую изменчивость, другие считают, что физически обусловленные, статистически значимые максимумы отсутствуют в спектрах геофизических процессов в тех же временных масштабах [118, 130].

Наблюдения за изменчивостью элементов внешнего водообмена (ЭВБ) и колебаниями уровня озер, а также оценка их спектров были выполнены на основе параметрического спектрального анализа. Непараметрическим же методам оценки нестационарных (частотно-временных и двухчастотных) спектров ЭВБ и уровня озер до сих пор уделялось меньше внимания [199].

Несмотря на то что непараметрический спектральный анализ имеет определенные недостатки при изучении относительно коротких реализаций, применительно к составляющим с временными масштабами в несколько лет он дает возможность получить достоверные оценки при числе степеней свободы n более 20, т. е. при анализе среднемесячных и среднегодовых данных продолжительностью более чем 100 лет, по озерам Онежскому, Ладожскому, Сайма, Пайяне [247].

По скользящим оценкам математического ожидания с осреднением по 21-, 11- и 5-летним участкам можно судить о том, что уровень Ладожского озера за последние 100 лет уменьшался каждые 10 лет на 5 см за счет естественных климатических изменений. Уровень же зарегулированных озер – Онежского и Сайма – испытывает лишь относительно короткопериодные 5–7-летние квазипериодические колебания (рис. 5). Амплитуда колебаний уровня Онежского озера с временными масштабами 5–7 лет примерно в 1.5 раза меньше этого показателя с таким же периодом для Ладожского.

Для изучения структур и динамики вероятностной структуры ЭВБ и колебаний уровня озер применялись нестационарный корреляционный и спектральный анализы. По данным расчетов оказалось, что для осадков, выпадающих в бассейне Онежского и Ладожского озер, выделены колебания с временными масштабами 5–6 лет. С помощью спектров

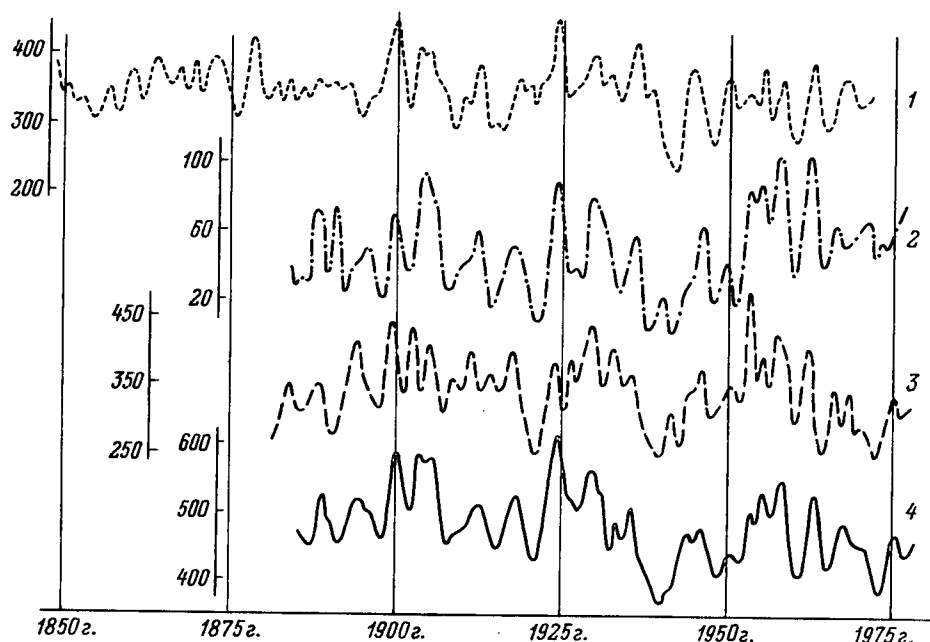


Рис. 5. Изменчивость среднегодовых уровней озер (см.).
1 – Сайма, 2 – Онежское, 3 – Ильмень, 4 – Ладожское.

удалось показать, что это полициклический процесс с преобладанием низкочастотных флуктуаций с $\omega \approx 0.05-0.3$ рад/год. По результатам спектрального анализа также выявлено, что для стока рек Свирь, Вуокса и уровня озер выделяются колебания с временными масштабами 27–31 и 5–7 лет (рис. 6), что согласуется с данными исследований, проведенных ранее.

Вклад основных энергонесущих колебаний в общую дисперсию в рассматриваемых масштабах, как показал анализ частотно-временных спектров $S(\omega, t)$, меняется во времени. Например, для уровня Ладожского озера доля дисперсии в разных сечениях спектра колебаний с масштабом около 30 лет ($\omega < 0.2$ рад/год) варьирует от 28 до 54%, а для Онежского, Сайма и Пайяне она существенно меньше – 20–30%. Вклад колебаний с периодом 10–11 лет меньше, чем у вышерассмотренных (не более 20%) при среднем значении для Онежского озера 25%, Ладожского – 12, Сайма и Пайяне – 10%. Доля дисперсии колебаний с временными масштабами около 6 лет в общей изменчивости составляет для уровня Ладожского озера 23, а Онежского, Сайма и Пайяне – 30%; это указывает, что роль таких колебаний основная в изменчивости уровня в масштабах 1–30 лет.

Для уровня озер характерна смена относительно короткопериодных (5–7-летних) колебаний, преобладающих на первых сечениях

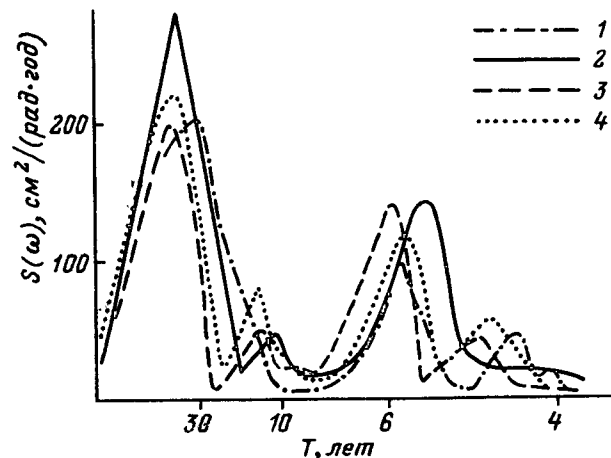


Рис. 6. Спектры колебаний уровня озер.
1 – Онежское, 2 – Пайяне, 3 – Сайма, 4 – Ладожское.

нестационарных спектров (во второй половине XIX в.), долгопериодными (25–30 лет), соответствующими второй половине XX в.

Четко выраженная сезонная циклическая составляющая стока, притока и уровня озер на фоне межгодовой изменчивости позволяет отнести эти процессы к классу периодически коррелированных, нестационарных, случайных.

Взаимный спектральный анализ колебаний уровня озер с суммарным притоком, стоком рек показал, что на низких частотах (0.2 и 1–1.2 рад/год) когерентность $F(\omega)$ близка к 1, а разность фаз составляет менее 1 года, т. е. изменения колебаний уровня озер в зависимости от притока происходят синхронно. При анализе взаимности колебаний уровня с атмосферными осадками выяснилось, что, несмотря на общую низкую взаимную корреляцию, на частоте основного максимума (порядка 6–7 лет) связь значимая, когерентность составляет $F(\omega) = 0.8$. При этом флуктуации уровня озера запаздывают по отношению к колебаниям атмосферных осадков на несколько месяцев.

По среднемесячным результатам наблюдений за ЭВБ и уровнем озер исследована их внутригодовая изменчивость и дана оценка нарушений взаимной связи ЭВБ при антропогенном изменении (регулировании) стока рек.

Корреляционная связь относительно долгопериодных 30-летних колебаний уровня и факторов, влияющих на его флуктуации, во времени практически не меняется, поэтому представляется возможным оценить относительно короткопериодные колебания, внутримесячную изменчивость ЭВБ и уровня по временному интервалу за 1951–1981 гг.

Анализ внутрирядной коррелированности уровня Ладожского озера и оценки интервала корреляции показали, что для навигационного

периода корреляционная связь прослеживается на протяжении 7 мес, а в остальное время она существенно увеличивается. Более низкая внутрирядная связь по сравнению с Ладожским озером получена для суммарного притока и уровня озер Онежского и Сайма. Еще более низкие значения корреляционной связи обнаруживаются в режиме атмосферных осадков, выпадающих в бассейнах рассматриваемых озер, что указывает на плохую предсказуемость данного процесса даже за месяц.

Резюмируя, отметим, что анализ внутри- и межгодовой изменчивости элементов внешнего водообмена и уровня крупных озер показал, что с начала прошлого столетия обнаруживаются значительные колебания с временными масштабами около 30 и 5–7 лет. Вклад 5–7-летних колебаний уровней в рассматриваемом диапазоне частот составляет для озер Северо-Запада европейской территории СССР примерно 30%. По частотно-временным спектрам установлено, что со временем происходит перестройка спектральной структуры рассматриваемых процессов. Так, с середины прошлого и до начала нынешнего века преобладали относительно короткопериодные флуктуации, а в дальнейшем — долгопериодные. Однако отсутствие более продолжительных реализаций для вероятностного анализа не позволило точнее оценить регулярность этой перестройки и выявить определяющие ее процессы.

Пределы предсказуемости (инерционности), которые для рассматриваемых озер составили несколько месяцев, оказались на порядок меньше, чем для бессточных озер. Прогноз межгодовой изменчивости уровня озер возможен на один шаг, а для внутригодовой — на 2–3 шага. При решении прогностических задач, учитывая квазипериодические колебания уровня и ЭВБ Онежского и других крупных озер Северо-Запада, необходимо сочетать методы решения уравнения водного баланса со стохастическими.

3.3. Термический режим

Онежское озеро относится к крупным глубоким водоемам умеренных широт и дважды в год — весной и осенью — интенсивно перемешивается от поверхности до дна. Оно имеет сложные морфометрические характеристики: центральный глубоководный плес, сравнительно мелководную и открытую южную часть, глубокие, длинные и изрезанные заливы и губы. Это во многом определяет особенности формирования его термического режима. Так, наиболее северный Повенецкий залив, по многолетним данным наблюдений за температурой поверхности, летом в среднем на 2–3 °С теплее, чем расположенные более чем на 200 км к югу районы.

К изучению температурного режима Онежского озера приступили в начале XX в. [220], но оно не носило тогда регулярного характера, и лишь в последние 10 лет исследования его стали развиваться более интенсивно. Основной итог этих работ — обнаружение сильной пространственно-временной изменчивости поля температуры [28, 98]. Были изучены процессы, связанные с поступлением и перераспределением

тепла в водной толще, такие как свободноконвективный теплоперенос, мезомасштабные подъемы и опускания вод, структура термических фронтов [23, 26, 28, 154]. Проводились исследования тонкой термической структуры озера в различные сезоны. Большое внимание уделялось изучению внутренних волн как основной причины изменчивости температуры в масштабах времени от минут до десятков часов [29].

Онежское озеро — сравнительно холодный водоем. Воды, находящиеся на горизонтах ниже 30 м, лишь в сентябре—октябре прогреваются до температуры 6–8, а в более глубоких слоях — до 5–6 °С. Период летней прямой стратификации с температурой выше 4 °С длится около 4 мес. Только на непродолжительное время (1.5–2 мес) слои воды, находящиеся на горизонтах до глубины 20 м, приобретают температуру выше 12–15 °С. Период ледостава в закрытых заливах достигает 5 мес. Максимальные температуры поверхности воды, отмеченные в июле—августе, в редкие годы превышают 21–22 и только в исключительных случаях на очень короткое время возрастают до 24–25 °С.

Этап весеннего подледного прогрева начинается в зависимости от состояния снежного покрова и метеорологических условий в конце марта—начале апреля задолго до схода льда [151]. К этому времени температура воды у нижней поверхности льда равна 0 и плавно повышается до 0.5–3 °С у дна, причем наибольшие значения наблюдаются, как правило, на больших глубинах. При таком распределении температуры по вертикали, называемом обратной температурной стратификацией, прогрев верхних слоев воды приводит к неустойчивому распределению плотности по вертикали и, как следствие, к конвективному перемешиванию. Образуется однородный по температуре верхний слой, постепенно увеличивающийся в толщине [151, 154].

В начальный период подледного прогрева перемешанный слой заглубляется на 1–1.5 м в сутки, прогреваясь при этом на несколько сотых долей градуса. Росту толщины слоя способствуют 2 причины: постоянное увеличение проходящей через лед солнечной радиации и вовлечение в процессе турбулентного перемешивания воды из нижнего, устойчиво стратифицированного слоя. Так как в Онежском озере вертикальные градиенты температуры в зимний период малы, вторая причина особенно сильно влияет на скорость процесса заглубления однородного слоя [151]. К началу мая его толщина достигает значений 30–40 м, а температура воды возрастает на 0.3–0.5 °С.

Следует отметить большую степень однородности перемешанного конвекцией слоя. Неоднородности температуры в нем не превышают сотых долей градуса. Встречающиеся неоднородности других параметров, например электропроводности воды, в процессе заглубления выравниваются по всей его толщине [153].

К моменту исчезновения льда конвективный слой в мелководных районах достигает дна, а в глубоководных опускается на несколько десятков метров вниз.

После схода льда поток солнечной радиации, приходящей в озеро, резко возрастает. Температура воды в это время не превышает 2 °С, т. е. прогрев идет еще в условиях обратной температурной

стратификации. В мелководных районах вследствие перераспределения тепла на меньшую глубину он идет быстрее, чем в глубоководных. При достижении температурой воды значения 4°C — точки наибольшей плотности — процесс конвективного перемешивания прекращается и формируется прямая температурная стратификация. Создаются условия, когда в мелководных прибрежных районах прогрев идет достаточно быстро, а в глубоководных еще существует обратная стратификация с температурой меньше 4°C . Возникает явление термического бара.

Термобар — это плотностной фронт, в зоне которого теплые и холодные воды смешиваются и опускаются на дно. Имея куполообразную форму, этот фронт постепенно продвигается от берегов к центральному частям озера и оставляет за собой районы с прямой температурной стратификацией, где температура воды выше 4°C [151]. Линия пересечения фронта термического бара с поверхностью озера часто имеет сложную форму, обусловленную меандрированием струй течений и влиянием внутренних волн. Иногда на разрезах, перпендикулярных берегу, изотерма 4°C встречается несколько раз, что может объясняться прогревом приповерхностных вод, удерживаемых компенсационными восходящими движениями в холодной зоне [25, 26].

Термический бар в Онежском озере существует до 15–20–25 июня. В тех районах озера, где он уже прошел, начинается этап летнего нагревания. Объемное поглощение солнечной радиации происходит в зависимости от прозрачности воды в верхнем слое толщиной 3–5 м. В солнечную и маловетренную погоду здесь формируется суточный термоклин [152]. Максимальная разница температуры в нем и нижележащем однородном слое достигает 3°C . Этот теплый слой воды при усилении ветра быстро перемешивается с более глубокими до уровня, где динамически компенсируются потенциальная энергия плавучести воды и кинетическая энергия турбулентных движений. Два основных процесса — объемное поглощение солнечной радиации и турбулентное вертикальное перемешивание — формируют на некотором горизонте слой скачка температуры — сезонный термоклин. Столб воды становится устойчиво стратифицированным по вертикали. Образуется верхний теплый и однородный по температуре слой, слой скачка и нижний холодный — гипolimнион. Слой скачка температуры, формируя градиент плотности воды, становится препятствием для дальнейшего поступления тепла из верхних слоев в нижние.

К началу июля температура воды в слое 0–3 м находится в пределах $6\text{--}10^{\circ}\text{C}$, а сезонный термоклин толщиной 2–3 м располагается на горизонте 5–7 м. Сезонный термоклин со временем заглубляется, в нем растут вертикальные градиенты, увеличиваются температура и толщина верхнего слоя.

К концу июля—началу августа сезонный термоклин в зависимости от района озера находится на глубинах 15–25 м. Температура верхнего слоя к этому времени имеет значения в пределах 12–18, а средняя температура поверхности озера, по многолетним данным, — $16\text{--}18^{\circ}\text{C}$. Лишь в дни с очень сильным солнечным прогревом и штилевой погодой температура в теплом суточном термоклине превышает $21\text{--}22^{\circ}\text{C}$.

Следует подчеркнуть, что заглубление сезонного термоклина — не монотонный процесс. Оно полностью связано с ветровым воздействием на озеро и наиболее интенсивно идет в ветреную погоду. Горизонт залегания сезонного термоклина и значения градиентов температуры в нем непрерывно меняются из-за действия внутренних волн. Когда горизонт термоклина находится на глубинах 10–20 м, характерные значения амплитуд его колебаний 1–5 м. В прибрежных районах и губах амплитуда периодических перемещений положения сезонного термоклина по глубине может составлять 10–15 м за время от нескольких до десятков часов.

Горизонтальные неоднородности температуры, возникающие в летний период, связаны с неравномерностью прогрева верхних слоев озера (закрытые губы—центральный плес), фронтами, обусловленными подъемом и опусканием вод, а также с адвекцией тепла течениями и горизонтальным переносом длинными внутренними волнами. Горизонтальные градиенты температуры на фронтальных разделах иногда достигают значений $10^{\circ}\text{C}/\text{км}$.

Изменчивость температуры воды, связанная с внутренними волнами, особенно сильно проявляется в период летней стратификации, когда велики градиенты температуры по вертикали. Исследованиями, проведенными в последнее десятилетие, показано, что в это время внутренние волны в Онежском озере наблюдаются во всех районах [29], их периоды находятся в пределах от нескольких минут до сотен часов, а амплитуды — от долей метра до 15–20 м. Возникновение этих волн связано со многими причинами: это и непосредственное воздействие ветра, и перепады атмосферного давления над поверхностью озера, неустойчивость течения при наличии большого вертикального сдвига скорости, влияние на них силы Кориолиса. Длинные внутренние волны с периодами в несколько десятков часов часто имеют большую амплитуду вертикальных движений и вызывают значительные изменения температуры воды, достигающие $10\text{--}12^{\circ}\text{C}$.

Такие волны, входя в заливы и узкие губы, распространяются в них в виде волн Кельвина [27]. При этом температура у противоположных берегов залива изменяется противофазно — у одного берега увеличивается, у другого уменьшается. Передний фронт такой волны по мере продвижения в залив постепенно становится все более крутым, так что резкие изменения температуры могут происходить в течение короткого времени. Охватывая движением большую толщу воды, длинные внутренние волны иногда приводят к выходу термоклина и холодных вод гипolimниона на поверхность с образованием резких горизонтальных градиентов температуры. Это явление встречается в прибрежных районах. В центральных частях озера наибольший вклад в изменчивость температуры вносят волны с периодом 12–13 ч — волны Пуанкаре, а также короткие внутренние волны, распространяющиеся в сезонном и суточном термоклинах.

В прибрежных районах проявляются нелинейные эффекты внутренних волн: укрупнение фронта при набегании на береговой склон, фазовые сдвиги колебаний на разных горизонтах, образование струйных

зон. Концентрации энергии внутренних волн вблизи берегов способствует их топографический захват.

Изменчивость температуры воды, вызванная внутренними волнами, максимальна в зоне сезонного термоклина. Именно здесь наблюдается наибольшая амплитуда вертикальных движений и велики вертикальные градиенты температуры. Профили температуры „сжимаются” и „растягиваются” при прохождении внутренних волн, так что толщина зоны сезонного термоклина колеблется от долей до нескольких метров. При обрушении волн может образоваться ступенчатая структура вертикального распределения температуры, часто встречающаяся при измерениях в Онежском озере.

В гипolimнионе и верхнем однородном слое изменчивость не так велика, как в зонах с большими вертикальными градиентами. Исключения составляют случаи, когда непосредственно у поверхности воды в солнечную маловетренную погоду образуется суточный термоклин. Тогда внутренние волны, распространяющиеся в толще воды, модулируют толщину и вертикальную структуру температуры в суточном термоклине. Возникает пятнистость в распределении температуры по горизонтали [151].

Спектральный анализ колебаний температуры воды показывает, что наиболее энергонесущие зоны приходятся на периоды в несколько десятков часов (их связывают с длинными бароклинными волнами Кельвина, полусуточным периодом, обусловленным инерционными колебаниями, волнами Пуанкаре, внутренними приливными колебаниями и бризовым ветром), а также на периоды 8, 4–3 и около 2 ч, связанные с собственными сейшевыми колебаниями.

К значительным изменениям температуры воды на площади в несколько десятков километров приводят мезомасштабные подъемы и опускания вод — апвеллинги [30]. Эти процессы вызывает вдольбереговой ветер. При сильном апвеллинге на поверхность могут подниматься воды с глубин в несколько десятков метров. Иногда на поверхность выходит термоклин и образует фронт протяженностью в несколько километров. Подъем вод может продолжаться несколько суток. В заливах, когда ветер дует вдоль их оси, на одном берегу развивается апвеллинг — подъем холодных вод, на другом — опускание поверхностных теплых. В зону опускания подтекают теплые поверхностные воды. В результате на противоположных берегах разница температуры летом превышает 10°C . Наиболее часто апвеллинги в Онежском озере возникают в районах мысов Бесов Нос, Брусно, залива Большое Онего. Так, в районе мыса Бесов Нос наблюдались апвеллинги, занимающие площадь, простирающуюся на 30 км вдоль берега и 10 — от него в озеро.

Иногда апвеллинги возникают и при ветре, направленном с берега. В этом случае большое значение для развития процесса имеют морфометрические характеристики района. Вблизи выдающихся в озеро мысов часто наблюдаются локальные мысовые апвеллинги, отмечающиеся при дистанционных ИК-наблюдениях.

Этап охлаждения озера начинается в 1-й декаде августа. Он сопровождается понижением температуры в верхних слоях воды. При этом

слой скачка температуры — сезонный термоклин — непрерывно заглубляется. Несмотря на уменьшение общего теплозапаса озера, нижние слои воды — гипolimнион — продолжают прогреваться. Перенос тепла из верхних слоев в гипolimнион обусловлен процессом вовлечения, который в этот период интенсифицируется из-за усиления ветровой активности. В некоторые годы прогрев нижних слоев воды продолжается до конца октября—начала ноября. Гомотермия по вертикали наступает по достижении температурой воды значений $6\text{--}8^{\circ}\text{C}$.

Явление осеннего термического бара возникает в конце октября—ноябре, когда вода в прибрежных районах охладится до 4°C . Вертикальное перемешивание, сопровождающее процесс охлаждения, в этот период усиливается из-за воздействия штормовых ветров. К декабрю температура воды снижается до значений $1\text{--}2^{\circ}\text{C}$.

Ледяной покров в закрытых губах появляется в декабре, в центральной части озера — в январе, причем редкие годы последняя не покрывается льдом. В подледный период устанавливается устойчивая обратная температурная стратификация. Температура воды у нижней границы льда равна 0 и плавно повышается до $0.5\text{--}3^{\circ}\text{C}$ в нижних слоях. Изменение теплозапаса озера, связанное с прогревом от донных отложений, в зимний период незначительно.

3.3.1. Температура поверхности воды по данным ИК-съемок

Исследование пространственной и временной изменчивости температуры поверхности воды такого крупного водоема, как Онежское озеро, — задача сложная, поэтому, несмотря на многократные обращения к этой проблеме, ее нельзя считать окончательно решенной.

В настоящее время накоплен обширный материал авиасъемок, выполненных Северо-Западным УГКС, который позволяет в определенной мере решить эту проблему. Дистанционные методы особенно эффективны для оперативной съемки на большой площади и, следовательно, дают возможность получить более детальные сведения о сезонной изменчивости температуры поверхности воды в различных районах Онежского озера.

Для характеристики этого показателя были использованы данные термосъемок за 1972–1984 гг. в период открытой водной поверхности (конец мая—начало декабря).

Авиасъемки выполнялись по стандартному маршруту на самолете ИЛ-14 радиационным термометром системы МИР-3 и охватывали всю акваторию озера, за исключением Петрозаводской, Кондопожской, Лижемской, Уницкой и других губ, меньших по размерам. На всей площади озера по маршруту самолета было выбрано 40 точек, расположенных приблизительно на равном расстоянии друг от друга.

Трудность задачи заключалась в том, что авиасъемки проводились не в строго установленные сроки. Для каждой точки 120 значений температуры приходилось на 210 сут, т. е. приблизительно 1 значение на 2 сут, но распределены они были крайне неравномерно. Для осреднения температуры был применен метод скользящего среднего:

для каждых 10 значений температуры поверхности воды, снятых с карт, находили центр тяжести — дату, к которой относилась средняя температура, затем смешали на одно значение и вычисляли следующее средневзвешенное и т. д. Для этих же значений рассчитывали и среднее квадратическое отклонение, потому величины его для конкретных дат будут несколько завышенными.

По полученным значениям для каждой точки в период открытой воды (конец мая—начало декабря) были построены графики хода средней за исследуемые годы температуры поверхности воды и среднего квадратического отклонения. В результате было получено детальное распределение среднепогодной температуры поверхности воды в навигационный период и коридор ошибок для этой температуры в различных районах озера.

Характер изменчивости температуры поверхности воды (ТПВ) в озере в различных районах неодинаков, но общий вид кривых, их форма от точки к точке меняются незначительно. На всех графиках четко выделяются 2 периода принципиально различных по направлению тепловых потоков, присущих нагреванию и охлаждению. Максимальные среднепогодные значения ТПВ наблюдаются в последней декаде июля—начале августа. Менее выражены пики на графиках для южной части озера, западного апвеллингового и шхерного районов. Длительность периода роста ТПВ приблизительно в 1.5 раза меньше таковой периода охлаждения.

Для 1-го и 15-го чисел каждого месяца были построены карты распределения температуры поверхности воды озера и среднего квадратического отклонения от нее (рис. 7–12) и рассчитаны средняя температура поверхности и среднее квадратическое отклонение для всего озера (рис. 13).

После разрушения льда на Онежском озере (по среднепогодным данным, заканчивается 18 мая) происходит резкое увеличение поступления тепла в водоем. Прибрежные мелководные участки прогреваются до температуры наибольшей плотности быстрее, чем глубоководные, что приводит к формированию термического бара.

1 июня в прибрежных районах озера наблюдается прямая температурная стратификация, в центральной части озера — обратная, в результате чего в этом месяце поле ТПВ характеризуется сильной пространственной неоднородностью. В середине июня горизонтальный градиент достигает 8°C . По данным ИК-съемок, изотерма 4°C в этот период оконтуривает центральную часть озера. Следует отметить, что при фазе перехода от весеннего периода к летнему, т. е. при существовании явления термического бара (до 20–25 июня), данные о температуре поверхности воды, полученные ИК-радиометром для области с температурами ниже 4°C , как правило, оказываются завышенными. С прогреванием тонкого приводного слоя воздуха в теплые дни ошибка увеличивается. Истинные значения ТПВ в центральной части озера могут оказаться завышенными на 2°C . В июне происходит наиболее интенсивный рост ТПВ: за месяц в среднем по озеру температура поверхности увеличивается на 7°C .

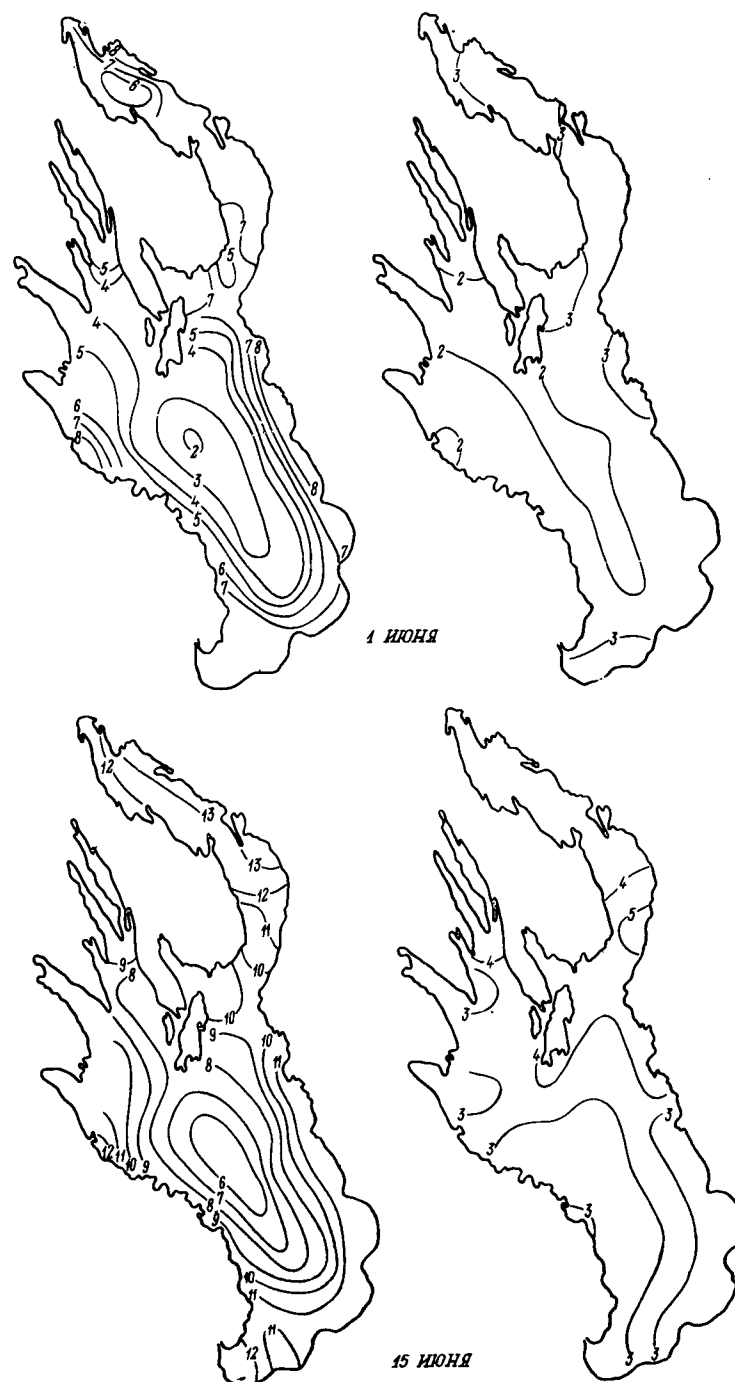


Рис. 7–12. Распределение температуры ($^{\circ}\text{C}$) поверхности воды Онежского озера и ее среднего квадратического отклонения.

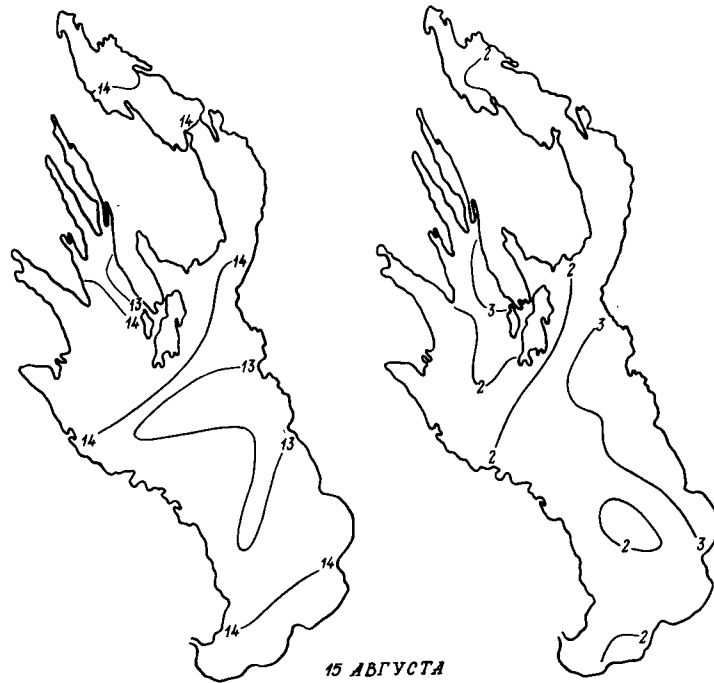
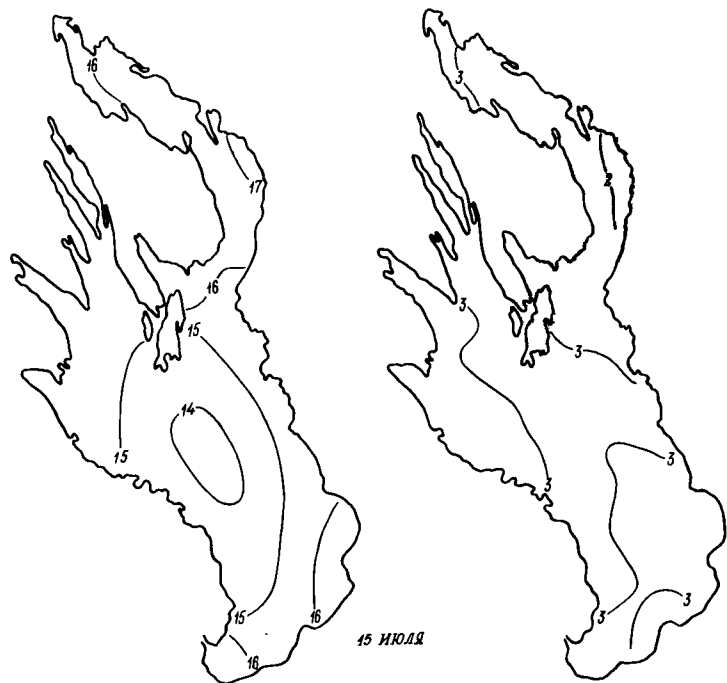
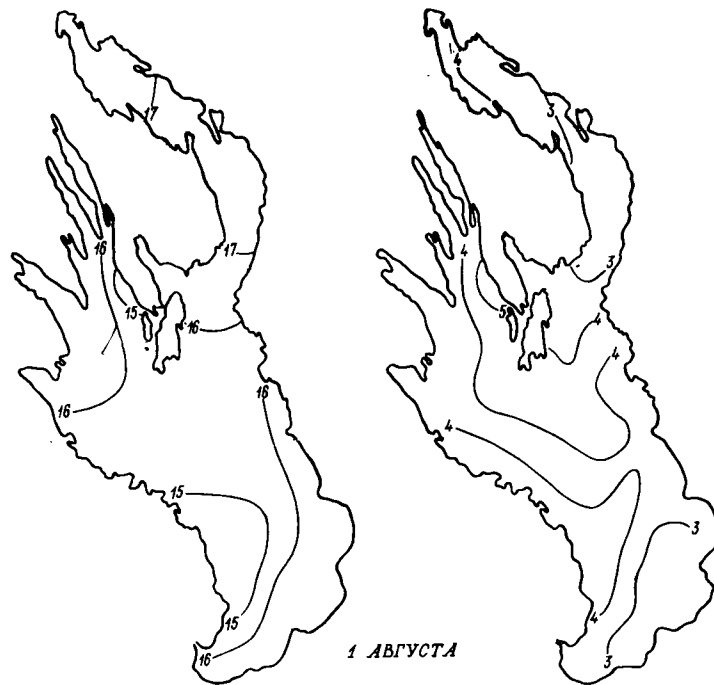
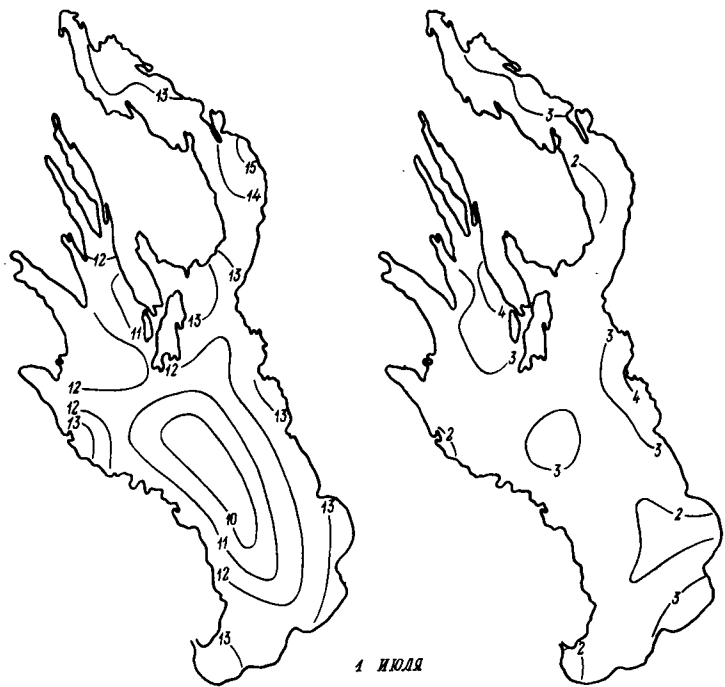


Рис 8

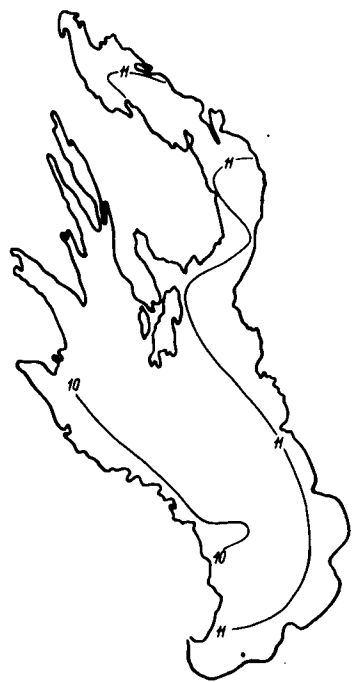
Рис. 9.



1 СЕНТЯБРЯ



1 ОКТЯБРЯ



15 СЕНТЯБРЯ

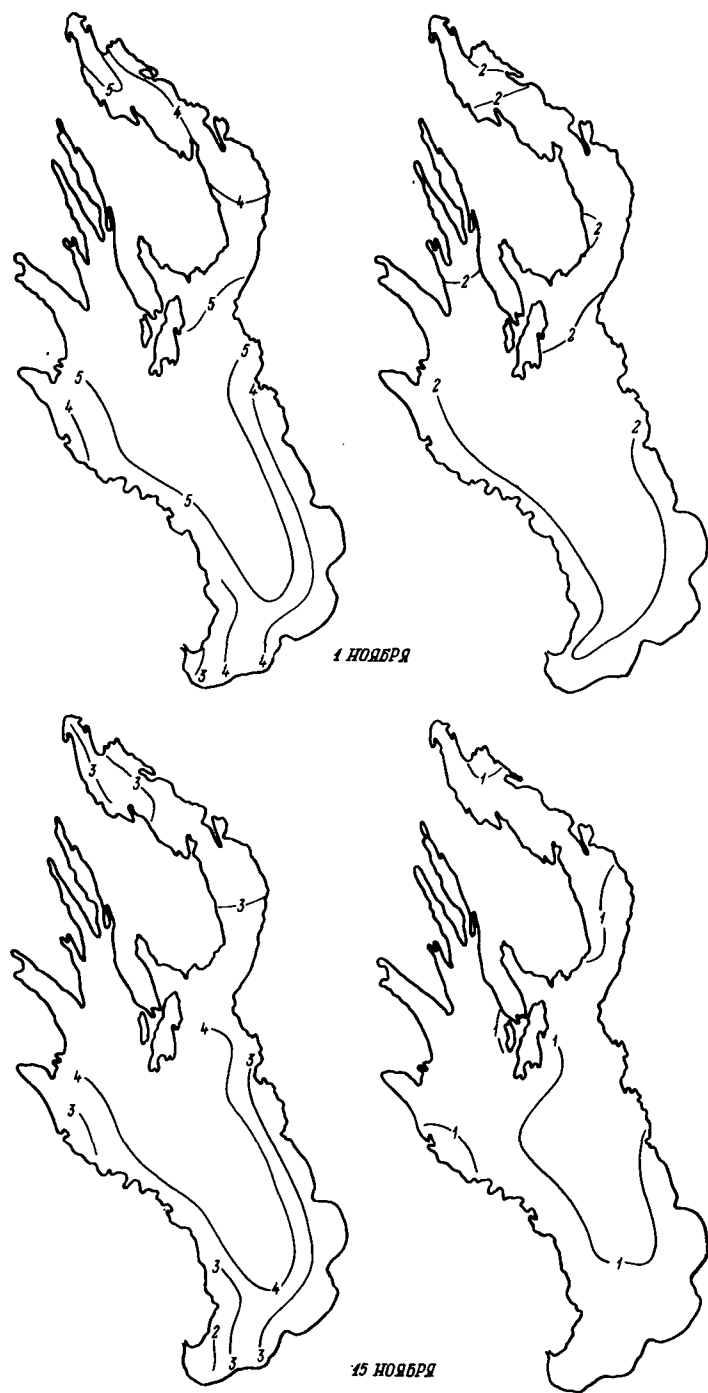
Рис. 10.



15 ОКТЯБРЯ

Рис. 11.





1 НОЯБРЯ

15 НОЯБРЯ

Рис. 12.

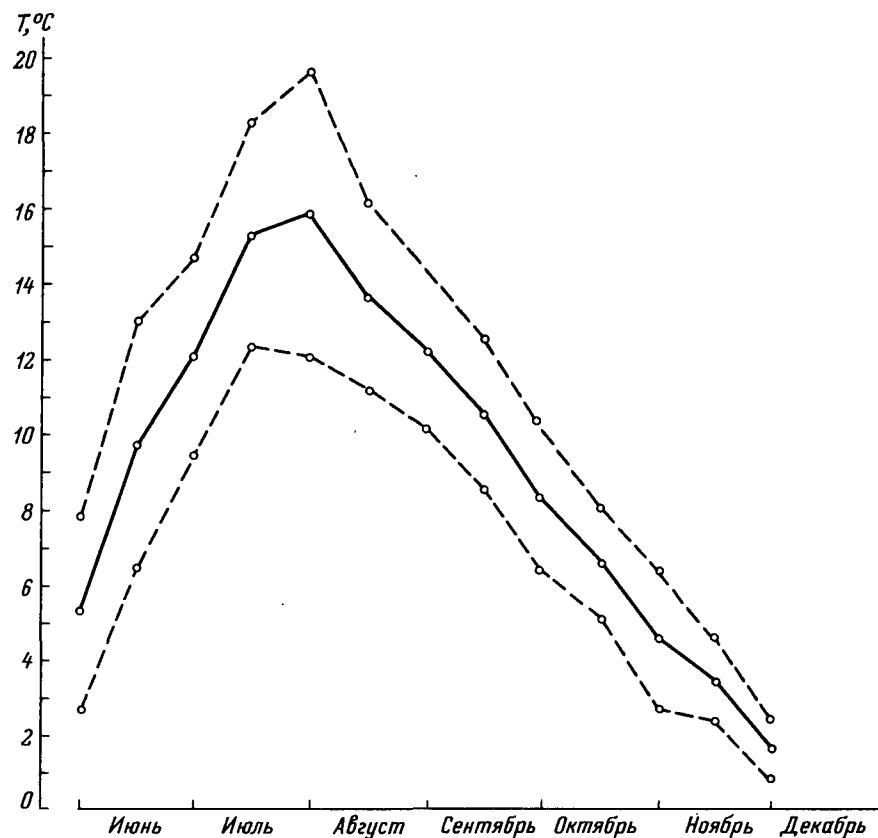


Рис. 13. График хода среднееголетней температуры поверхности воды Онежского озера и ее среднеквадратических отклонений (штриховые линии).

К 1 июля средняя ТПВ равна 12.1°C . Пространственное распределение ее становится более однородным, горизонтальный градиент составляет 5°C . Минимальная температура (9°C) по-прежнему наблюдается в центральной части озера, максимальная (15.2°C) — в Заонежском заливе. В июле скорость роста ТПВ снижается и в среднем за месяц составляет 4°C .

Конец июля—начало августа характеризуется наибольшим прогревом. В этот период в озере образуется достаточно мощный верхний квазиоднородный слой и ошибки в определении ТПВ малы. Средняя температура поверхности воды достигает своих наибольших значений — 16°C . Несколько холоднее вода у западного берега, что вызвано часто возникающими здесь апвеллингами. В начале августа начинается период охлаждения, ТПВ в озере постепенно снижается. В сентябре ее распределение становится близким к гомотермическому. К 15 октября воды прибрежных районов становятся заметно холоднее вод Центрального плеса.

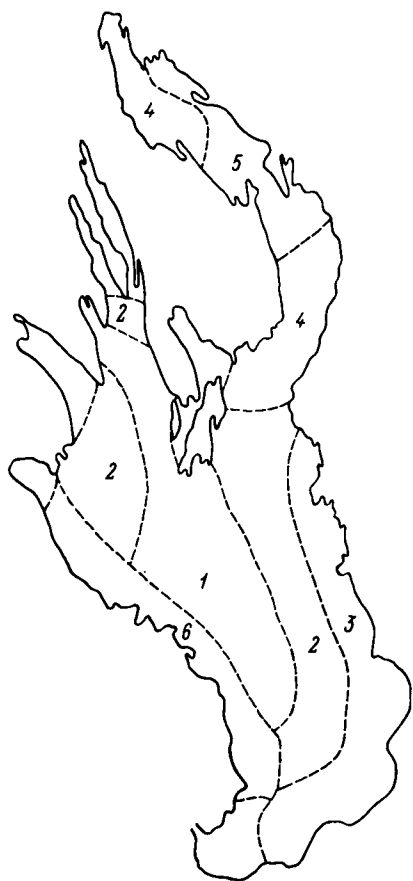


Рис. 14. Карта районов с одинаковой изменчивостью температуры поверхности озера.

Пояснения в тексте (с. 46).

Средняя ТПВ составляет 6.8°C , в центре озера она несколько выше — $7.1-7.3^{\circ}\text{C}$.

К 1 ноября поле ТПВ становится еще более неоднородным. Вдоль побережья формируется термический бар. Средняя температура снижается до 4.8°C , в центре озера она превышает 5°C . 15 ноября изотерма 4°C оконтуривает центральную часть озера. Средняя ТПВ озера становится 3.6°C , оно продолжает интенсивно охлаждаться. К 1 декабря фронт термического бара исчезает, средняя ТПВ озера составляет 1.9°C .

Детальный анализ графиков хода средних ТПВ по выбранным точкам показал, что на форму кривых оказывают большое влияние морфологические особенности водоема, его размеры, и в первую очередь глубина.

В зависимости от протекания процессов нагревания и охлаждения в озере можно выделить несколько районов (рис. 14).

Район 1 — центральный глубоководный, с глубинами более 50 м. Включает Центральный плес и глубоководную часть залива Большое Онего. От других районов отличается меньшей амплитудой колебаний ТПВ, самыми низкими температурами в весенний период и самыми высокими в осенний.

Район 2 с глубинами 30–50 м. По сравнению с первым более интенсивно прогревается весной и летом и быстрее охлаждается осенью.

Район 3 включает прибрежный восточный и южный районы, характеризуется очень быстрым прогреванием весной, аналогичным району 2 ходом температур летом и самыми низкими температурами в конце осени—начале зимы.

Район 4 включает Заонежский залив и глубоководную часть Повенецкого. По значениям ТПВ близок к прибрежному восточному. Отличается более низкой температурой весной, но более высокой летом и осенью.

Район 5 с глубинами до 10–20 м. Занимает мелководную часть Заонежского и Повенецкого заливов. Несмотря на северное положение,

характеризуется самыми высокими температурами весной и летом, что вызвано его мелководностью и отчужденностью от основного плеса.

Район 6 включает западную часть озера, отличается очень сильной изменчивостью. Его можно характеризовать только отдельными точками, так как ход температуры в них существенно различается. Такая изменчивость обусловлена большой контрастностью глубин вдоль западного берега и часто возникающими здесь апвеллингами.

3.3.2. Зоны проявления, повторяемость прибрежного апвеллинга и циркуляция вод озера

В работе П. М. Бояринова [23] были изложены основные особенности формирования прибрежного апвеллинга в озерах. Однако повторяемость, проявление его для разных сезонов года в различных зонах озера не рассматривались. Этот вопрос был изучен по данным наблюдений за полями температуры воды, полученными за 22 года (1965–1987).

Для выяснения общих закономерностей формирования апвеллинга и циркуляции вод проводились исследования Онежского и Ладожского озер, находящихся в близких природных условиях, но имеющих разные морфометрические характеристики. Для анализа полей температуры воды озер были использованы данные более чем 400 съемок самолетного ИК-радиометра. Вопросы точности измерений изложены в работе И. А. Бычкова с соавторами [34]. Для интерпретации обнаруженных особенностей гидрологического режима озер по дистанционным съемкам привлечены также материалы наблюдений на автономных буйковых станциях (АБС), где производились измерения течений и температуры воды измерителями АЦИТТ, а также результаты моделирования течений [239].

По данным дистанционных ИК-съемок полей поверхностной температуры воды Онежского и Ладожского озер и 10 съемок с судов можно сделать вывод о том, что при определенных гидрометеорологических условиях прибрежный апвеллинг наблюдается в строго определенных районах акватории озер.

Всего по результатам 400 съемок за период с мая по октябрь 1965–1986 гг. в Ладожском озере отмечено 59 случаев апвеллинга, а в Онежском — 44, причем локализованы они в 3–4 районах озера (рис. 15). В табл. 7 приведены данные о количестве случаев апвеллинга для каждой из выявленных зон и отмечено, в какое время года они обнаружены. В Ладожском озере выделены 3 основных района: I — в южной мелководной части озера в районе мыса Сторожно; II — в районе р. Видлица, на восточном берегу озера и у о-ва Мантинсаари; III — в районе г. Приозерска на западном берегу озера. Существуют эти зоны не одновременно во всех точках. Вначале, во второй половине июня, апвеллинг проявляется в мелководной южной части озера (I), затем, в июле, — в районе р. Видлица и о-ва Мантинсаари (II) и, наконец, в августе—сентябре — в наиболее глубоководной части озера, в районе г. Приозерска (III).



Рис. 15. Локализация зон апвеллинга (I–V) в Онежском (а), Ладожском (б) озерах.

При наличии термобара в мае–июне в Ладожском и Онежском озерах даже при штормовых ветрах со скоростью более 20 м/с, благоприятствующих генерации апвеллинга, ни разу за 22-летний период не было обнаружено зон прибрежного апвеллинга. В это время года, по данным расчетов на диагностической модели, в озере существует общий циклонический круговорот. По мере перемещения термобара в северную глубоководную часть в южной мелководной части Ладожского озера может сформироваться антициклоническая циркуляция вод. При ветрах северных и восточных румбов вдоль западного берега у мыса Сторожно (I) на поверхности проявляются зоны апвеллинга с градиентами температуры на поверхности озера до 0.5–1 °С/км.

В августе–сентябре при уменьшении горизонтальных градиентов температуры воды при сильных ветрах ($V_a > 5$ м/с) не только в южной, но и в северной и центральной частях озер циклоническая циркуляция вод, связанная в основном с эффектами бароклинности и рельефа дна, может быть нарушена и здесь при определенных направлениях ветра могут сформироваться зоны апвеллинга.

Необходимо отметить, что апвеллинг в рассматриваемых озерах не может проявляться одновременно во всех районах, и это косвенно говорит в пользу того, что в период отсутствия термобара не существует общей, охватывающей все озеро циркуляции вод. Такая общая циклоническая циркуляция возможна только при термобаре, причем она

Таблица 7

Повторяемость проявлений прибрежного апвеллинга в Ладожском и Онежском озерах при разных гидрометеорологических условиях (1965–1986 гг.)

Зона апвеллинга	Зоны одновременного проявления апвеллинга	Число обнаруженных апвеллингов	Ветер	Геометрические размеры		Месяцы наиболее частого повторения апвеллингов	Период наблюдения апвеллингов
				ширина, км	длина, км		
Ладожское озеро							
I	II	10	Восточный, северовосточный	15	25	Июнь, июль	Май–октябрь
II	I	12	Северный, восточный	10	40	Июнь	Июнь–август
III	IV	13	Тот же	10	50	Июль, август	Июль–сентябрь
IV	III	25	Южный, западный	20	50	Август, сентябрь	Июнь–октябрь
Онежское озеро							
I	II, III, IV	17	Западный, северный	10	24	Июль, август	Июнь–сентябрь
V	I, IV	9	Северный	6	6	Июнь, июль	Июнь–июль
III	I, IV	6	Северный, западный	10	20	Июнь	Июнь–сентябрь
II	II, III, V	12	Южный, юго-западный	10–15	30–40	Июль–август	Тот же
IV	IV	4	Западный	6–10	15	Август	”

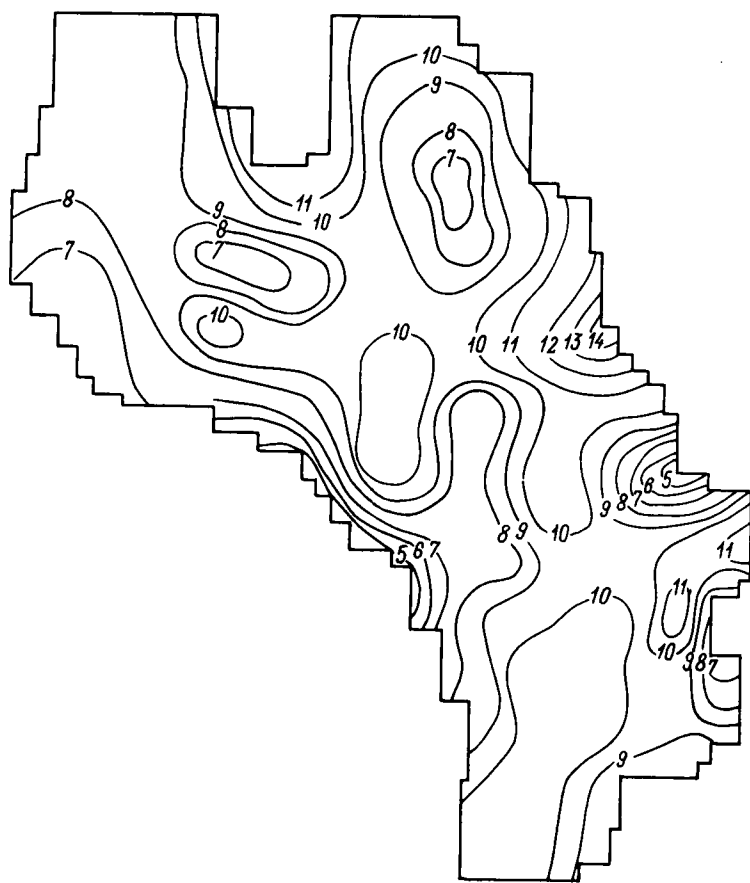


Рис. 16. Поле температуры ($^{\circ}\text{C}$) вод Онежского озера по данным наблюдений 4–6.08.87 г. на горизонте 15 м.

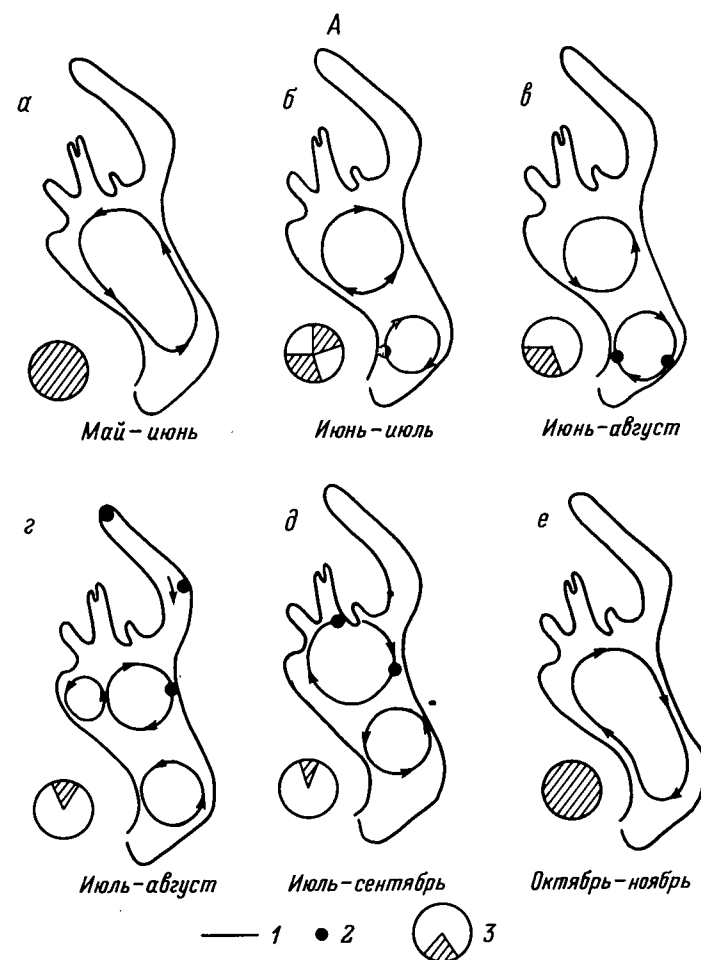


Рис. 17. Схемы проявлений зон апвеллинга и циркуляция вод при разных гидрометеорологических условиях в Онежском (А) и Ладожском (Б) озерах.

а – при термобаре; б–е – при развитой по всему озеру стратификации. 1 – направление течений, 2 – зона апвеллинга, 3 – направление ветра.

усиливается за счет типичной неоднородности поля ветра, носящей также циклонический характер. Циклоническая завихренность поля ветра обусловлена образованием локального атмосферного циклона, формирующегося, как показали данные с ИСЗ „Метеор”, над озерами в период максимальных температурных контрастов.

В каждом из указанных районов в течение летне-осеннего периода сильный апвеллинг с изменениями температуры воды до $3\text{--}5^{\circ}\text{C}$, по данным наблюдений за течениями и температурой воды на автономных буйковых станциях, проявляется за сезон 1–3 раза. Время генерации апвеллинга – менее 1 сут, а существование – 1–3 сут.

Таким образом, на основании приведенных данных можно сделать вывод о том, что в весенне-осенний период доминирует циклонический (против часовой стрелки) тип циркуляции вод с наличием в летний период нескольких циркуляций, обусловленных совместным эффектом бароклинности и рельефа дна. При исчезновении термобара и уменьшении

горизонтальных градиентов температуры воды при определенных направлениях ветра со среднесуточной скоростью более $5\text{--}7$ м/с только в определенных районах озера могут формироваться антициклонические циркуляции вод и в каждом из выделенных районов проявляться 1–3 раза в течение сезона случаи апвеллинга, причем совсем необязательно у противоположного берега должен образовываться даунвеллинг. Возможны и случаи синхронного проявления апвеллинга у обоих берегов (рис. 16).

По данным диагностических расчетов течений Ладожского (1980–1984 гг.) и Онежского (1969–1987 гг.) озер получены схемы циркуляции

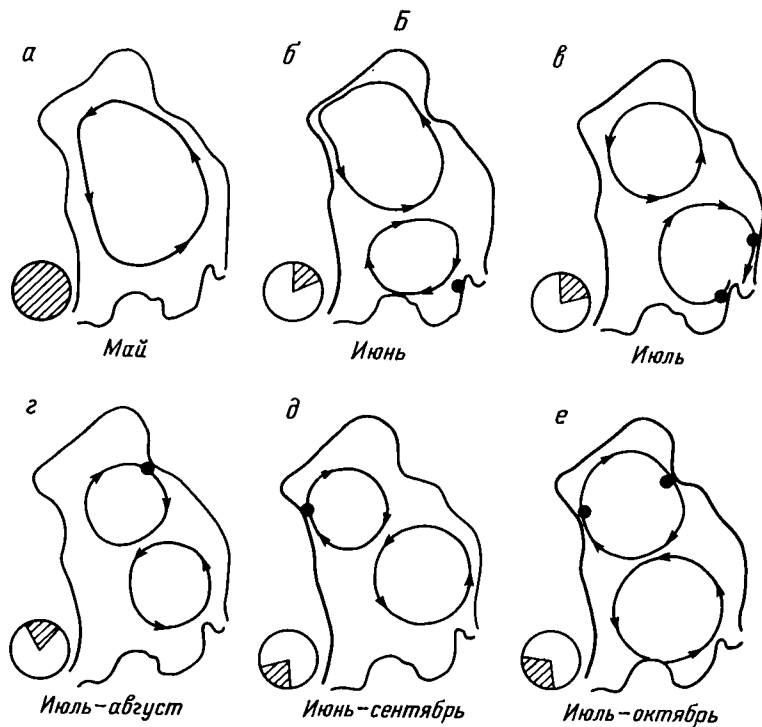


Рис. 17 (продолжение).

вод при апвеллингах, генерированных в разных районах озера. Используя эти расчеты, а также наблюдения за течениями и температурой воды на АБС и карты, полученные по данным самолетной ИК-съемки для разных гидрометеорологических условий, можно выявить следующие особенности циркуляции вод в Онежском и Ладожском озерах.

При наличии термобара, когда стратифицированная зона занимает менее 10% акватории, циркуляция вод здесь носит всегда циклонический характер, а случаев экмановского прибрежного апвеллинга не наблюдалось. При продвижении термобара в открытую часть озера, в то время когда он наблюдается над изобатой около 30 м, в южной части Ладожского и Онежского озер в июне возникает прибрежный апвеллинг, но только при определенном направлении ветра (рис. 17). Интегральная циркуляция вод в этой части озера антициклоническая. При дальнейшем прогреве и продвижении термобара апвеллинг возникает в других точках озера (рис. 17). В табл. 7 приведены основные направления ветра, характерные горизонтальные размеры зон апвеллинга в рассматриваемых озерах и возможность их проявления одновременно в нескольких точках.

Выполненный анализ дал возможность оценить типичные интегральные схемы циркуляции вод в стратифицированном озере по зонам

проявления экмановского прибрежного апвеллинга. Выявленные зоны апвеллинга в озерах необходимо учитывать при проведении наблюдений за химико-биологическими параметрами, поскольку эти зоны характеризуются повышенной изменчивостью не только полей температуры воды, но и других лимнологических характеристик.

3.4. Течения

3.4.1. Инструментальные исследования течений

Течения являются определяющим фактором перемещения и трансформации водных масс, оказывают большое влияние на формирование различных элементов гидрологического режима водоема, обуславливают изменения химического состава вод, управляют процессами образования донных отложений. Они переносят планктон по акватории и глубине водоема, влияют на качество вод и жизнедеятельность водных организмов. Но, несмотря на все это, течения Онежского озера к настоящему времени изучены еще недостаточно. Первые сведения о течениях в отдельных его заливах были приведены В. К. Давыдовым [62], В. А. Толмачевым [227] и И. В. Молчановым с соавторами [128], однако они носили большей частью качественный характер. Первые инструментальные исследования течений Онежского озера были выполнены Лабораторией озероведения ЛГУ (ныне Институт озероведения АН СССР) в период работы Комплексной Онежской экспедиции. Наблюдения проводились с помощью как морских вертушек с облегченными лопастями, так и поверхностных поплавков. Всего за 4 года работы на 760 гидрологических станциях были проведены измерения скорости и направления на стандартных горизонтах (1, 5, 10, 50, 75 и 100 м). Однако эти несинхронные разовые регистрации не позволили выявить преобладающие течения озера.

Для составления схемы течений такого большого водоема, как Онежское озеро, необходимы длительные синхронные наблюдения в разных его частях при различных синоптических условиях.

Преобладающими течениями в Онежском озере, по мнению А. Н. Охлопковой [146], являются плотностные, обусловленные неравномерным нагреванием и охлаждением прибрежных мелководных и центральных глубоководных районов озера в весенний и осенний периоды, а также ветровые и стоковые. Район действия последних ограничивается узкой прибрежной зоной. В течение всего периода открытой воды в озере наблюдаются суммарные течения — плотностные и ветровые, причем роль каждой из составляющих меняется в зависимости от сезона. Так, весной в глубоководной части Онежского озера (залив Большое Онего и северо-западная часть озера) находится область холодных вод с температурой ниже 4 °С, в то время как вода прибрежных районов уже прогрелась. Такое неравномерное распределение температуры (плотности) воды по площади озера создает вокруг области холодных вод плотностную циркуляцию циклонического характера, охватывающую почти все озеро (рис. 18).

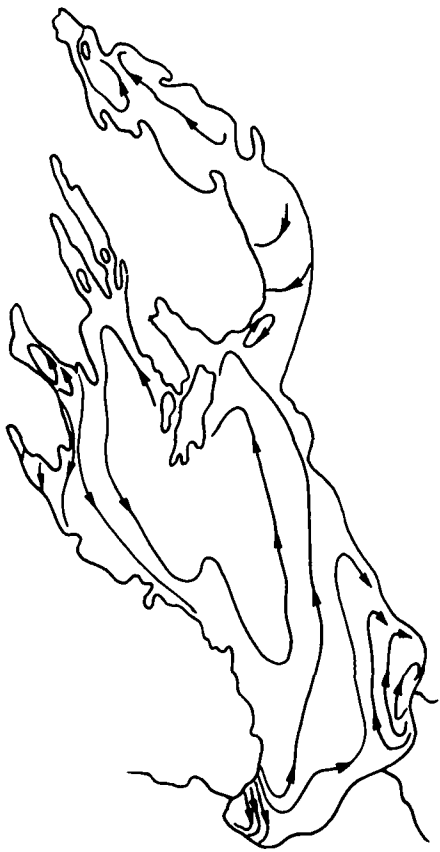


Рис. 18. Схема поверхностных плотностных течений [146].

Проведенные расчеты с использованием динамического метода [146] показали, что с глубиной характер циркуляции сохраняется, но скорости течений заметно уменьшаются. На поверхности в весенний период они обычно не превышают 5 см/с. Перед исчезновением термического бара на озере (конец июня) вследствие прогрева водных масс появляются горизонтальные градиенты температуры до 1 °С/км, что усиливает плотностную циклоническую циркуляцию. Наибольшие скорости таких течений были отмечены в заливе Большое Онего и вдоль восточного берега озера, где на поверхности они иногда достигали 12–15 см/с, на глубине 25 м — 4–6, а 40–50 м — не более 2–3 см/с. После исчезновения термического бара плотностная циркуляция вод ослабевает. В поверхностных слоях

создается система ветровых течений, которой в это время и определяется водообмен в озере. Осенью (октябрь–ноябрь) снова появляется различие температуры в горизонтальном направлении, а следовательно, возникают и плотностные течения. Однако их скорости существенно ниже весенних.

В силу непостоянства ветрового режима на Онежском озере ветровые течения, согласно А. Н. Охлопковой [146], имеют неустойчивый характер и поэтому, даже накладываясь на схему плотностных течений озера, они существенно не искажают ее. По ее представлениям, только установившиеся ветры со скоростью свыше 8 м/с в отдельные периоды могут существенно изменить картину перемещения водных масс озера. Рассчитанные ею по эмпирическим зависимостям для 4 направлений и скоростей ветра 8 и 15 м/с скорости установившихся ветровых течений в первом случае не превышали 20–25 см/с.

Необходимо упомянуть, что в теплое время года повторяемость ветра со скоростью 8 м/с и более не превышает 6–7%. Наибольшую повторяемость имеют ветры со скоростями 4–6 м/с, поэтому на Онежском озере следовало бы ожидать еще меньшие скорости ветровых течений, что противоречит нашим наблюдениям. Предположения

А. Н. Охлопковой [146] о преобладающей роли плотностных течений, вызванных длительным существованием на Онежском озере термического бара, детальными инструментальными измерениями течений в последующем не были подтверждены.

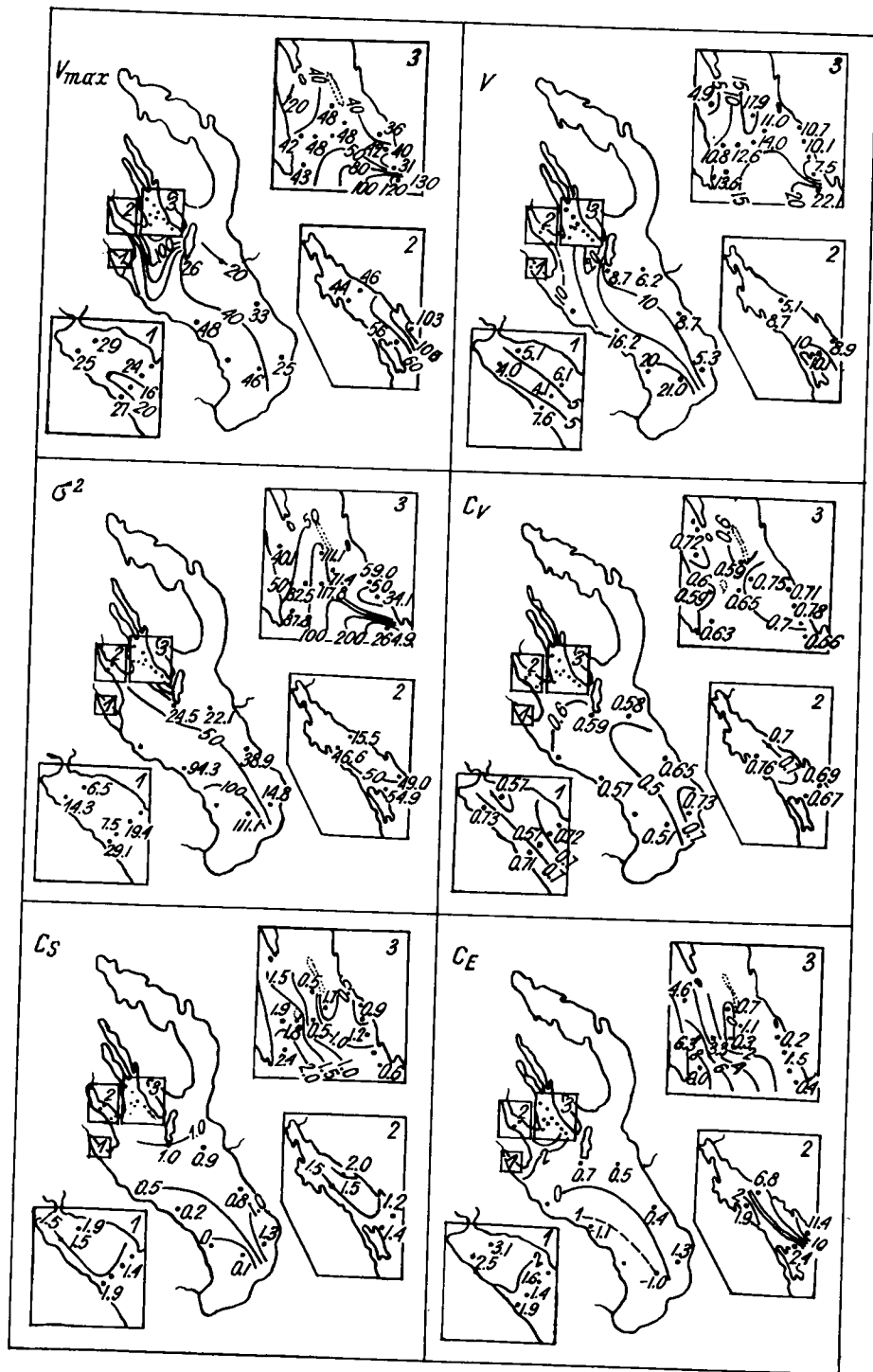
Исследования фронта термического бара, выполненные нами с использованием буссировки датчика температуры [163], свидетельствуют о том, что сколько-нибудь значительные скорости геострофических градиентных (плотностных, по А. Н. Охлопковой) течений отмечаются в узкой зоне шириной порядка всего лишь 3 км, где они не превышали 12 см/с на поверхности, 2 — на 5 м и 0.5–0.8 см/с — ниже 10 м, хотя горизонтальный градиент температуры поперек термического фронта достигал очень большой величины — 4 °С/350 м. Это связано с малыми изменениями плотности воды при значительных градиентах температуры в зоне температуры наибольшей плотности, отмечающейся на фронте термического бара.

В целях проведения детальных наблюдений за течениями в Онежском озере применялись автономные буйковые станции (АБС), по 4–6 штук, устанавливаемых на сравнительно небольших и обособленных полигонах. Работы проводились в Большой (1967 г.), Кондопожской (1970–1976 гг.) и Петрозаводской (1976, 1978, 1981 гг.) губах, а также в районах Большого и Центрального Онего (1976, 1980 гг.).

Наблюдения за течениями в автономном режиме велись с помощью 10 буквопечатающих вертушек БПВ-2р, а с 1976 г. — впервые в отечественной лимнологической практике использовались 4 норвежских самописца (RCM-4) системы Андера. Дискретность наблюдений на БПВ устанавливалась 60 или 30 мин, а на RCM — 10 мин. Самописцы течений устанавливались на стандартных морских поверхностных буйках типа ГМ-46 и ГМ-48, но начиная с 1976 г. для уменьшения влияния ветра и волнения на показания приборов использовались притопленные буи. Глубина размещения АБС в прибрежных районах и у подводных банок выбиралась примерно одинаковой и составляла 30–35 м. Приборы крепились на горизонтах 5–7 и 25 м, а иногда и в среднем слое (15 м). На глубоководных станциях нижний горизонт соответствовал 60 или 75 м. Всего за время наблюдений с помощью автономных самописцев течений было выполнено около 375 тыс. отдельных измерений течений, из них 190 — на RCM-4.

Для проверки репрезентативности прибрежных АБС и с целью более точного выявления схем циркуляций в 1980 г. были проведены наблюдения за течениями с помощью плавающих вех с крыльями (демпферами), находящимися на глубине 6–7 м, положение которых фиксировалось радиолокаторами с 2 судов.

Постоянные течения в устьевых зонах рек и сейшевые в проливах изучались в зимнее время со льда. Для этих целей применялась импульсная дистанционная вертушка ИДВ-2М, разработанная в Отделе водных проблем Карельского филиала АН СССР и обладающая высокой чувствительностью в диапазоне малых скоростей, характерных для озер и водохранилищ. С ее помощью также был проведен ряд зондирований в летнее время. Для исключения искажений в показаниях прибора,



возникающих в результате рыскания судна относительно якоря, оно крепилось на 2 якоря (с носа и кормы) и наблюдения велись при скорости ветра не более 4–5 м/с.

Анализ полученных материалов свидетельствует о чрезвычайной сложности пространственной структуры течений, их значительной изменчивости во времени и тесной связи с синоптической обстановкой.

Большие объемы информации (от 1.5 до 10 тыс. значений по каждому горизонту на станциях) и продолжительность наблюдений позволили получить достоверные статистические характеристики скоростей течений. Поскольку закон распределения модулей скорости в озерах, являющийся исчерпывающей характеристикой случайной величины, неизвестен, мы воспользовались некоторыми числовыми параметрами, выражающими его основные черты. На рис. 19 и 20 для горизонтов 5–7 и 25 м представлены средние за все периоды наблюдений величины модулей скоростей течений, дисперсий, коэффициентов вариации, асимметрии и эксцесса, а также наибольших скоростей течений, когда-либо измеренных в Онежском озере при длительных регистрациях. Анализ рисунков свидетельствует о том, что средние скорости течений в открытом озере на верхнем горизонте составляют 10–20, а в закрытых губах 5–10 см/с, на нижнем же горизонте они равны 4–6 и 3–5 см/с соответственно. В верхних слоях воды отмечаются 2 зоны повышенной динамической активности — в южной и северо-западной частях озера.

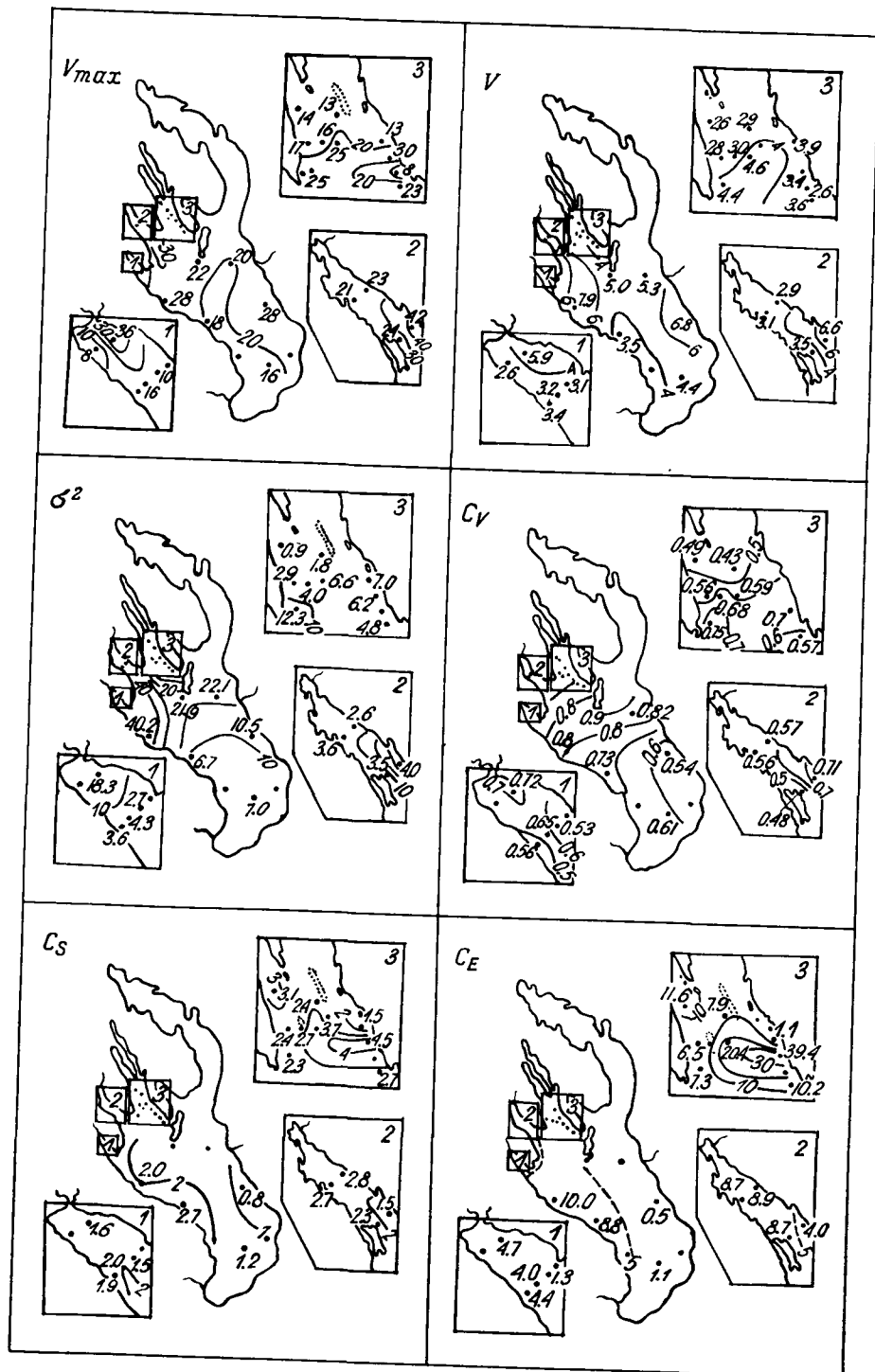
Карты максимальных и средних скоростей в целом соответствуют друг другу, однако абсолютные значения первых намного больше. Наибольшие максимальные скорости течений на горизонте 5–7 м имеют место также в северо-западной, самой глубоководной части Онежского озера, где они достигают 130 см/с. В закрытых губах и мелководных районах наибольшие скорости течений существенно меньше — 20–30 см/с.

Кроме среднего значения плотность распределения вероятностей модуля скорости течения характеризуется величиной дисперсии, служащей мерой его изменчивости. В открытом озере на верхнем горизонте обычны средние дисперсии, равные 50–100, а в закрытых губах — 10–50 $\text{см}^2/\text{с}^2$. В наиболее глубоководной северо-западной части озера они достигают даже 265, а на нижнем горизонте редко превышают 40 $\text{см}^2/\text{с}^2$ (как правило, 5–30).

Более удобно характеризовать степень изменчивости величиной коэффициента вариации, представляющего собой отношение среднего квадратического отношения к среднему значению ряда. В верхних слоях он равен 0.6–0.7, т. е. стандартное отклонение составляет 60–70% от средней скорости течений. На нижнем горизонте разброс средних коэффициентов вариаций шире — 0.5–0.9.

Рис. 19. Карты распределения максимальных (V_{\max}) и средних (V) скоростей течений (см/с) и их дисперсий (σ^2 , $\text{см}^2/\text{с}^2$), коэффициентов вариации (C_V), асимметрии (C_S) и эксцесса (C_E) на горизонте 5–7 м.

1–3 — районы исследований, представленные на врезках в большем масштабе.



Симметричность формы кривой плотности распределения вероятностей относительно среднего значения ряда характеризуется коэффициентом асимметрии. Анализ (см. рис. 19, 20) свидетельствует о преобладании его положительных значений. В нижних слоях воды несимметричность распределения скорости существенно больше — средний коэффициент асимметрии достигает 4.5. Наличие в основном положительной асимметричности позволяет утверждать, что значение средних скоростей течений на горизонтах больше наиболее вероятных для этих же мест, т. е. на всех станциях должно наблюдаться большое число относительно слабых скоростей течений, на фоне которых в короткие промежутки времени отмечаются их высокие значения. Такой вывод подтверждается гистограммами повторяемости скоростей [102].

Степень сглаженности или островецинности кривой распределения скоростей по сравнению с нормальным законом может быть оценена по значениям коэффициентов эксцесса, меньших или больших, чем 0. Средние величины их на горизонте 5–7 м свидетельствуют о том, что в одних случаях плотность распределения скоростей течений имеет более сглаженный вид, в других — более островецинный. Это указывает на увеличение значений со скоростями, отличными от средних в первом, и группировании их вблизи него — во втором случае. На горизонте 25 м все значения коэффициентов эксцесса положительны и достигают примерно в 4 раза больших величин, что, по-видимому, связано с регистрацией малых скоростей течений, близких к пороговой чувствительности приборов.

Таким образом, приведенные карты средних значений позволяют получить представление о характерных скоростях течений в Онежском озере и о форме кривой плотности распределения вероятностей в различных точках, что уже может быть непосредственно использовано при имитационном моделировании внутриводоемных процессов, связанных с динамикой вод.

Приведенные на рис. 19 и 20 средние и максимальные, инструментально измеренные скорости позволяют оценить роль различных видов течений в Онежском озере. Среди них выделяются: 1) ветровые (дрейфовые и градиентные), вызванные действием ветра на водную поверхность озера; 2) плотностные, создаваемые неравномерным распределением плотности воды из-за неодинакового прогрева весной и охлаждения осенью прибрежных мелководных и центральных глубоководных районов; 3) стоковые, возникающие в результате впадения в озеро рек; 4) длинноволновые, обусловленные как собственными колебаниями уровня озера (сейши), так и движениями частиц воды в длинных внутренних волнах, имеющих широкий спектр периодов колебаний.

Рис. 20. Карты распределения максимальных (V_{max}) и средних (V) скоростей течений (см/с) и их дисперсий (σ^2 , $см^2/с^2$), коэффициентов вариации (C_V), асимметрии (C_S) и эксцесса (C_E) на горизонте 25 м.

Обозначения те же, что на рис. 19.

В Онежском озере роль плотностных течений, вызванных длительным существованием термического бара, не может быть преобладающей, поскольку наибольшие скорости, рассчитанные динамическим методом [146], на поверхности на порядок меньше, чем полученные нами даже в слое 5–7 м, особенно если принять во внимание, что при расчетах учитываются не только собственно плотностные течения, обусловленные неравномерным нагреванием или охлаждением вод, но и другие виды градиентных течений, зависящих от ветра.

Удельный вес стоковых течений незначителен в течение всего года. Влияние их на поле скоростей течений сказывается лишь в приустьевых зонах. Так, исследования, проведенные в марте 1978 г. со льда вертушкой ИДВ-2М в районе впадения р. Шуи (среднегодовой расход воды $107 \text{ м}^3/\text{с}$) в Петрозаводскую губу [162], свидетельствуют о том, что по мере удаления от устья скорости течения быстро затухают. Ширина потока вод по изотaxe $1 \text{ см}/\text{с}$ в губе не превышает 250–300 м. С удалением от устья шуйское течение проследить удается в более глубоких горизонтах со скоростями, не превосходящими $3 \text{ см}/\text{с}$ уже в 1.6 км от устья. Небольшие скорости подледного стокового течения обусловлены низкими расходами вод р. Шуи в зимний период, с их увеличением в паводочный период влияние шуйского потока на динамику водных масс в губе возрастает.

Аналогично происходит и с водами р. Суны (среднегодовой расход около $60 \text{ м}^3/\text{с}$) в Кондопожской губе [102]. Струя перемещается главным образом в нижних горизонтах (2–5 м от дна) со скоростью 4–6 $\text{см}/\text{с}$. Зимний поток резко локализован — на расстоянии 3 км от места сброса ширина его не превышает 90–100 м, а максимальные скорости составляют 2–4 $\text{см}/\text{с}$. Они быстро гасятся, и за пределами 10-километровой зоны поток приборами практически не улавливается.

Роль инерционных колебаний уровня воды и пикноклина в развитии течений в крупных озерах до конца не ясна. Сейшевые течения, несмотря на постоянную генерацию, имеют, по-видимому, второстепенное значение, поскольку их вклад в общую дисперсию флуктуаций течений намного меньше, чем квазисиноптических колебаний [102, 148]. Однако роль их сильно возрастает в северном шхерном районе, где в проливах летом их скорости могут превышать 30 $\text{см}/\text{с}$ и 25 — зимой. В период ледостава они, по-видимому, являются основным типом течений в озере, но их скорости меньше пороговой чувствительности приборов БПВ-2 и РСМ-4 (1.5 $\text{см}/\text{с}$).

Дисперсия флуктуаций скорости течения, вызванная длинными внутренними гравитационными волнами, имеющими периодичность 12–14 ч, превосходит дисперсию сейшевых. Амплитуда колебаний скорости горизонтальных течений в отдельных периоды достигает в них 10 $\text{см}/\text{с}$ на горизонте 5 м и 5 $\text{см}/\text{с}$ — в нижележащих слоях.

Полученный материал показывает, что собственно плотностные, стоковые и длинноволновые течения имеют характерные значения скоростей, существенно меньшие наблюдаемых в Онежском озере. Данный факт свидетельствует о том, что в озере мощные течения

вызываются только ветром. Первые же длительные регистрации течений указали на их тесную связь с синоптической обстановкой [102]. На таком крупном озере, как Онежское, она очень сложна. Ветер создает в водоеме циркуляционные течения, которые не могут быть объяснены простым эффектом сгона–нагона, т. е. течением по ветру в верхних слоях и компенсационным — внизу, как это, например, предполагала А. Н. Охлопкова [146].

Построение достоверных схем течений, учитывающих их значительную пространственную неоднородность и временную изменчивость в зависимости от направления ветра, затруднено сложностью их измерений в реальных условиях, отсутствием единой методики наблюдений, эпизодичностью и несинхронностью последних, несопоставимостью результатов, полученных при различных синопт.ческих ситуациях. Установка многочисленных АБС, оснащенных самописцами течений, на длительный срок с учетом возможных изменений погодных условий позволяет избежать ряда указанных недостатков. Такой подход в сочетании с предположением, что одинаковая ветровая обстановка приводит к развитию в озере сходных циркуляционных течений в различные годы, дает возможность построить их схемы. К сожалению, ветровой режим над Онежским озером изучен недостаточно полно.

Анализ среднемесячных роз ветров, построенных по наблюдениям на станциях Маячный, Кондопога, Петрозаводск и Горка, показал, что каждому району, характеризующемуся ими, присуща своя собственная циркуляция воздуха, несколько отличная от общей. Так, на ст. Маячный, расположенной в открытой части озера, в теплое время года наблюдается почти равновероятное направление ветров, на ст. Кондопога преобладает ветер с юго-востока, на ст. Петрозаводск — с востока, на ст. Горка — с юго-востока и северо-запада. Такое разнообразие в направлениях ветра связано с ориентацией Кондопожской, Петрозаводской и Горской губ с юго-востока на северо-запад и наличием бризовых циркуляций. Именно поэтому при анализе течений, развивающихся в водоеме, использовались наблюдения за ветром, выполненные на метеостанции Маячный. По данным этой станции были выделены периоды устойчивых ветров по 4 основным четвертям — по оси озера и поперек его (большая детализация мешает недостатку данных по течениям). Вследствие несоответствия осей Петрозаводской и Кондопожской губ с генеральной, четверти ветра для них несколько отличались от озерных (на 30 и 20° соответственно).

Для этих ветров на рис. 21 и 22 представлены розы течений на горизонтах 5–7 и 25 м по каждой АБС. Понятно, что для составления достоверных схем течений в таком крупном озере, как Онежское, данного количества станций, естественно, недостаточно. Но даже и эта попытка уже позволяет сделать ряд важных выводов о характере течений как в самом озере, так и в его крупных заливах: 1) постоянной циркуляции вод в водоеме не наблюдается; 2) различные (более или менее типичные) схемы циркуляции определяются характерными ветровыми полями; 3) в целом, особенно в нижних слоях, отмечается преобладающее циклоническое вращение вод.

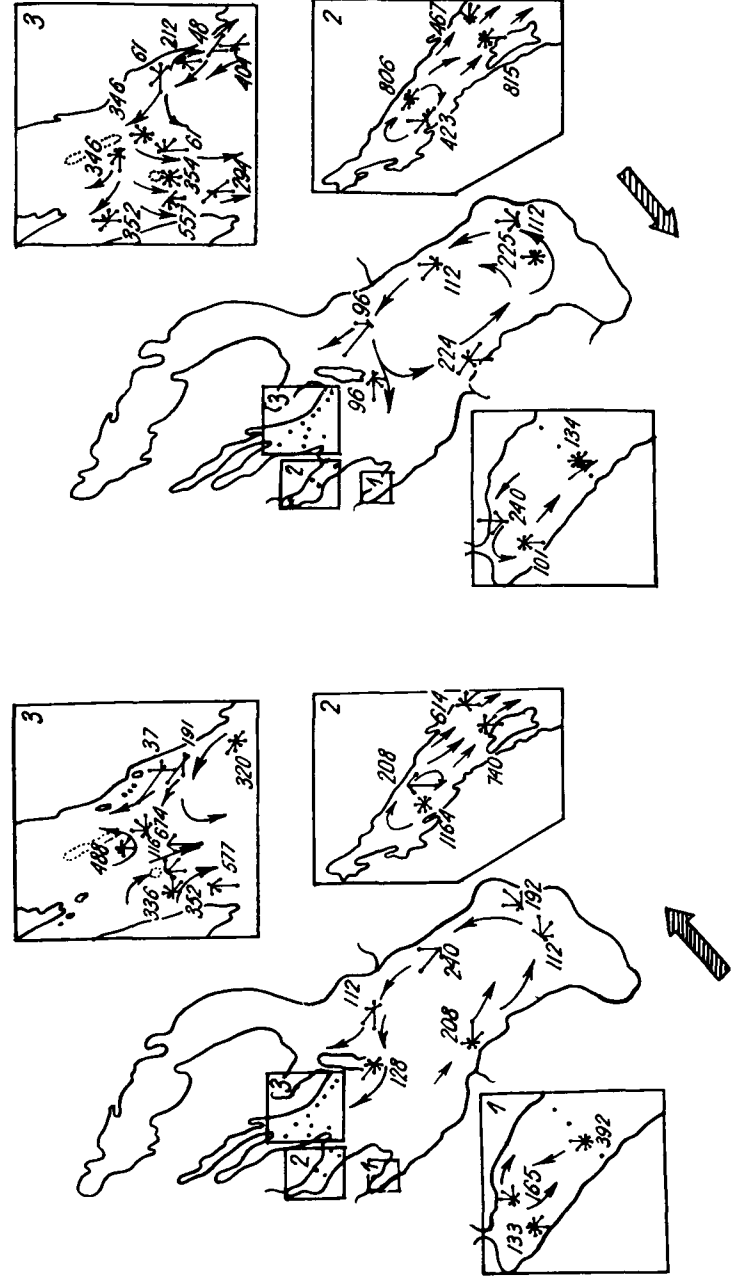
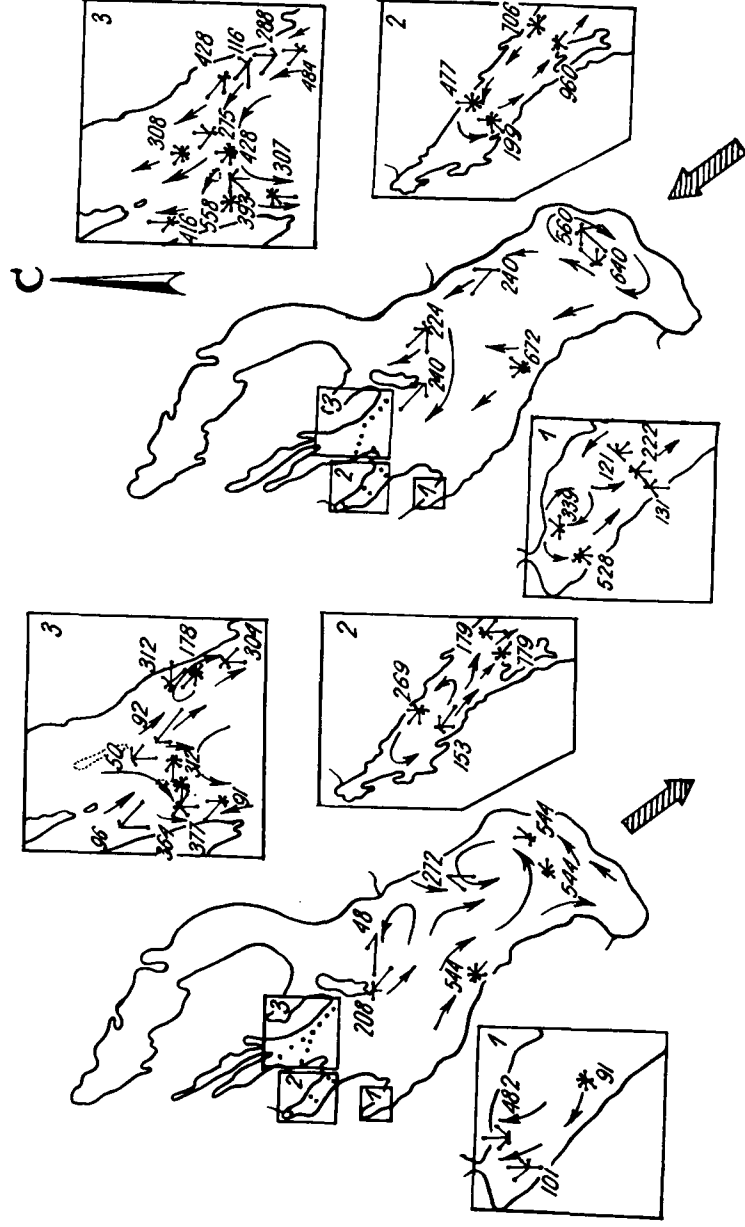


Рис. 21. Розы и схемы течений при ветрах различных направлений (горизонт 5–7 м).

Двойные стрелки — направления ветра. Арабские цифры на рисунке — число регистрации скоростей и направлений течений при данном ветре. Остальные обозначения те же, что на рис. 19.

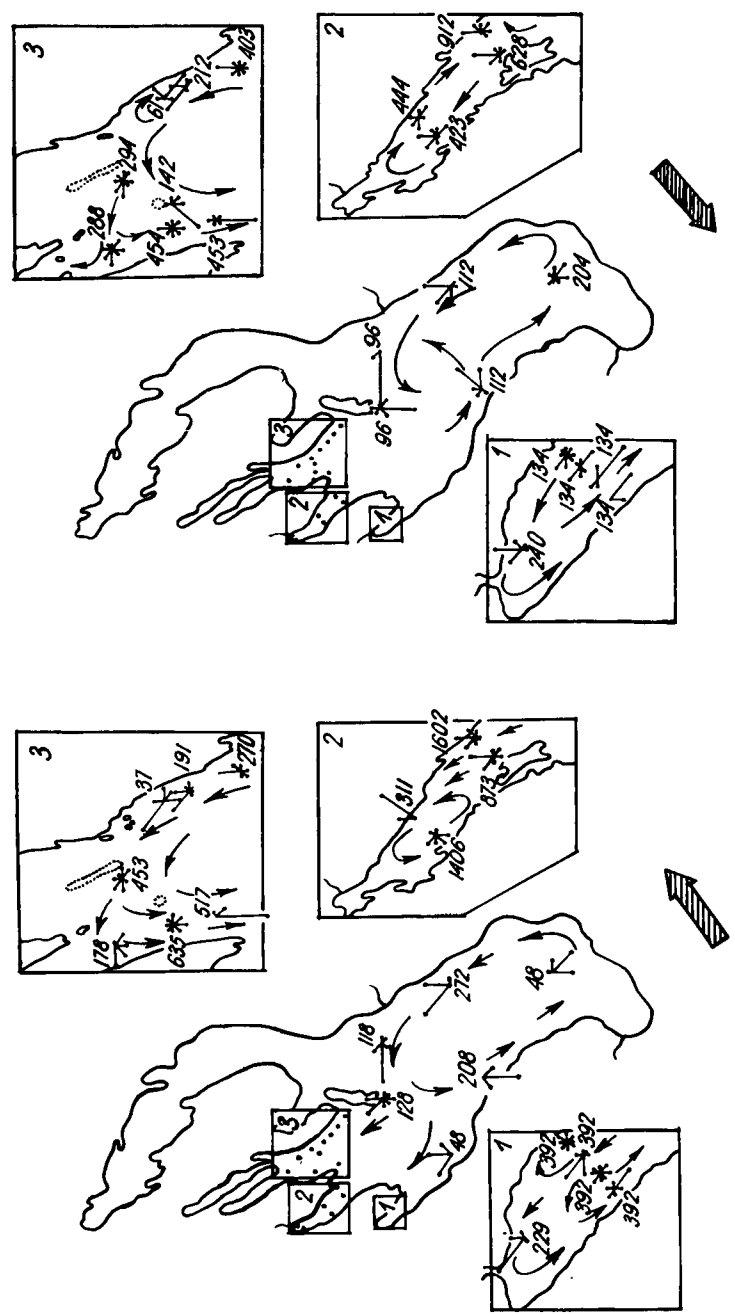
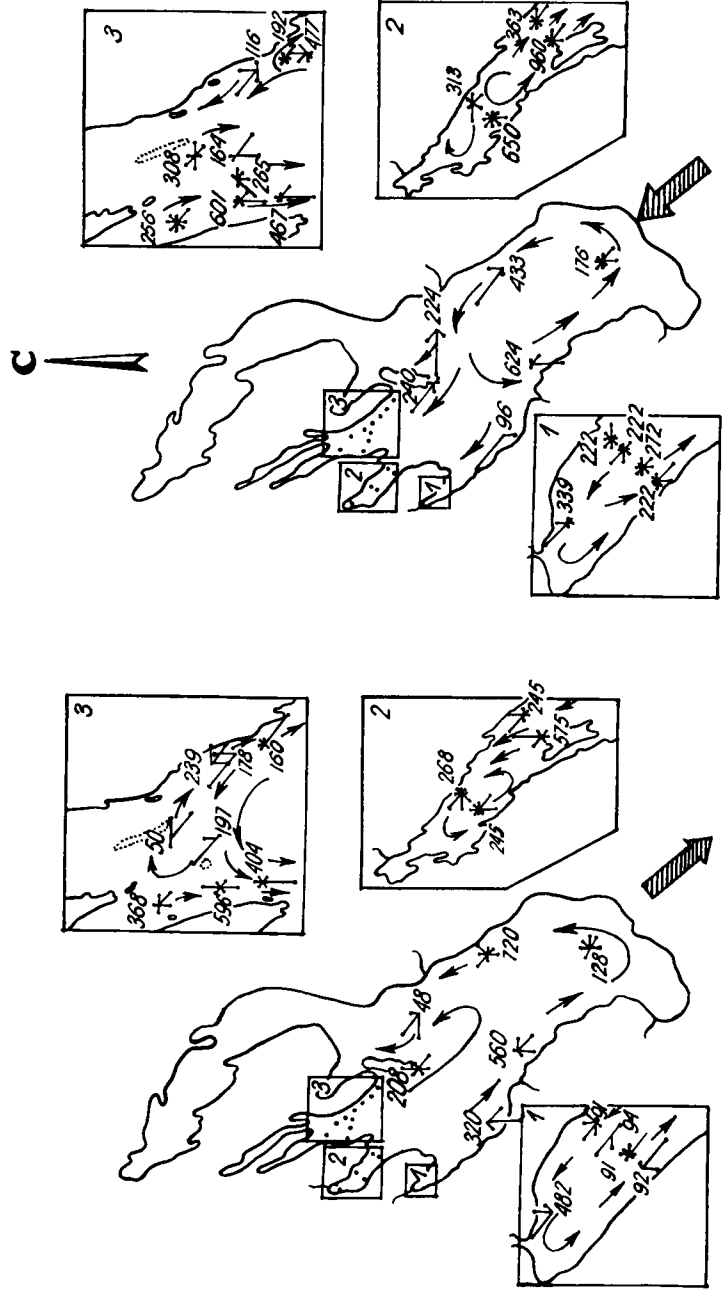


Рис. 22. Розы и схемы течений при ветрах различных направлений (горизонт 25 м).
 Обозначения те же, что на рис. 21.

Последнее, по-видимому, — результат проявления обнаруженных в озере вращающихся длинных внутренних волн с характеристиками, аналогичными таковым при суперпозиции встречных волн Кельвина. При типичных величинах плотностной стратификации и размерах Онежского озера их фазовая скорость составляет 25 см/с, а период первых 2 бароклинических мод — 16 и 8 сут.

Материалы последующих наблюдений за течениями позволят уточнить и детализировать предложенные схемы циркуляции вод Онежского озера.

Анализ результатов инструментальных измерений течений за навигационные периоды указывает на существование четких циклических увеличений и уменьшений их скоростей [94, 102, 162, 163]. Они прослеживаются как на фоне однонаправленного течения, так и при расслоении его по вертикали. Одновременно скорости течения флуктуируют с циклическими, составляющими десятки минут и часы. Причины такой изменчивости течений кроются в пространственной и временной неоднородностях поля ветра над регионом и в развитой системе инерционных колебаний уровня и пикноклина типа многоузловых баротропных и бароклинических сейш в озере, заливах, губах, которые, накладываясь друг на друга, приводят к возникновению сложной картины течений, не поддающейся простой интерпретации. В этом случае может быть полезным рассматривать течение как вероятностный процесс, что позволяет получить новые статистические оценки: ковариационные и спектральные функции. Такой подход получил широкое развитие при исследовании течений Онежского озера. Поскольку в настоящее время методы вероятностного анализа достаточно полно разработаны для скалярных гидрометеорологических процессов и полей, то исходные вектора течений раскладывались на компоненты.

Анализ автокорреляционных функций модуля и компонент скоростей течений Онежского озера [102, 162, 163, 241] указывает на многообразие законов, которым подчиняется изменчивость течений. В среднем линейная корреляционная связь между измеренными значениями скоростей течений через 4–10 ч в открытом озере и 2–6 ч в крупных заливах отсутствует. На большинстве станций автокорреляционные функции имеют сложный вид. Для преодоления этой трудности использовались функции спектральной плотности, позволяющие оценить распределение энергии колебаний по частотам. Анализ их свидетельствует, что наибольшие значения энергии флуктуаций течений приходятся на низкочастотный участок спектра. Общий вид функций спектральной плотности имеет одинаковую форму для всех станций Онежского озера, как для верхних (5–7 м), так и для нижних (25–30 м) горизонтов. Он характеризуется резким спадом энергии колебаний от нескольких суток до 20 мин. При этом изменчивость течений представляет собой полициклический процесс. На графиках спектральных плотностей выявляется ряд значимых энергонесущих зон, соответствующих периодам 6–8, 3–4, 2 и 1 сут, 12–14, 7–10, 3,5–4,5, 2–2,5 ч и целой серии еще более короткопериодных флуктуаций.

Характерным примером являются энергетические спектры пульсаций вдольбереговой и поперечной составляющих скорости течения для временных масштабов 20 мин–45 сут в прибрежной и глубоководной зонах, представленные на рис. 23. Они рассчитывались с использованием спектрального окна Парзена по часовым и среднесуточным значениям компонент скорости. Вследствие несовпадения дисперсий исходного и осредненного рядов оценки спектров колебаний в ряде случаев не стыкуются, что несколько затрудняет сравнение вкладов флуктуаций течений в различных частях спектра в общую дисперсию. Тем не менее совершенно четко прослеживается тенденция спада их энергии от 8 сут до 2 ч.

Исключение составляет изменчивость течений на верхнем горизонте прибрежной станции, где из-за элиазинга, вызванного большой энергией короткопериодных колебаний (с циклами более 0.5 ч^{-1}), в спектрах течений оценка дисперсии в высокочастотной области завышена. При этом общее монотонное уменьшение дисперсии нарушается наличием ряда мощных экстремумов в энергонесущих зонах, отмечаемых как на низких, так и на высоких частотах. Для оценки их достоверности на графики нанесены 80 %-ные доверительные интервалы.

Анализ функций спектральных плотностей свидетельствует о том, что главный вклад в дисперсию флуктуаций скорости течений вносит низкочастотные колебания, вызванные синоптической изменчивостью ветра. Спектры модулей скорости ветра в различные годы неодинаковы [163]. Значимые максимумы энергии колебаний обычно приходятся на периоды 16, 8, 4, 2 и 1 сут, однако некоторые из них в отдельные месяцы отсутствуют. В один год явно доминирующее положение занимает 8-суточная изменчивость, в другой — 4-суточная. Эти 2 частоты наряду с 16-суточной вносят наибольший вклад в дисперсию ветра в любые годы. Такие же периоды флуктуаций наблюдаются и в течениях. В масштабах времени, больших чем 1 цикл/сут, в спектрах компонент скорости течения присутствует целый ряд колебаний, вызванных длинными поверхностными и внутренними гравитационными волнами типа сейш.

В связи со сложностью рельефа дна и изрезанностью береговой линии Онежского озера идентификация даже баротропных сейш очень затруднена из-за их многочисленности и наложений. С уверенностью можно свидетельствовать только об одно- и двухузловых колебаниях уровня озера в продольной и поперечной плоскостях основного бассейна и некоторых заливов. Среди них различают [118]: 1) одноузловую продольную сейшу основной котловины озера, ось которой направлена от Усть-Вытегры на юге к Лижме на севере, со средним периодом 4 ч 20 мин; 2) двухузловую продольную сейшу озера с периодом около 2 ч 10 мин; 3) одноузловую поперечную сейшу озера с периодом порядка 2 ч 15 мин.

Многоузловые баротропные сейши из-за недостаточности имеющихся данных не выделяются. Внутренние сейши в Онежском озере достоверно не идентифицированы. Периоды их зависят в первую очередь от сильно изменчивой стратификации вод и морфометрии бассейна.

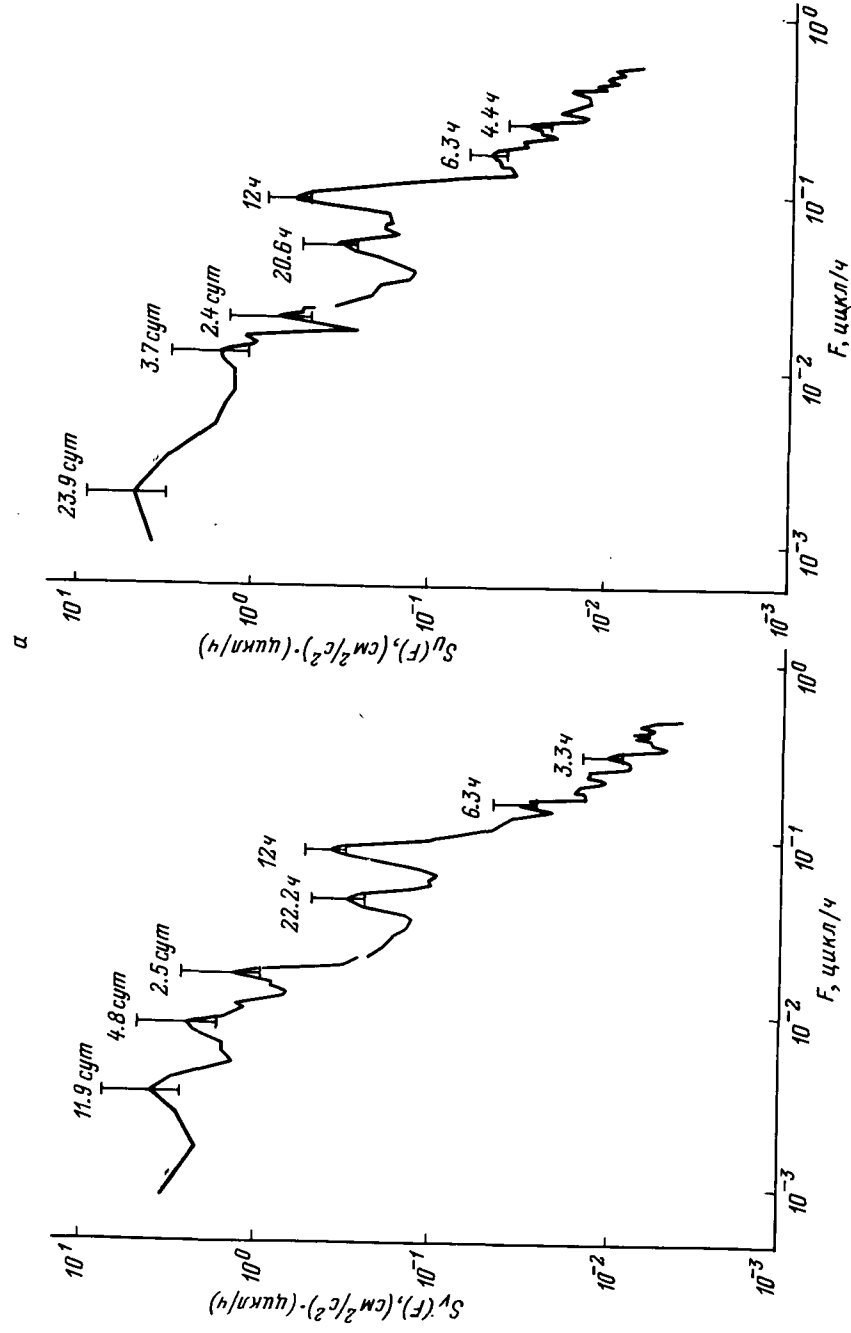


Рис. 23. Функции спектральных плотностей вдольбереговых $[S_V(F)]$ и поперечных $[S_U(F)]$ компонент скоростей течений в глубоководной (а) и прибрежной (б) зонах (горизонты 5 и 25 м).

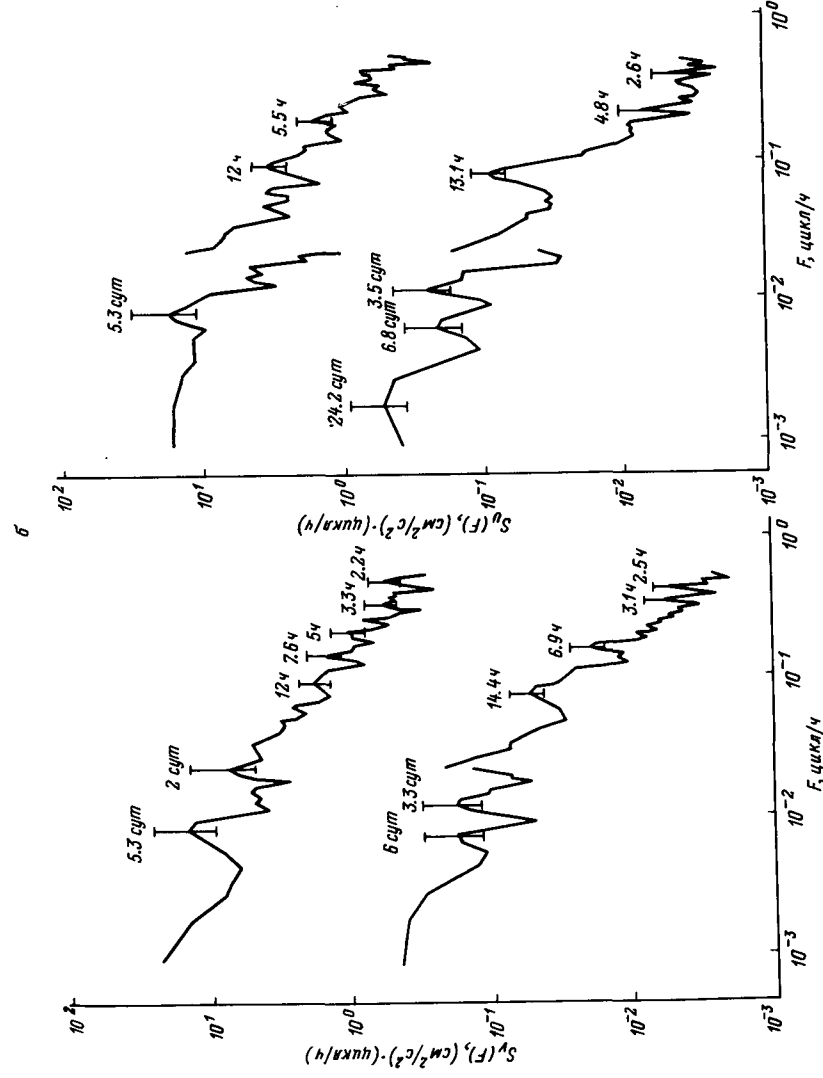


Рис. 23 (продолжение).

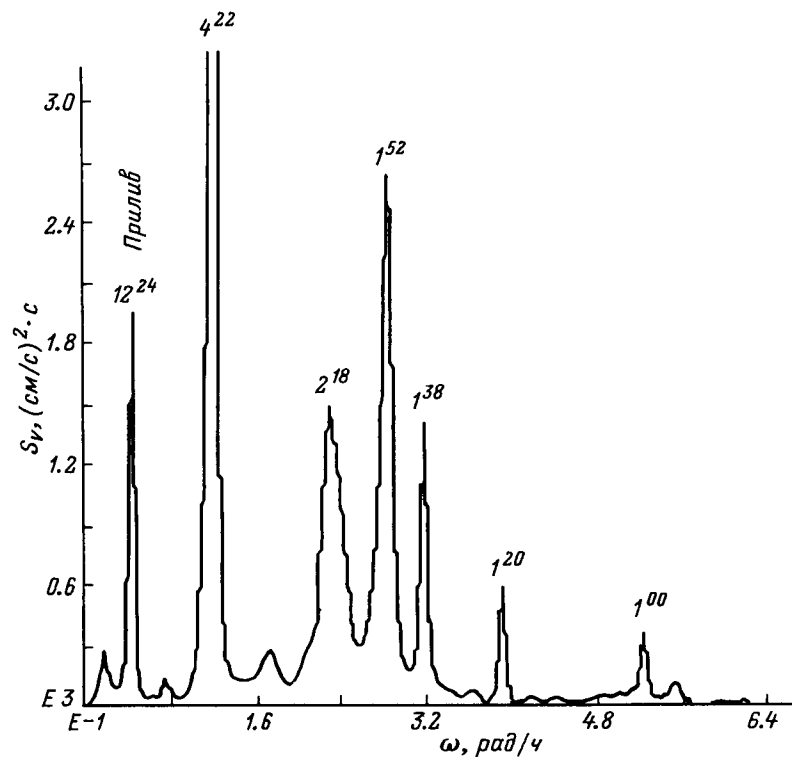


Рис. 24. Спектр течений (S_v) в Соломенском проливе, рассчитанный методом максимальной энтропии.

Цифры на графиках — периоды колебаний в часах и минутах; ω — частота.

Исходя из наблюдающихся там градиентов плотности, можно ожидать внутренние сейши с периодами от нескольких часов до нескольких суток.

Сведения, важные для понимания динамики вод в озере, были получены при экспериментальных исследованиях сейш в зимний период в Соломенском проливе, соединяющем Петрозаводскую губу с Логмозером. Они указывают на наличие совокупности сейшевых колебаний даже в подледный период при отсутствии активного ветрового воздействия на водную поверхность и на существенную роль гравитационных колебаний в формировании пространственно-временной изменчивости течений в это время. Проявление сейш в проливе выражается в том, что течение, вызванное стоком р. Шуи и направленное в Петрозаводскую губу, меняет свое направление на противоположное несколько раз за сутки. Это приводит к перераспределению энергии в поле скорости течения с циклическими, соответствующими периодам собственных колебаний водных масс в бассейнах Онежского озера, Логмозера и Петрозаводской губы. При этом наибольший вклад в изменчивость течений в проливе вносит основная одноузловая

баротропная сейша котловины Онежского озера, имеющая период 4 ч 20 мин (рис. 24). Спектральные оценки, полученные методом максимальной энтропии, указывают на изменчивость течений в проливе, вызванную и полусуточным лунным приливом.

Результаты исследований вертикальной структуры течений в глубоководной части Онежского озера представлены на рис. 25. Приведенная суточная изменчивость векторов скоростей течений на горизонтах 3, 8, 12, 30, 50 и 69 м указывает на отчетливую инерционность, усиливающуюся в подповерхностных слоях. Она проявляется в том, что вектор скорости течения совершает полный поворот по часовой стрелке за период 13.7 ч, равный инерционному на широте Онежского озера. Наблюдения свидетельствуют о том, что экмановская глубина трения дрейфового течения, расположенная на горизонте 12 м, находится выше термоклина. Обращает на себя внимание рост скорости течения от поверхности до глубины залегания термоклина, где она составляет 36 см/с, что является, по-видимому, результатом вклада внутриволнового течения, развивающегося в зоне термоклина. В глубинных слоях течение становится более устойчивым по направлению и подверженным меньшей временной изменчивости.

Таким образом, главная причина возникновения мощных изменчивых циркуляционных течений в Онежском озере — непостоянное поле ветра над его акваторией. Вследствие этого постоянной циркуляции вод в озере не существует. Однако в нижних его слоях наблюдается преобладающее медленное циклоническое вращение вод.

Эмпирические распределения модуля и составляющих скорости течения в большинстве случаев отличаются от нормального. Кривые плотности распределения вероятностей эмпирических рядов имеют положительную асимметрию и чаще всего носят более островершинный характер по сравнению с построением согласно нормальному закону распределения.

Вариации течений в масштабах времени от 20 мин до 45 сут представляют собой полициклический процесс, обусловленный синоптической изменчивостью атмосферных воздействий, а также длинными баротропными и бароклинными волнами типа сейш. Общий вид функций спектральной плотности течений имеет одинаковую форму во всех районах озера. Он характеризуется резким падением энергии флуктуаций течений с уменьшением периода колебаний и наличием экстремумов в энергонесущих зонах.

3.4.2. Математическое моделирование течений озера в период гомотермии

В основу исследования структуры и изменчивости скоростного поля был положен метод полигонных измерений с концентрацией всей измерительной техники последовательно на характерных участках (открытая часть озера, отдельные крупные заливы). В результате

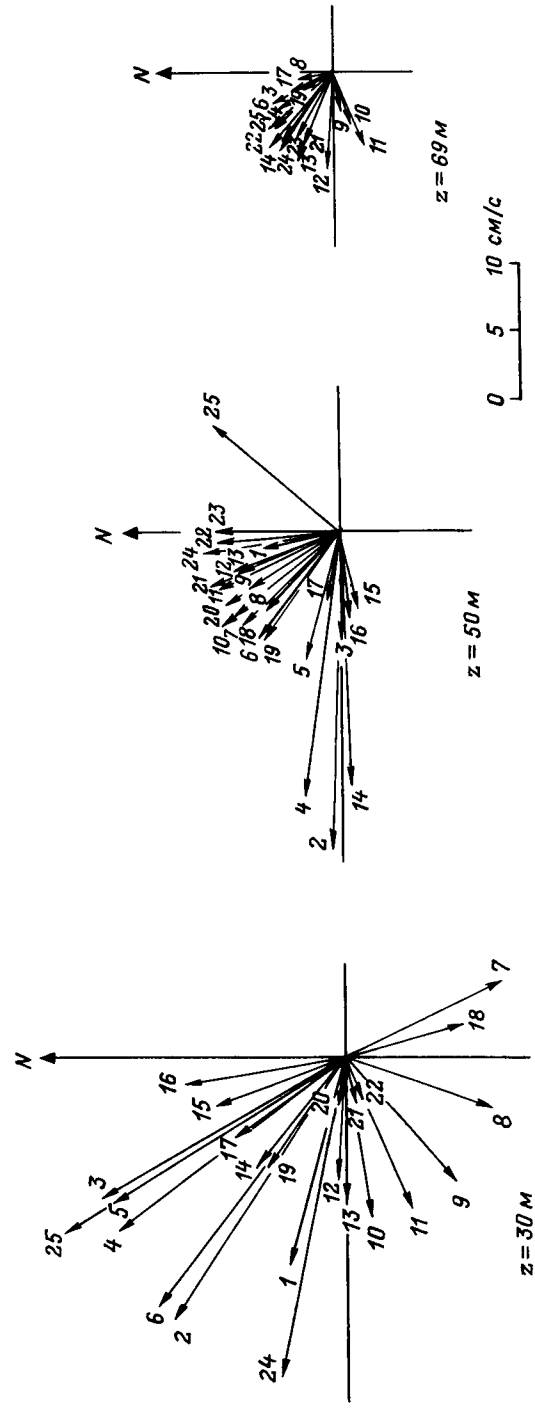
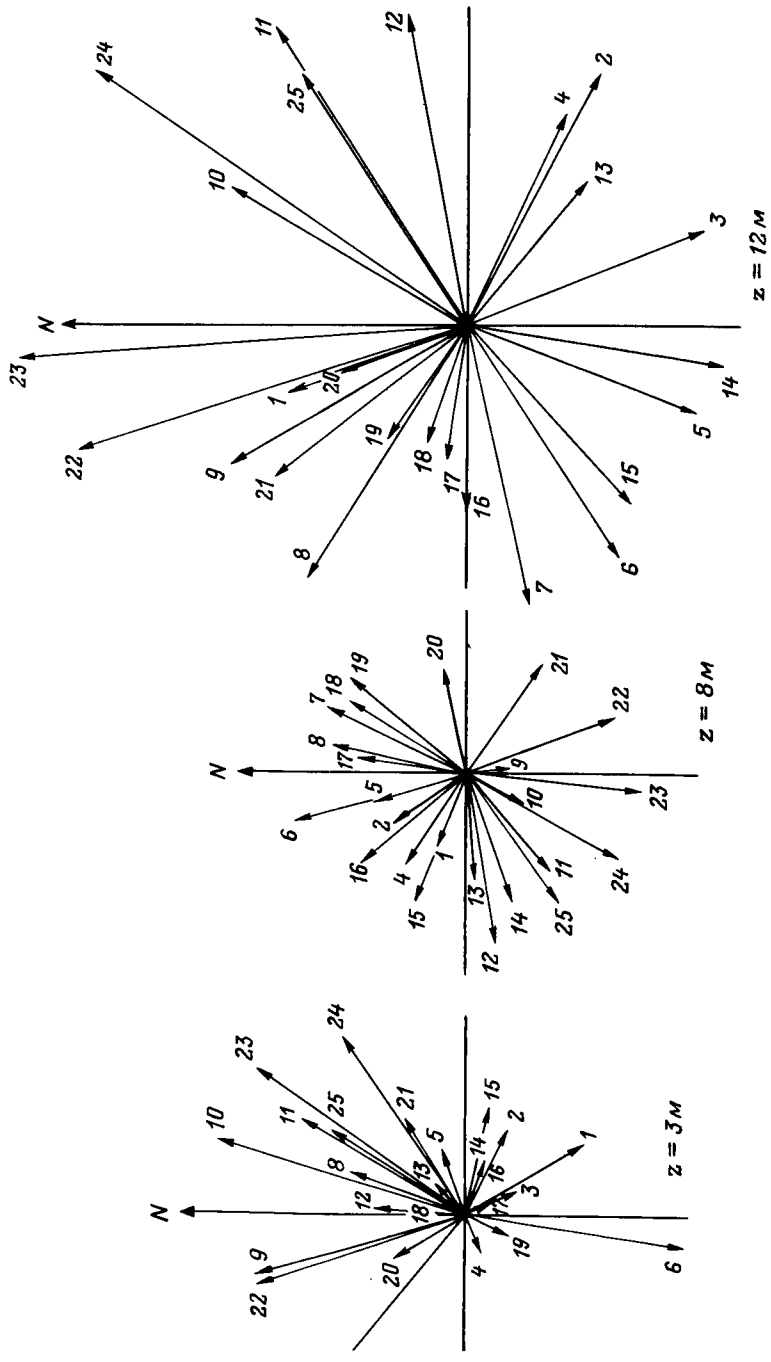


Рис. 25. Изменчивость течений на разных горизонтах (z) в глубоководной зоне Онежского озера (1985 г.). Арабские цифры на рисунке – последовательные номера векторов течений, измеренные с интервалом в 1 ч.

были получены долговременные ряды измерений в отдельных точках озера, которые расположены в пространстве очень далеко друг от друга, и их явно недостаточно для составления детальных схем течений в отдельных районах водоема. Кроме того, даже при долговременных измерениях в отдельных точках можно построить векторы скорости течений не для всех характерных синоптических ситуаций. При этом нужно учитывать, что измеряется суммарная скорость, обусловленная действием сразу нескольких факторов с разными временными масштабами, которые могут проявлять себя еще и в зависимости от местоположения прибора в озере. Некоторые точки, в которых проводятся измерения, могут оказаться не характерными для данного района водоема, например из-за особенностей его морфометрии. Вертикальная компонента скорости течения в настоящее время инструментально не измеряется.

Поэтому для изучения динамики вод в озере наряду с экспериментальными работами необходимо использовать методы моделирования. В настоящем разделе особенности течений Онежского озера рассмотрены для периода гомотермии.

На основе метода полных потоков А. И. Фельзенбаума для случая мелкого моря [237] нами разработана численная модель, получены схемы установившихся ветровых течений, интегральной циркуляции вод в Ладожском [110] и открытой части Онежского озера [100–102, 106, 222], заливе Большое Онего [107, 223], Кондопожской и Петрозаводской губах Онежского озера [99, 104, 107].

Эта модель учитывает основные факторы, определяющие формирование скоростного поля в водоемах: действие ветра на водную поверхность, расходы впадающих притоков, турбулентный обмен по вертикали, морфометрические особенности бассейна и рельеф дна. Она позволяет исследовать горизонтальные особенности полей скорости, определить распределение скорости течений по вертикали, оценить влияние ветра, дна и берегов на характер циркуляционных процессов, выявить роль стоковых и компенсационных течений, изучить водообмен в озере. Однако при этом не рассматриваются нелинейные эффекты, макротурбулентность и нестационарность. Поэтому важно построить новую математическую модель ветровых течений с учетом горизонтального турбулентного обмена, неустановившегося характера движения и инерции водных масс. Желательно, чтобы она явилась результатом развития предыдущей модели.

Для этого вначале разовьем дальше метод, разработанный А. И. Фельзенбаумом для морских течений, с учетом нестационарности, нелинейности и макротурбулентности и построим на его основе численную модель. Для расчета течений в однородном по плотности, ограниченном водоеме используем в квазистатическом приближении и приближении Буссинеска для несжимаемой жидкости уравнения движения и неразрывности.

Для системы принимаем следующие граничные условия: прилипание на дне, „твердую крышку” и тангенциальное напряжение ветра на поверхности озера. Предполагается, что границы рассматриваемой

области вертикальные, задача решается без учета бокового обмена. Представим скорость течения в виде суммы средней скорости и отклонения. С учетом этого интегрируем исходные уравнения, проводим некоторые преобразования и записываем исходную задачу в виде 2 систем — осредненной и отклонений, удовлетворяющих одним и тем же граничным условиям. Проводим перекрестное дифференцирование осредненных уравнений, вводим функцию тока, вихря и получаем уравнение вихря.

Задавая тангенциальное напряжение ветра на поверхности озера, мы можем решить это уравнение, рассчитать функцию тока и определить горизонтальные компоненты вектора средней скорости течения. При таком решении задачи нами не получается величин скорости течений на горизонтах и также не учитываются члены, содержащие отклонения скорости от среднего значения, которые мы в дальнейшем будем называть дисперсионными. Они обычно приравниваются к 0. Поэтому рассматриваем решение, удовлетворяющее как уравнению вихря с дисперсионными членами, так и системе для отклонений. Проводим безразмерный анализ для уравнений вихря и отклонений. Показываем, что в уравнении вихря можно оставить все члены, а для отклонений использовать приближение, аналогичное приближению Экмана.

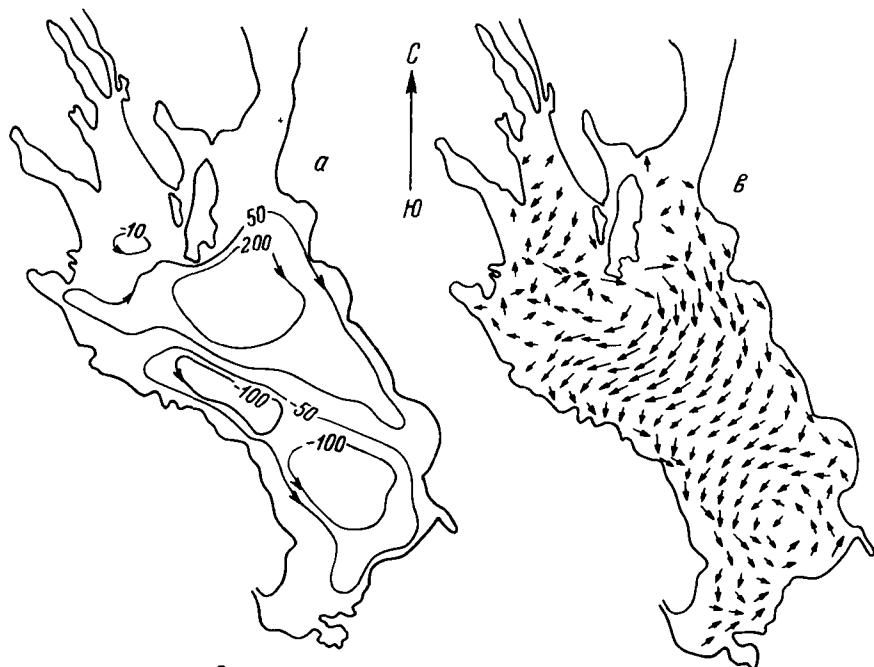
Следовательно, решение исходной системы сводится к совместному решению уравнения вихря и приближения Экмана для отклонений, которое допускает аналитическое решение, выраженное через среднюю скорость и напряжение трения на поверхности озера. Из приближения Экмана получаем соотношения между трением на дне, средней скоростью и тангенциальным напряжением ветра на поверхности водоема. Полученные соотношения проставляем в уравнение вихря и с точностью приближения Экмана определяем дисперсионные члены и трение на дне.

Решение исходной задачи сводится к решению уравнения вихря и использованию формул, связывающих горизонтальные составляющие скоростей течений со средней скоростью и тангенциальным напряжением трения ветра на поверхности озера. С помощью этих формул и уравнения неразрывности определяется вертикальная составляющая скорости течения.

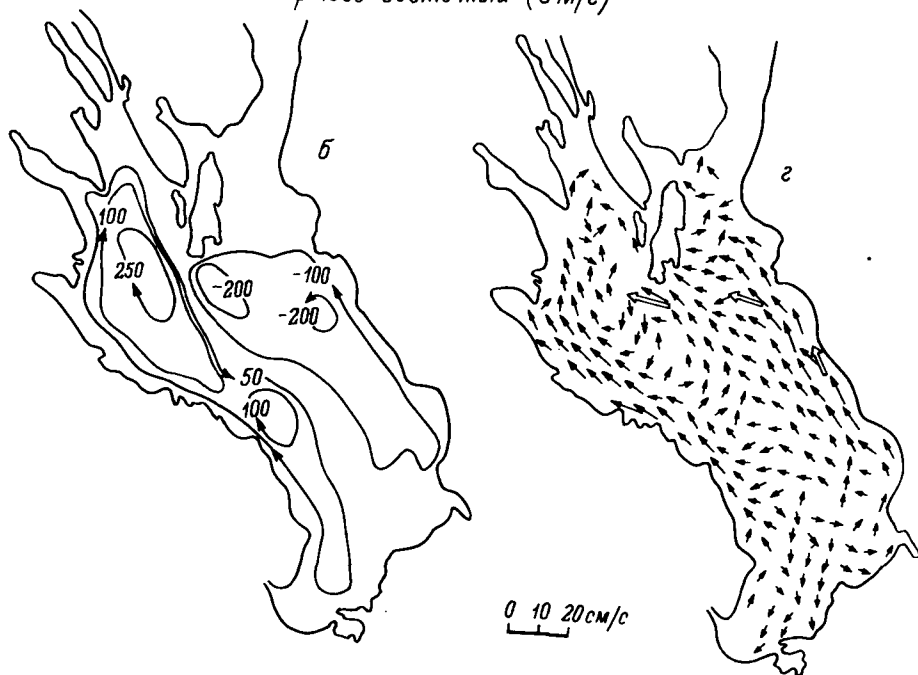
Этот результат получен для глубокого озера. В случае мелкого водоема, когда можно пренебречь силой Кориолиса, вместо приближения Экмана для уравнений отклонений используем приближение Куэтта. Проводя преобразования аналогично случаю глубокого водоема, получаем уравнения вихря и формулы для расчета компонент течений.

При разработке данного теоретического метода широко использовались характерные значения величин, присущие водоему и изучаемому явлению, полученные в результате экспериментальных исследований. Как уже отмечалось выше, проведенные натурные измерения течений в Онежском озере позволили изучить их вертикальную структуру, определить характерные горизонтальные скорости и циркуляции. Все это нашло свое отражение при безразмерной оценке уравнений

Ветер север-северо-восточный (8 м/с)



Ветер юго-восточный (8 м/с)



для отклонений, определении коэффициента при нелинейных членах и правой части уравнения вихря. Было показано, насколько обоснованно можно в качестве нулевого использовать то или иное приближение и с какой степенью точности. Получены характерные значения коэффициента при нелинейных членах в зависимости от типа водоема и внешних условий (скорости ветра).

Изложенный выше подход дает возможность максимального использования данных натуральных измерений течений для изучения динамики вод озер методами математического моделирования. При этом без ущерба для точности решения исходная задача из трехмерной преобразуется в двухмерную и вместо системы используется одно уравнение. Перспективность такого направления связана с актуальными задачами моделирования экосистем.

На основе изложенного выше метода были построены и численно реализованы на ЭВМ гидродинамические модели, проведены численные эксперименты при характерных синоптических ситуациях в Онежском озере для случая нестратифицированного водоема.

Для выполнения расчетов озеро было покрыто квадратной сеткой, включающей 426 внутренних узлов. Шаг сетки выбирался с учетом характерных пространственных размеров неоднородностей поля скорости, рельефа дна, изрезанности берегов и был принят равным 3750 м. Средний приток в озеро за многолетний период составил 490, сток — 570 м³/с. Недостающий приток отнесен к разности между количеством осадков и величиной испарения и равномерно распределен вдоль границы водоема. Горизонтальные составляющие скорости течения определялись на 13 горизонтах (0, 5, 7, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45, 50 и 55 м). Расчеты выполнены для север-северо-восточного, восток-северо-восточного, восток-юго-восточного, юго-восточного, юг-юго-восточного, запад-юго-западного и север-северо-западного направлений ветра (скорость 4 и 8 м/с).

При север-северо-западном ветре со скоростью 8 м/с в южной части Онежского озера и у его западного побережья формируются циклонические циркуляции. В центральной же части водоема развивается антициклоническая циркуляция со значением интегральной функции тока $\psi = -48\ 000$ м³/с в центре, которая распространяется на северо-запад до района Петрозаводской губы, а на юго-востоке включает в водообмен воды восточной части озера (рис. 26, а). Скорости течения с глубиной уменьшаются. На горизонте 7 м они составляют 3–12 см/с (рис. 26, в), 20 м — 2–8, а на глубине 30–45 м наблюдается компенсационное течение со скоростью 1–7 см/с.

Под влиянием ветра юго-восточного направления (8 м/с) у западного берега озера образуется антициклоническая циркуляция вод, внутри которой можно выделить 2 отдельных круговорота со значениями ψ в центрах 15 000 и 30 000 м³/с (рис. 26, б). У восточного

Рис. 26. Схема интегральной циркуляции (а, б) и течений (в, г) Онежского озера.

в, г — горизонт 7 м.

берега и в центральной части озера развивается циркуляция противоположного знака, внутри которой находятся 2 вихря со значениями ψ в центрах — 22 000 и 26 000 м³/с. В поверхностном слое воды течение направлено по ветру, скорость его в зоне раздела между циркуляциями составляет 3–7 см/с, вдоль западного и восточного берегов — 10–20 и в остальной части водоема — 6–24 см/с (рис. 26, г). Максимальные скорости течений наблюдаются у западного и восточного берегов, что совпадает с данными других исследователей. На глубине 20 м отмечается компенсационное течение со скоростью 2–6 см/с, и только у восточного берега циклонический круговорот (рис. 26, б) проникает до глубины 25 м, что отмечается и по натурным данным.

Результаты расчета на ЭВМ сравнивались с данными наблюдений, полученными на гидрофизическом полигоне в 1976 г. для юго-восточного ветра (8 м/с) продолжительностью более суток. На рис. 26, г представлены средние за 10 ч, измеренные (отмечены двойной стрелкой) и рассчитанные векторы течений для горизонта 7 м. Разница в направлениях течений по 3 буйковым станциям не превышала 10–25°, а расчетные скорости оказались несколько меньше измеренных (рис. 26, г). Не удалось сравнить расчетные и натурные данные по 2 другим станциям — одна из них не вошла в сеточную область, а на другой не сработал прибор на верхнем горизонте. В нижнем слое разница в направлениях для 4 станций составила 20, 40, 70 и 120°. Это связано, по-видимому, с недостатками самой расчетной схемы, а также с возможным влиянием неровностей рельефа дна на показания приборов, находившихся на расстоянии 4–5 м от грунта. Эти неровности имеют размеры меньше шага сетки и, естественно, не учитываются в расчетах.

Представляет интерес сравнение результатов расчетов с наблюдениями за течениями, проведенными с использованием метода Лагранжа. Построенное поле осредненных за 4–8 ч скоростей перемещения вех за период наблюдений (2.5 сут) свидетельствует о формировании при север-северо-западных и север-северо-восточных ветрах (средняя скорость 6 м/с) в южной части Онежского озера на горизонте 4–6 м циклонической циркуляции (рис. 27). Средние интегральные скорости в этом слое составили 250–400 м/ч (7–11 см/с) у западного и 150–300 м/ч (4–8 см/с) — у восточного берега. Такая циклоническая циркуляция с центром в середине разреза мысов Чейнаволоок–Андомский наблюдается по полю течений, рассчитанному для горизонта 7 м по численной модели для север-северо-восточного ветра со скоростью 8 м/с (рис. 27). Она захватывает оба берега и имеет диаметр около 30 км. Расчетные скорости течения составили 200–300 м/ч (5.5–8 см/с) у западного и 150–250 м/ч (4–7 см/с) — у восточного берега. При этом ветре в южной части озера наблюдается интегральная циклоническая циркуляция, совпадающая в основном с описанным выше круговоротом.

Сравнение результатов расчетов и измеренных по методу Лагранжа течений имеет свои преимущества, так как сразу видно их совпадение. Несоответствие в отдельных точках не меняет представления

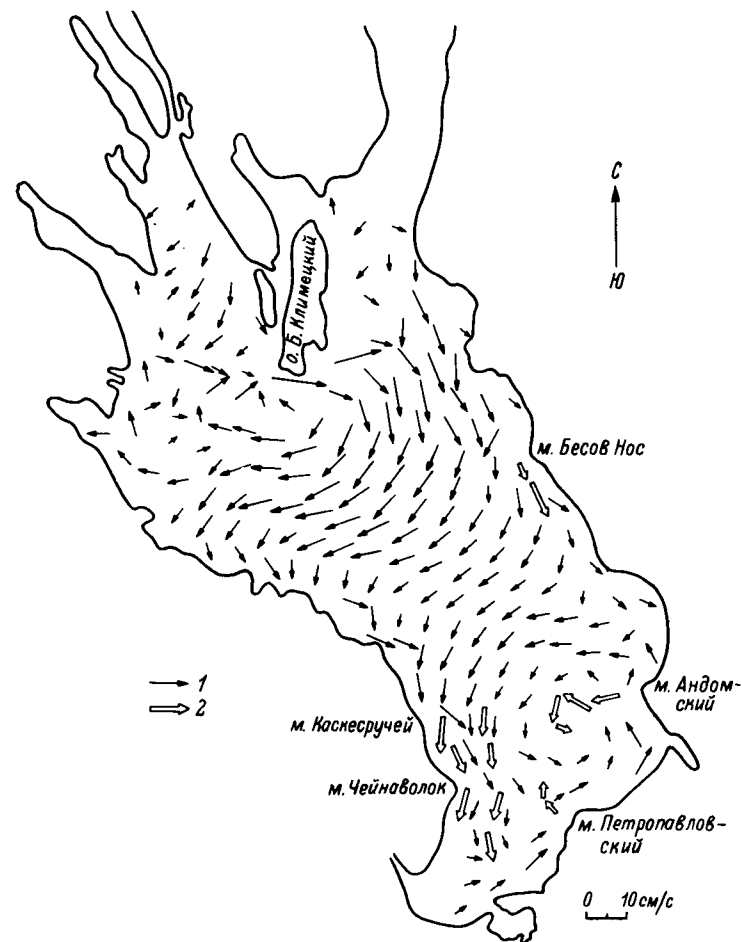


Рис. 27. Схема течений Онежского озера.

Векторы течений, полученные в результате: 1 — расчета (горизонт 7 м, ветер север-северо-восточный, 8 м/с), 2 — перемещения свободно плавающих вех.

о совпадении общего переноса. Соответствие в отдельных точках результатов расчетов и измеренных течений по методу Эйлера не гарантирует совпадения в других точках и достоверности картины течений в целом.

На рис. 26 и 28 представлены схемы интегральных циркуляций, по которым можно последовательно проследить их изменение в Онежском озере при переходе ветра по часовой стрелке от север-северо-западного до запад-северо-западного направления.

В зимний период, когда озеро покрыто льдом, основную роль в динамике его вод играют стоковые течения. Для случая отсутствия ветра над озером рассчитана интегральная циркуляция вод и поле скоростей стоковых течений на различных горизонтах. Изолинии

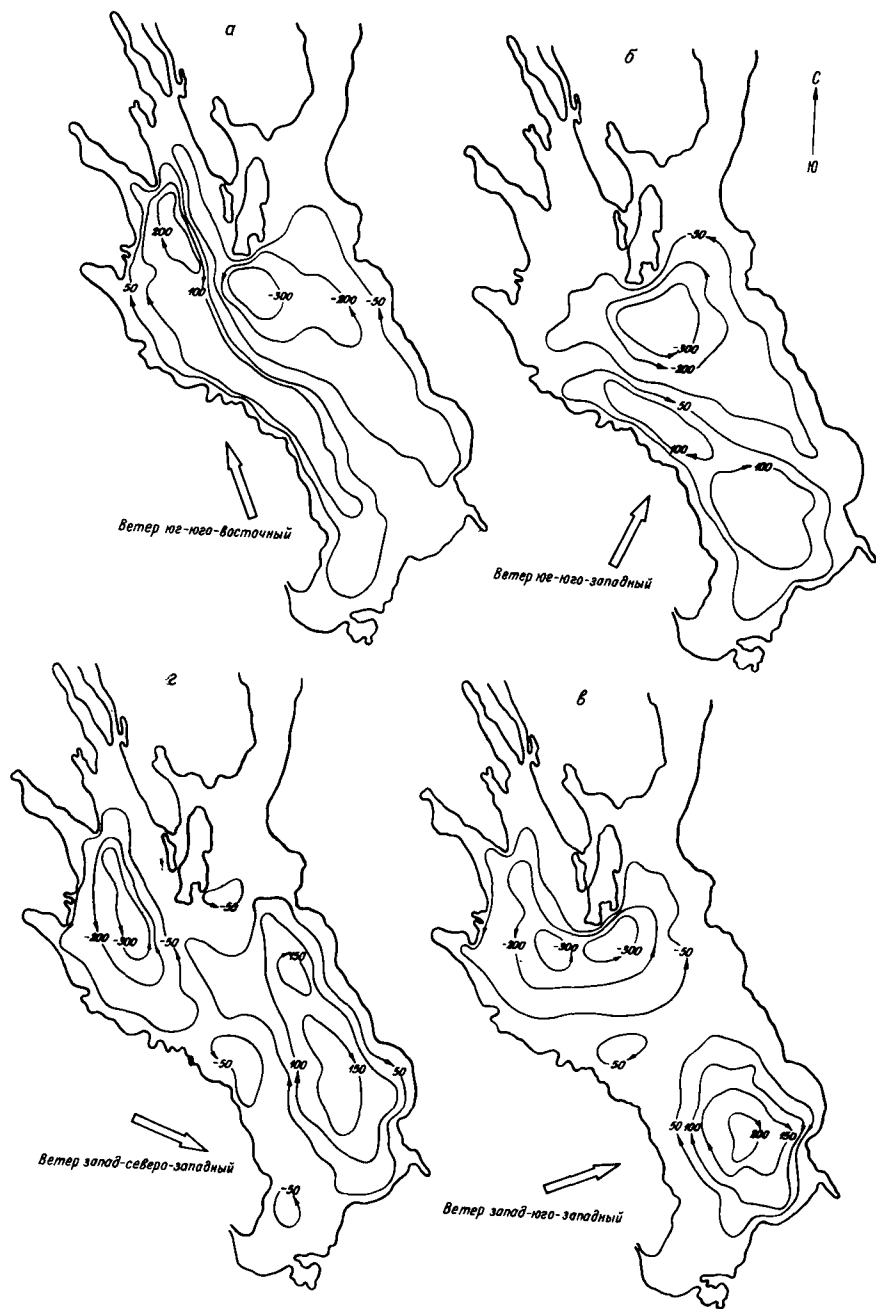


Рис. 28. Схемы интегральных циркуляций вод Онежского озера ($\psi \cdot 10^{-2} \text{ м}^2/\text{с}$).

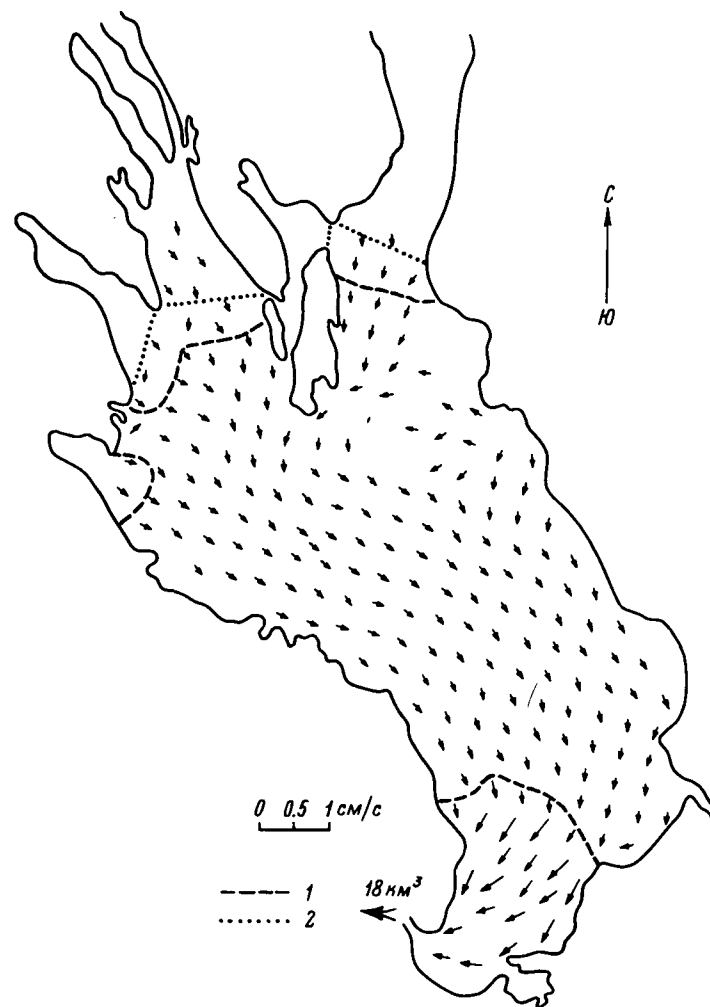


Рис. 29. Схема стоковых течений Онежского озера (горизонт 5 м) и зоны переноса вод за период ледостава (4 мес).

Границы: 1 – зоны переноса вод, 2 – губы залива.

функции тока, почти равномерно распределенные по акватории открытой части Онежского озера, постепенно сходятся при подходе к мелководной юго-западной части водоема, т. е. средние скорости потоков приблизительно равны и увеличиваются по мере приближения к истоку р. Свири. В открытой части озера на горизонте 5 м стоковые течения направлены на юго-восток со скоростями порядка 0.1 см/с (рис. 29). При подходе к мелководной Свирской губе они поворачивают на юго-запад, а скорости их увеличиваются до 0.3–1 см/с. При таких малых скоростях течений за зимний период вода из заливов и губ перемещается

на 8–10 км от их границ, т. е. попадает в пределы зоны водообмена с открытой частью озера (рис. 29). В юго-западной мелководной части Онежского озера влияние стоковых течений более ощутимо: с момента установления ледостава до его разрушения воды озера подходят к истоку р. Свирь уже на расстоянии 35–40 км.

В безледоставный период доминирующим фактором в формировании циркуляции озерных вод является ветер. Влияние естественного стока на интегральную циркуляцию в водоеме, вызванную ветром, незначительно. Расчетные скорости стоковых течений на порядок меньше ветровых. Поля скоростей течений, полученные для наиболее часто встречающихся синоптических ситуаций с учетом и без учета стоковых течений, за исключением лишь юго-западной части Онежского озера, практически не отличаются.

Для проведения численных экспериментов залив Большое Онего и прилегающая к нему часть озера были покрыты квадратной сеткой, включающей 520 внутренних узлов с шагом 1250 м. На жидкой границе поставлено условие свободного протекания. Расчеты проведены для преобладающих в навигационные периоды 1977–1979 гг. направлений ветра (юг-юго-восточное, север-северо-западное, северо-восточное).

Под действием юг-юго-восточного ветра скоростью 5 м/с у восточного берега залива образуется циклоническая циркуляция вод, внутри которой можно выделить 2 отдельных круговорота со значениями интегральной функции тока ψ , равными в центрах –6000 и 5000 м³/с. У западного берега развивается циркуляция противоположного знака, которая охватывает большую площадь в районе границы с открытой частью Онежского озера. Значение функции ψ в центре циркуляции равно 13 000 м³/с. Поверхностное течение, за исключением центральной части залива, совпадает с направлением ветра, а скорость его изменяется в пределах 2–20 см/с. По полю течений на горизонте 7 м можно выделить зоны интегральных циркуляций. Скорости течений составляют 2–4 см/с в зоне раздела между циркуляциями, 3–8 – у западного и 4–9 см/с – у восточного берега. На глубине 20 м отмечается ослабление вдольбереговых течений (1–2 см/с) и увеличение скорости (2–6 см/с) в центральной части залива. На горизонте 30 м наблюдается противотечение со скоростью 4–7 см/с в глубоководной зоне и 1–2 см/с у берегов.

Описанные выше циркуляции наблюдались инструментально в заливе в июне–июле 1977 г. Они проявились как преобладающие для характерных в тот период ветров южного и юго-восточного направлений (41%) со скоростью 5–6 м/с. Поэтому, например, рассчитанные для юг-юго-восточного ветра скорости можно рассматривать лишь как некоторый результат осреднения преобладающих полей течений за этот интервал времени. Соответствие направления расчетных скоростей с измеренными течениями проявилось в 45% из общего числа случаев за июнь–июль 1977 г. Сравнение проводилось по 4 автономным буйковым станциям (АБС) на верхнем (7 м) и нижнем (25 м) горизонтах. Величина расчетной скорости отличалась от измеренной, предварительно осредненной за месяц, приблизительно на 37%.

Если рассматривать это сравнение с точки зрения переноса водных масс циркуляциями, то сумма расчетных скоростей была на 25% меньше измеренных, при ветре 8 м/с она становится на 26% больше.

При север-северо-западном ветре со скоростью 8 м/с также развиваются 2 интегральные циркуляции, но знаки их изменяются на противоположные. Водообмен с озером, определяемый вдольбереговым выносом водных масс из залива и поступлением их через его центральную часть, составляет около 30 000 м³/с. Такие циркуляции по натурным данным отмечались для преобладающих ветров северных направлений (63%) в июне 1978 г. Скорости течений в поверхностном слое составляют 4–25 см/с, на горизонте 7 м – 3–10, 20 м – 2–7 см/с. На глубине 30 м развивается противотечение со скоростью 2–10 см/с.

Для этого ветра проведено сравнение результатов расчетов с натурными данными по направлению течения. Вектор его скорости осреднялся за одни или несколько суток. В результате сравнения данных по 9 станциям за 1977–1979 гг. для горизонта 7 м среднее отклонение по направлению расчетных и осредненных измеренных скоростей течений составило 9°.

Для расчета стационарных течений в Кондопожской губе ее северная, наиболее мелководная часть была покрыта сеточным прямоугольником, включающим 138 внутренних узлов. Центральная глубоководная и южные зоны губы составили сеточную область, насчитывающую 420 внутренних узлов. Граничные условия для интегральной функции тока заданы с учетом среднегогодового расхода р. Суны (70 м³/с). Расчеты выполнены для юго-восточного (скорость 5 и 8 м/с), северного (5 и 8), северо-западного (5), запад-северо-западного (4) и юго-западного направления ветра (5 м/с).

Под воздействием юго-восточного ветра в Кондопожской губе устанавливаются относительно осевой линии 2 интегральные циркуляции – антициклонического характера у юго-западного побережья и циклонического – у северо-восточного. При северном ветре нулевая изолиния функции полных потоков начинается от восточного побережья (к северу от Великих островов), выходит в районы больших глубин и идет вдоль осевой линии. В этом случае также развиваются по 2 интегральные циркуляции, но знаки их меняются на противоположные. Водообмен между центральной частью и прибрежными районами при обоих направлениях ветра составляет около 7500 м³/с.

Под влиянием запад-северо-западного ветра нулевая изолиния функции полных потоков проходит вблизи осевой линии. Между этой линией и юго-западным берегом установились 2 интегральные циркуляции циклонического характера со значениями ψ в центрах 2250 и 2000 м³/с. У северо-восточного берега формируются 2 антициклонические циркуляции. Скорость потока в центральной и южной глубоководных частях между изолиниями достигает 6–8 см/с.

Водообмен между центральной частью и прибрежными районами составляет 6500 м³/с. В северной части губы, в районе до о-ва Ламп, установились аналогичные циркуляции, но водообмен составил всего 150 м³/с. В этой части губы поверхностное течение совпадает

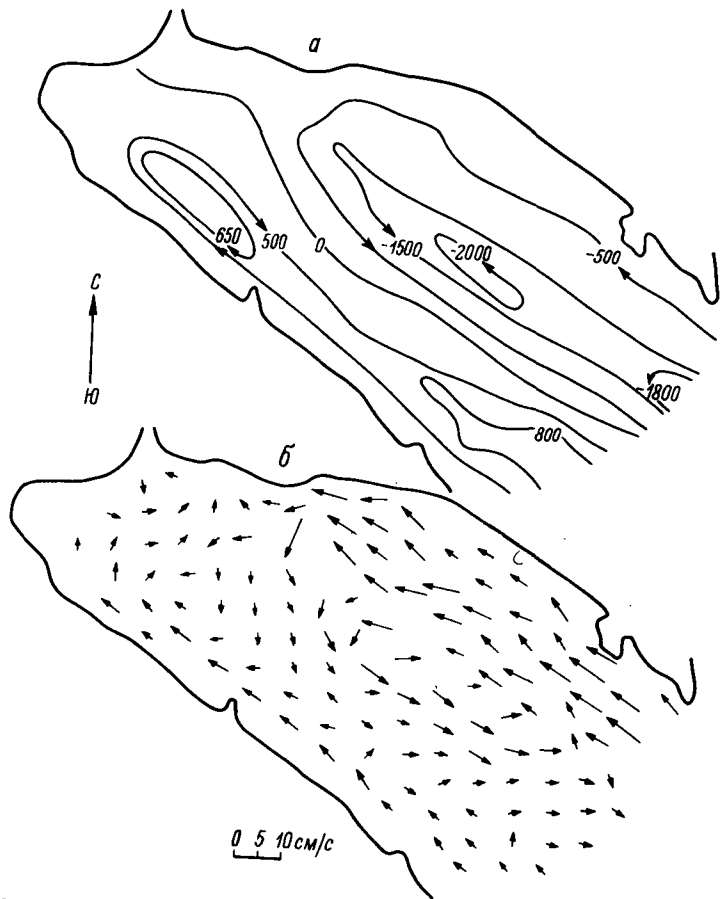


Рис. 30. Схемы интегральной циркуляции (а) и течений (б, горизонт 5 м) Петрозаводской губы (ветер юго-восточный, 8 м/с).

с направлением ветра, скорость его изменяется от 3 до 10 см/с. В остальной части расчетной области поверхностное течение также соответствует ветру, а скорость колеблется от 8 до 16 см/с у юго-западного берега и от 8 до 20 — у северо-восточного. В центральной глубоководной части направление течения меняется от юго-восточного до северного, а скорость — от 2 до 5 см/с. С глубины 18 м прослеживается компенсационное течение. Скорость его на этом горизонте 2–9, а на 30 м — 2–5 см/с. Следы этого течения наблюдаются до глубины 60 м.

Результаты расчета сравнивались с данными натурных наблюдений для северного направления ветра (скорость 8 м/с) продолжительностью около 3 сут, что вполне достаточно для формирования установившихся течений. Среднее арифметическое отклонение между векторами, построенными по натурным данным (средний вектор за 3 сут), и расчетными по 4 станциям составило 32° .

При расчете течений в Петрозаводской губе она была покрыта квадратной сеткой, включающей 286 внутренних узлов с шагом 500 м. Расход р. Шуи принят равным 93, а р. Лососинки — $3 \text{ м}^3/\text{с}$. На границе с открытой частью Онежского озера задано условие свободного протекания. Горизонтальные составляющие скорости течения определялись на 6 горизонтах (0, 5, 7, 10, 15 и 20 м). Расчеты выполнены для восток-юго-восточного (скорость 4 м/с), юго-восточного (4 и 8), западного (4), северо-западного (5 и 8) и север-северо-восточного (4 м/с) направлений ветра. Определены стоковые течения.

При юго-восточном ветре со скоростью 8 м/с у юго-западного берега развивается антициклоническая циркуляция, а у северо-западного — противоположного знака, которая охватывает большую часть акватории губы (рис. 30, а). В зоне каждой из циркуляций можно выделить по 2 отдельных вихря с центрами внутри ($\psi = 750$ и $2200 \text{ м}^3/\text{с}$) и вне Петрозаводской губы. В поверхностном слое течение направлено по ветру, скорость его в зоне раздела между циркуляциями 2–8 см/с, вдоль юго-западного и северо-западного берегов — 12–28 и в остальной части водоема — 6–10 см/с. На горизонте 5 м (рис. 30, б) наблюдается сложная система течений со скоростями 2–9 см/с, с сохранением отмеченных выше циркуляций. На глубине 10–20 м прослеживается компенсационное течение со скоростью 2–9 см/с. Скорости течения с глубиной в основном уменьшаются, но есть некоторые различия в их вертикальном распределении по акватории залива — в его вершине они меньше, чем в открытой части.

Под влиянием ветра северо-западного направления (8 м/с) образуются циркуляции с центрами $\psi = -550$ и $2250 \text{ м}^3/\text{с}$, аналогичными предыдущему случаю, но противоположного знака. Течение в поверхностном слое направлено по ветру, скорость его изменяется в пределах 11–27 см/с у берегов и 2–10 — в остальной части водоема. Вдоль нулевой изолинии функции тока скорости порядка 2–7 см/с. По полю течений на горизонте 7 м (скорости 2–6 см/с) можно проследить циркуляционные зоны. Скорость течения у берегов с глубиной уменьшается. Вдоль нулевой изолинии функции тока и в центральной части губы наблюдается различное вертикальное распределение скорости течения. На глубине 10–15 м отмечается компенсационное течение со скоростью 2–9 см/с, на горизонте 20 м — 2–7 см/с.

3.4.3. Особенности изменчивости течений Онежского озера в период стратификации по данным наблюдений и моделирования

Проведенные ранее А. Н. Охлопковой [146] исследования течений Онежского озера были основаны на расчетах их динамическим методом по измеренному полю температуры, а также на непродолжительных измерениях течений с судна. Расчеты течений этим методом можно считать первым приближением для оценки поля скорости в стратифицированном озере. При этом погрешности в расчетах определяются как недостатками самого метода, так и несинхронностью поля температуры, измеряемого в течение нескольких суток. Внести поправки в поле

температуры не представлялось возможным из-за отсутствия длительных рядов наблюдений за температурой воды на автономных буйковых станциях (АБС). В дальнейшем продолжительные наблюдения за течениями и температурой воды были выполнены В. Х. Лифшицем, П. М. Бояриновым и В. С. Титовым [104] в различных частях Онежского озера, однако детально описать циркуляцию вод по данным этих наблюдений не представляется возможным ввиду редкой сети измерений. Из работ, связанных с моделированием циркуляции вод Онежского озера в период с отсутствием стратификации, можно отметить численные эксперименты В. С. Титова и Р. Э. Тамсалу [224].

В настоящей работе используется подход, основанный на синтезе численного моделирования и данных наблюдений; разрабатываемый А. С. Саркисяном [203]. Первые расчеты течений Онежского озера в период стратификации, полученные с помощью нелинейной диагностической модели, были выполнены по данным эксперимента „Онего-86” Ю. Л. Деминим, Д. В. Белецким и Н. Н. Филатовым [240]. Следует заметить, что проведенные ранее расчеты течений для различных озер СССР не были корректно верифицированы из-за отсутствия прямых наблюдений за течениями. В качестве первого шага в работе [240] были использованы данные наблюдений за течениями на 2 АБС, и первый эксперимент по проверке модели дал обнадеживающие результаты.

Используя ранее накопленный опыт верификации моделей циркуляции вод озер, полученный Т. Саймонсом [287], Дж. Беннетом [281] и Дж. Аллендером [280], в последующем эксперименте „Онего-87” выполняли измерения течений и температуры воды на 6 АБС, расположенных на разрезе в центральной части озера, а также гидрологические съемки температуры воды на сетке 10×19 км. Наблюдения на АБС, выполненные на горизонтах 6, 10 и 20 м, позволили оценить изменчивость температуры воды и течений во временных масштабах от нескольких часов до нескольких суток. Необходимые для моделирования данные о ветре над озером были получены с ГМС, расположенной на о-ве Василисин на удалении около 30 км от полигона с АБС.

Приведем основные уравнения используемой нелинейной диагностической модели, подобно описанной в работе Ю. Л. Демина и Р. А. Ибраева [см. 63а]. Рассматривается трехмерная область в декартовой системе координат x, y, z , оси которой направлены соответственно на восток, север и вертикально вниз. Уравнения гидродинамики озера в приближениях Буссинеска, гидростатики и несжимаемости воды, а также уравнение состояния имеют вид:

$$\frac{dU}{dt} - fV = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial P}{\partial x} + \mu \Delta U + \nu \frac{\partial^2 U}{\partial z^2},$$

$$\frac{dV}{dt} + fU = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial P}{\partial y} + \mu \Delta V + \nu \frac{\partial^2 V}{\partial z^2},$$

$$\frac{\partial P}{\partial z} = \rho g,$$

$$\frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial y} + \frac{\partial W}{\partial z} = 0,$$

$$\rho = \rho_x [1 - 0.68 \cdot 10^{-5} (T - 4)^2],$$

где U, V, W — компоненты скоростей по направлениям x, y, z ; P — аномалия давления; ρ — аномалия плотности; t — время; ρ_0 — средняя плотность; μ, ν — коэффициенты горизонтального и вертикального турбулентного трения; f — параметр Кориолиса; T — температура; $\rho_x = 1 \text{ г/см}^3$,

$$\frac{d}{dt} = \frac{\partial}{\partial t} + U \frac{\partial}{\partial x} + V \frac{\partial}{\partial y} + W \frac{\partial}{\partial z}.$$

Граничные условия:

$$\rho_0 \nu \frac{\partial \vec{V}}{\partial z} = -\vec{\tau}, W = 0 \quad \text{на } z = 0,$$

$$U = V = W = 0 \quad \text{на } z = H(x, y),$$

$$\vec{V}_n = 0, \frac{\partial \vec{V}}{\partial n} = 0 \quad \text{на } \Gamma,$$

где $\vec{V} = (U, V)$ — вектор горизонтальной скорости; $\vec{\tau} = (\tau_x, \tau_y)$ — напряжение ветра; $\vec{n}, \vec{\tau}$ — внешняя нормаль и касательная; Γ — боковая поверхность; $H(x, y)$ — положительная функция, описывающая рельеф дна.

Интегральной функцией в модели является уровень озера ζ , причем краевая задача для него строится сразу в разностном виде из разностных уравнений движения, гидростатики и неразрывности с учетом соответствующих разностных граничных условий для скорости.

Исследуемая акватория покрывается равномерной по горизонтали сеткой 4×4 км, по вертикали разрешение составляет 8 горизонтов: 1, 3, 5, 10, 20, 30, 40 и 45 м. Для определения напряжения ветра использована традиционная квадратичная зависимость, ветер постоянен над всей акваторией — $158^\circ, 0.4 \text{ дин/см}^2$. Коэффициенты турбулентности также постоянные: $\mu = 5 \times 10^5 \text{ см}^2/\text{с}, \nu = 10 \text{ см}^2/\text{с}$, шаг по времени равен 10 мин.

Для расчета модели использовались данные температурной съемки, проведенной 29–31 июля 1987 г. За день до съемки наблюдался сильный южный ветер (до 12–15 м/с), приведший к появлению апвеллинга у западного берега Онежского озера и даунвеллинга у восточного. Эти особенности термической структуры озера находят свое отражение в поле уровня, по которому можно судить об интегральной циркуляции его вод. Как уже было отмечено ранее [240], ее главной особенностью является нескольких круговоротов, согласующихся с морфометрией озера. Круговороты циклонического типа сосредоточены в центральной части озера, заливах Малое и Большое Онего (рис. 31). Интенсивные антициклонические круговороты располагаются вдоль всего западного

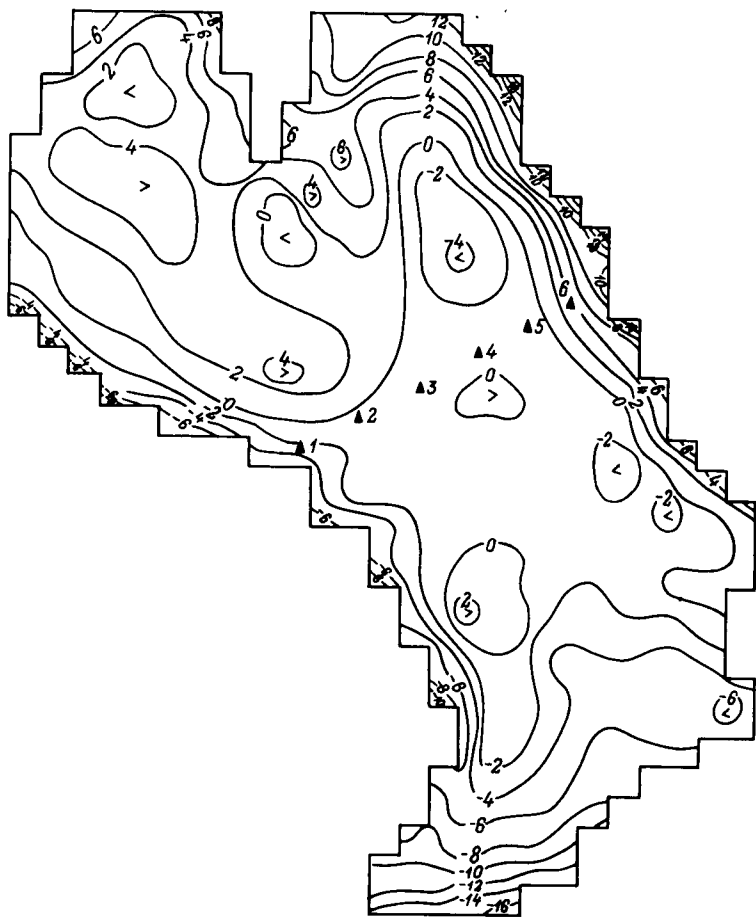


Рис. 31. Топография свободной поверхности Онежского озера в период летней стратификации (ветер южный – 4 м/с).

1–6 – автономные буйковые станции (АБС).

берега озера. В верхнем 3-метровом слое доминируют дрейфовые течения, максимальные скорости которых достигают 20 см/с, с глубиной усиливается влияние бароклинных факторов. Наибольшие скорости течений наблюдаются в районе свала глубин, особенно у восточного берега, в центральной части течения довольно слабые: на глубине 10 м – менее 3 см/с. Распределение температуры воды дано на рис. 32.

Оценим далее особенности циркуляции вод и изменчивость течений в Онежском озере по экспериментальным данным. Для сравнения наблюдаемых и рассчитанных по модели течений был проведен вероятностный анализ временных рядов наблюдений. На рис. 33 представлены двумерные функции распределения направлений модуля скорости течений в прибрежной и глубоководной частях озера. В прибрежной части

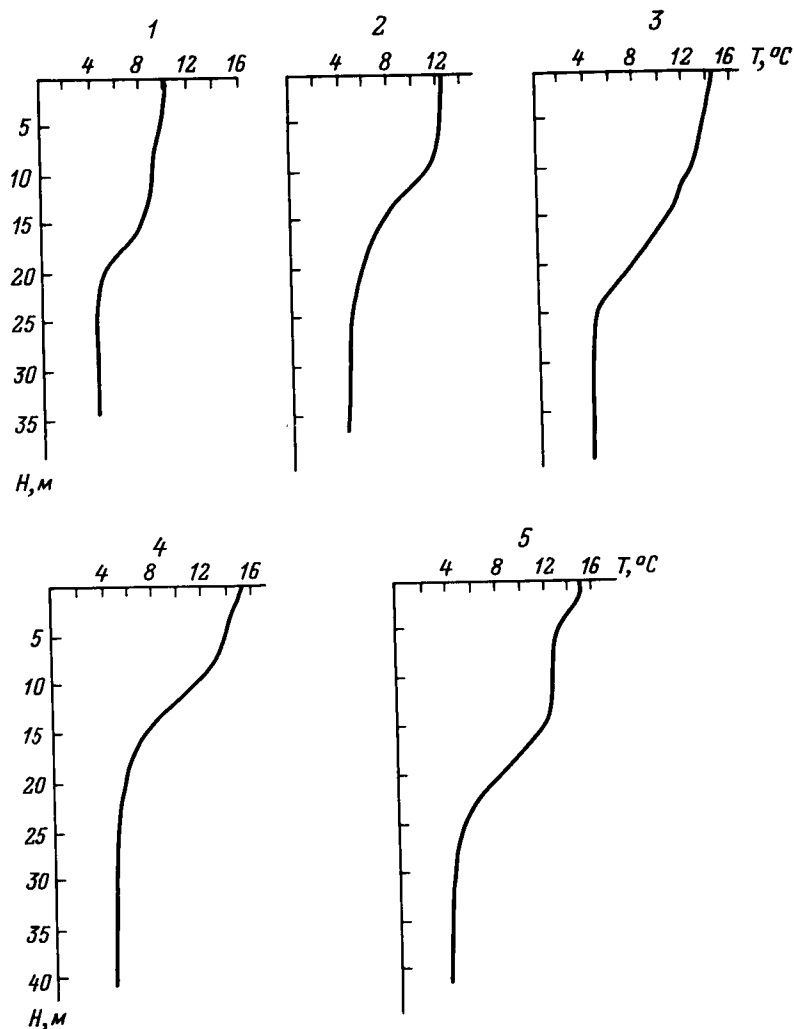


Рис. 32. Распределение по вертикали температуры воды в разных точках озера. 1–5 – АБС.

двумерные функции распределения $F(N, \alpha)$ приблизительно двух-модального вида. Наибольшую вероятность на горизонтах 6, 10 и 20 м имеют вдольбереговые течения, что обусловлено особым характером их приспособления в прибрежной зоне, выражающимся в появлении как прибрежных струй, так и береговых захваченных волн.

Резкая смена направлений течений наблюдается, к примеру, в районе АБС-1 и АБС-6 (рис. 31). С удалением от берега в открытую часть озера функция распределения $F(N, \alpha)$ становится более равномерной по направлению, а наибольшую вероятность по модулю имеют течения в диапазоне 0–5 см/с. Как показал спектральный анализ, в этой части

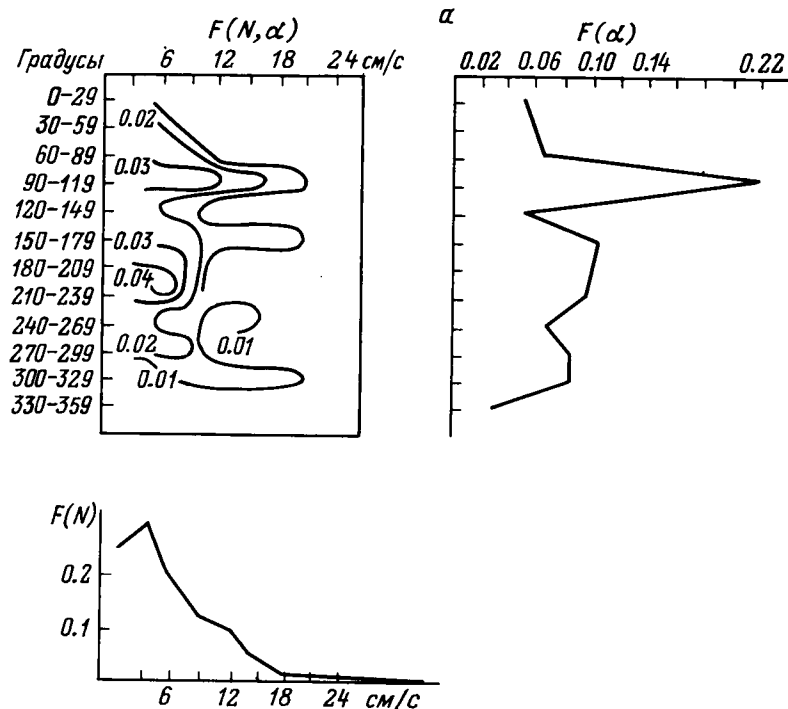


Рис. 33. Двумерные функции распределения $[F(N, \alpha)]$ течений.
а – прибрежная зона, б – открытое озеро.

озера в общую изменчивость течений в интервале от нескольких часов до нескольких суток вносят вклад несколько приблизительно равных составляющих.

Остановимся на этом несколько подробнее, рассмотрев спектральную структуру течений на разных горизонтах. Спектры течений (рис. 34) в рассматриваемом диапазоне в Онежском озере, как и в Ладожском [239, 241], имеют существенно нестационарный вид. Особенно ярко проявляется нестационарность по данным наблюдений в глубоководной части озера, на расстоянии от берега порядка 2–3 бароклинных радиусов деформации Россби. На инвариантных спектрах течений $S(\omega, t)$ видна перемежаемость инерционных движений с временными масштабами перемежаемости порядка 10 сут. Взаимный корреляционный анализ скорости ветра и течений в озере показал, что инерционные колебания течений имеют наибольшую амплитуду при затухании ветра (через 0.5–1 сут).

Совместный анализ течений и температуры воды помог сделать вывод о том, что связь этих величин осуществляется за счет движений с периодом, примерно равным инерционному – 13.5 ч (рис. 35). Эти движения имеют характерное вращение по часовой стрелке,

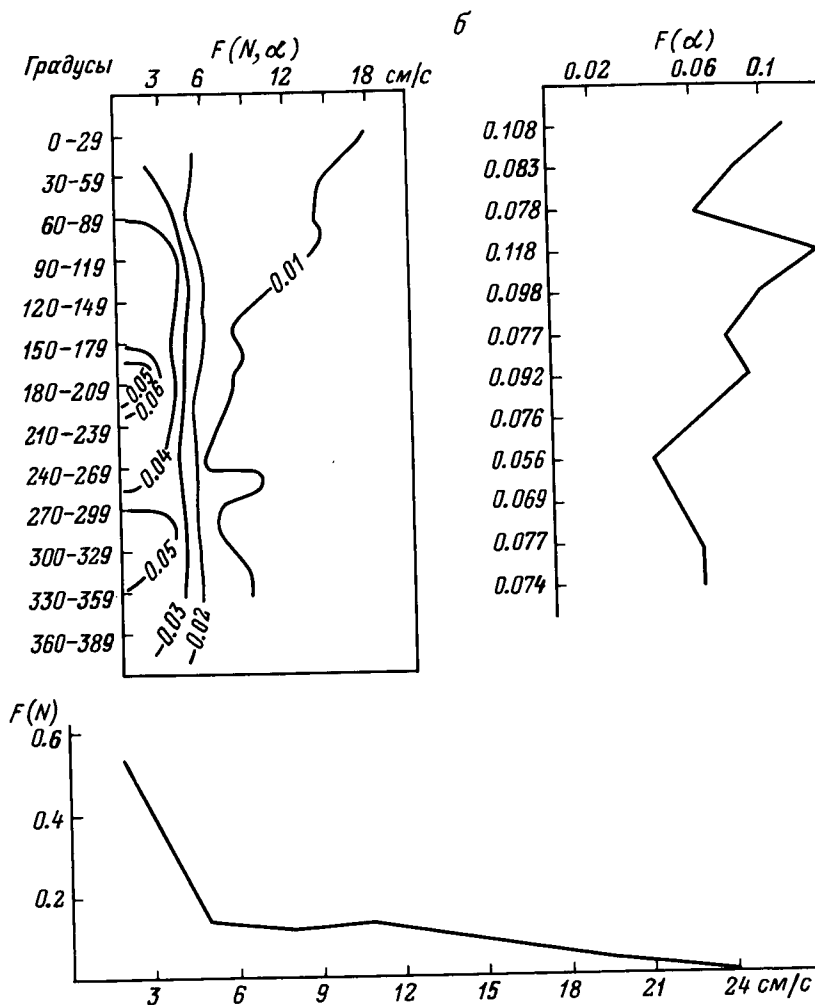


Рис. 33 (продолжение).

а в связи с проявлением их и в вертикальных движениях, влияющих на температуру воды, можно предположить, что они представляют собой инерционно-гравитационные волны. В центральной части озера в горизонтальной плоскости эти движения близки к однородным (соотношение осей эллипса изменчивости λ_1/λ_T составляет более 0.7). В прибрежной части озера такие движения на частоте 0.45 рад/ч проявляются слабо, амплитуда их в 3–5 раз меньше, чем в центральной части, а сами они неоднородны (λ_1/λ_T менее 0.2).

Флуктуации течений и температуры воды с суточным временным масштабом проявляются по данным измерений до глубины 10 м, а на глубине 20 м практически отсутствуют. Осредненные за синоптический

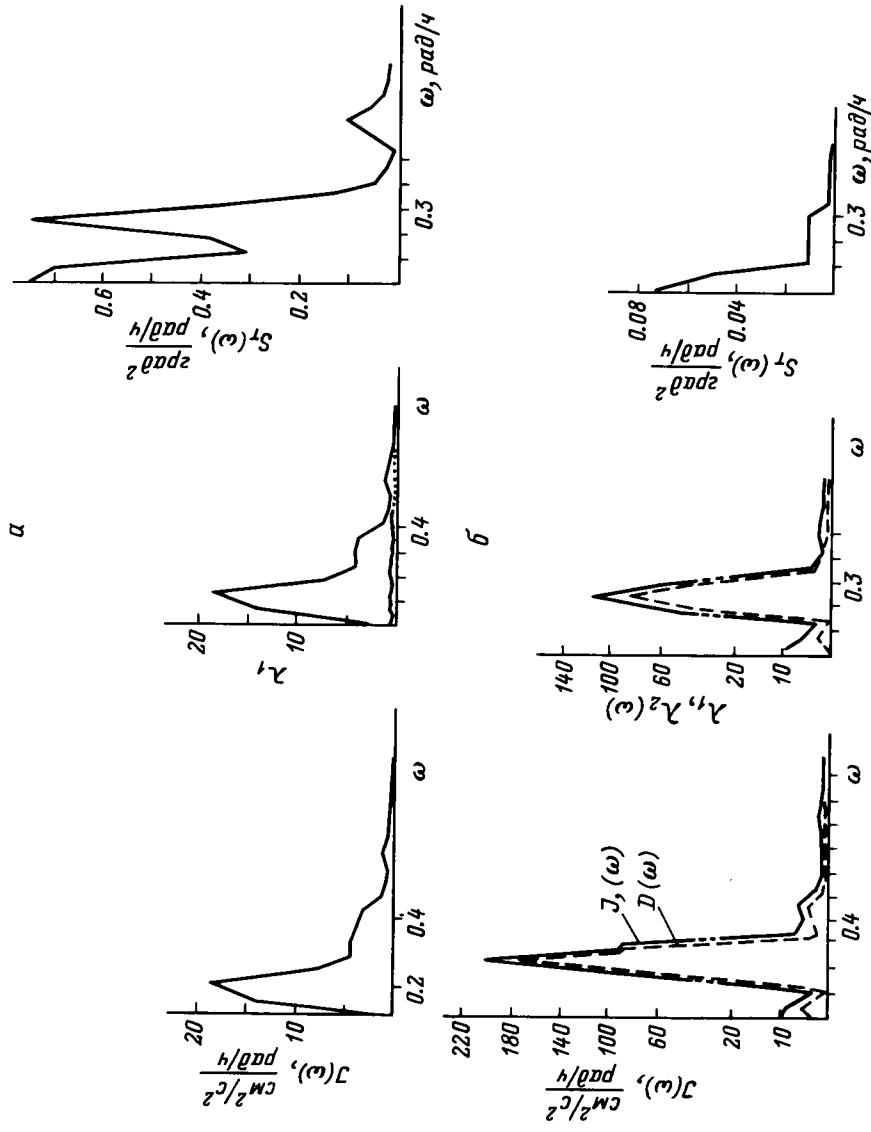


Рис. 34. Инвариантные спектры течений $[S(\omega, t)]$ Онежского озера. Обозначения те же, что на рис. 33.

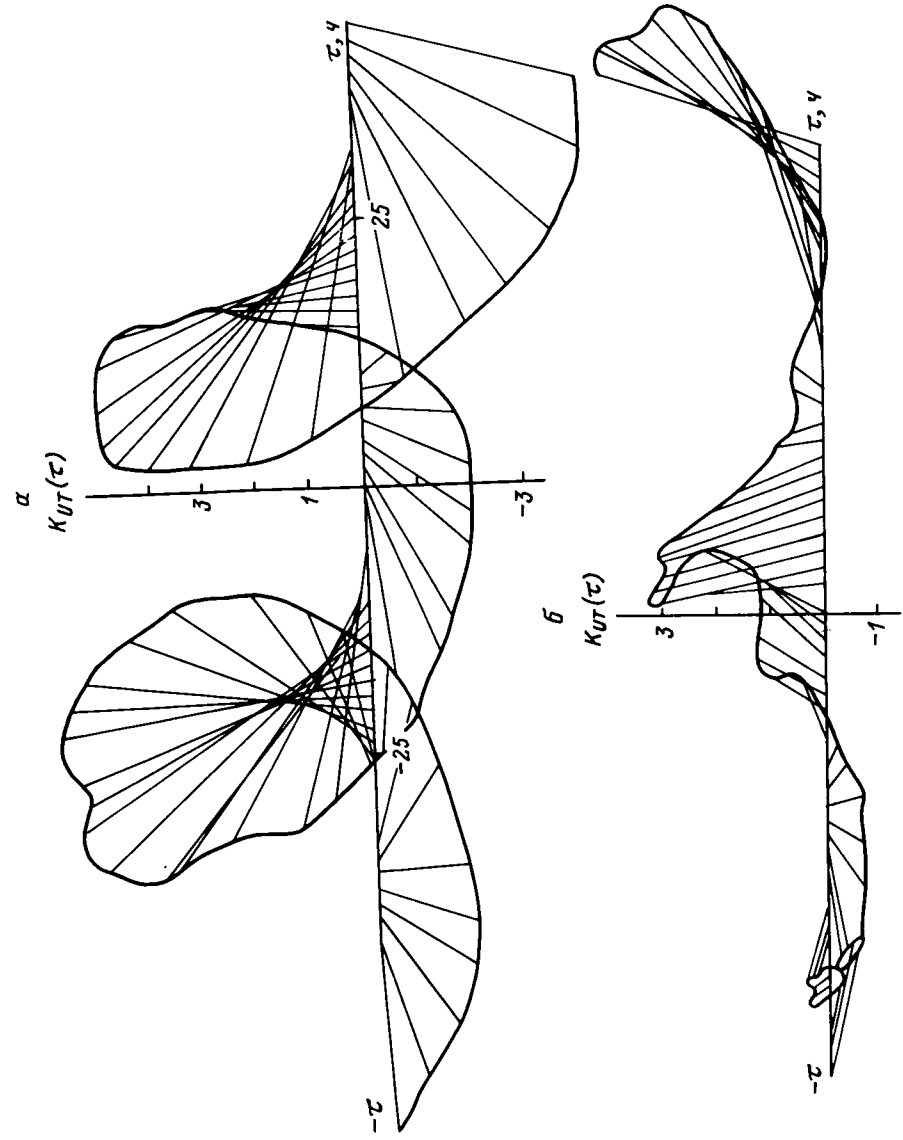


Рис. 35. Взаимная корреляционная функция $K_{UT}(\tau)$ течений и температуры воды. Обозначения те же, что на рис. 33.

Т а б л и ц а 8

Результаты верификации диагностической модели

№ АБС	Горизонт, м	Измерения		Модель	
		скорость, см/с	направление, град	скорость, см/с	направление град
1	6	4	280	2	270
2	6	7	150	2	150
3	6	4	25	4	110
5	6	1	10	3	80
2	10	6	140	2	210
4	10	2	140	2	125
1	20	2	220	2	265
3	20	1	120	1	150
4	20	1	125	1	165
6	20	5	335	3	345

период течения на всех АБС с глубиной уменьшаются по модулю и на горизонте 20 м их скорость составляет 10–30% от скорости на глубине 6 м. Самая большая изменчивость течений наблюдается в термоклине (горизонт 10 м), где наиболее значительно влияние внутренних волн.

В заключение рассмотрим результаты сравнения данных модели и наблюдений. С целью фильтрации инерционных колебаний экспериментальные данные были осреднены за период 1.5 сут, что соответствовало времени проведения гидрологической съемки в районе полигона с измерителями течений (табл. 8).

Модель качественно правильно описывает вращение течений против часовой стрелки на разрезе от западного берега к восточному на всех горизонтах. Несколько хуже обстоит дело с величинами скоростей: в нескольких случаях модель дает резко заниженные скорости, что можно объяснить как погрешностями в задании исходных полей температуры, так и нестационарностью самого поля скоростей в озере, имеющей временные масштабы в несколько суток. Однако в целом, учитывая еще и довольно грубое разрешение донной топографии, существующую в реальности неоднородность ветра над акваторией озера, несинхронность гидрологической съемки и другие факторы, диагностическая модель воспроизводит наблюдаемые в Онежском озере течения вполне реалистично.

4. ГИДРОХИМИЧЕСКИЙ РЕЖИМ ОЗЕРА И ЕГО ИЗМЕНЕНИЕ ПОД ВЛИЯНИЕМ АНТРОПОГЕННОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ

Воды Онежского озера, несмотря на возрастающее антропогенное воздействие, сохранили олиготрофный характер и достаточно высокое качество в большинстве его районов. Вода Центрального плеса озера и глубоководных районов Повенецкого залива, Большого и Малого Онего, Уницкой и Лижемской губ, в малой степени подверженных влиянию природного речного, склонового стока с водосбора и антропогенных факторов, уникальна по своим питьевым качествам, характеризуется сходством и постоянством химического состава, малой амплитудой внутри- и межгодовых колебаний, обусловленных различной водностью года. Она низкоминерализована, малоокрашена за счет преобладания бесцветного водного гумуса, бедна биогенными элементами, особенно минеральными формами азота и фосфора, хорошо насыщена кислородом от поверхности до дна, что характерно для всех крупных олиготрофных водоемов, обладает высокой прозрачностью. Органическое вещество преимущественно автохтонного происхождения.

За истекший 15-летний период наших исследований (1976–1985 гг.) качество воды по гидрохимическим показателям не претерпело существенных изменений. Большая часть водных масс озера в их естественном состоянии сохранила олиготрофный характер и высокое качество, которое удовлетворяет требованиям ГОСТа, предъявляемым к водоемам питьевого и рыбохозяйственного использования. Однако, согласно среднемноголетним данным, наметилась слабая тенденция снижения прозрачности и увеличения цветности.

Литоральная зона озера и крупные его заливы подвержены влиянию многочисленных притоков, несущих с водосбора воду, обогащенную гуминовыми веществами, танинами, фенолами, железом, и крупнейших в Карелии промузлов, расположенных на их берегах. Максимальную антропогенную нагрузку испытывают Петрозаводская, Кондопожская и Большая губа Повенецкого залива. В ее прибрежных участках и отдельных малых губах (Лумбуши, Пиндушской, Повенецкой, Пергубе, Кумсагубе, Оров и Челмужской) естественный состав воды значительно изменился в результате увеличения содержания органических веществ, в том числе специфических (типа нефтепродуктов), танинов, фенолов, а также аммонийного и нитритного азота, общего фосфора, взвешенных веществ. Эти изменения выразились в уменьшении

величины прозрачности, увеличения цветности, окисляемости, биологического поглощения кислорода (БПК), содержания взвесей, общего азота, фосфора и явились причиной появления начальных признаков мезо- и эвтрофии отдельных участков залива.

Качество воды Петрозаводской губы, испытывающей влияние природных высокоцветных вод рек Шуи, Неглинки, Лососинки, а также городских сточных вод, снизилось за счет повышения величины цветности, перманганатной и бихроматной окисляемости, содержания танидов, фенолов, СПАВ, взвешенных веществ, общего азота и фосфора и обеднения ее кислородом, потребляемым на окисление веществ, поступающих с природным и вторичным стоком. На некоторых участках дефицит кислорода в придонных слоях воды составлял 5–26%. Большая площадь акватории губы загрязнена нефтепродуктами, поступающими в результате эксплуатации транспортных, пассажирских судов и маломерного флота. За последнее десятилетие благодаря осуществлению целого ряда важных водоохраных мероприятий, в том числе вводу в эксплуатацию очистных канализационных сооружений, несколько улучшился кислородный режим, снизилось содержание аммонийного азота, летучих фенолов. В то же время в связи с ростом антропогенной нагрузки на водоем увеличилось содержание нефтепродуктов, взвешенных веществ, значения БПК₅ и т. д. Подхваченные шуйским стоковым течением и сопутствующими ветрами трансформированные водные массы выносятся за ее пределы, ухудшая качество воды прилегающих к ней районов озера.

Химический состав природных вод Кондопожской губы изменился под влиянием сбрасываемых в нее производственных сточных вод целлюлозно-бумажного производства (ЦБП). Это выразилось в основном в увеличении содержания органических и взвешенных веществ, появлении специфических соединений техногенного происхождения в концентрациях, не свойственных ее природным водам, таких как лигносульфонаты, летучие фенолы, таниды, фурфурол, метанол, углеводы, сероводород, сульфиды, сульфиты, тиосульфаты, являющихся продуктами сульфитной варки целлюлозы и анаэробного разложения органического вещества. Анаэробные условия, создающиеся в глубоководных впадинах в подледный период, изменили органолептические показатели воды (она стала мутной, опалесцирующей, с сильным запахом сероводорода, содержащей много сульфидов, сульфитов, тиосульфатов и сульфатов, имеет самую низкую величину рН) и ход внутриводоемных процессов, которые привели к накоплению фосфатов в придонных слоях воды. Эти водные массы на большей части акватории губы испытывали значительный дефицит кислорода (7–62%), имели в 5–10 раз выше фоновую величину БПК₅, перманганатной и бихроматной окисляемости, в 2–3 раза — фенольных соединений, лигносульфонатов, танидов, взвешенных веществ и т. д. В результате этих изменений качество воды губы значительно ухудшилось.

Однако за последние годы благодаря ряду проведенных водоохраных мероприятий в воде губы снизилось содержание углеводов, фенольных соединений, сернистых и взвешенных веществ.

Но наряду с этим увеличилось содержание стойких к биохимическому окислению органических веществ, в частности танидов, что привело к увеличению перманганатной окисляемости и уменьшению содержания растворенного кислорода.

Сравнительная оценка среднемноголетнего содержания органического углерода, общего фосфора и азота в чистых олиготрофных и подверженных антропогенному воздействию районах Петрозаводской и Кондопожской губ, выразившаяся соответствующими отношениями 1:1.4:1.9; 1:2:2.2; 1:1.4:1.5, указывает на превышение среднего фона указанных параметров в этих губах, что свидетельствует о тенденции возрастания их трофности.

Гидрохимические исследования большинства районов проводили неоднократно (с 10–15-летним перерывом) в сезонном аспекте по постоянной сетке станций. Пробы воды на полный анализ отбирали батометром Рутнера через каждые 10–15 м, в заливе Большое Онего — в фотическом слое через каждые 2 м. В период выраженной температурной стратификации водных масс дополнительно брали пробы в слое термоклина и под ним. Химический анализ воды производили по общепринятым методикам, изложенным в руководствах [2, 90, 109, 201, 212]. Анализ воды проводили в нефилтрованных пробах. Взвешенные вещества фильтровали через мембранный фильтр № 6. О количестве и качестве органических веществ, растворенных в воде, судили по косвенным показателям: цветности, перманганатной и бихроматной окисляемостям, их отношению, величине БПК₅ и БПК₂₀, коэффициенту цветности по перманганатной и бихроматной окисляемости, отношению органического углерода к органическому азоту и фосфору. Органический углерод и общее содержание органических веществ вычисляли по формуле, предложенной Б. А. Скопинцевым [205]. Химический сток с бассейна считали по среднемноголетнему водному стоку [10, 195], накопление веществ в снежном покрове — по общему влагозапасу в снеге [131].

4.1. Источники формирования химического состава воды озера

Химический состав воды Онежского озера формируется в основном за счет приточных вод с водосбора, а также атмосферных осадков, подземного и антропогенного стока.

Особенности рельефа местности, геологии, гидрогеологии, гидрографии, характера водосбора, использования природных ресурсов и хозяйственной деятельности человека на территории бассейна озера определяют качество их поверхностных вод и существенные различия в их химическом составе.

Учитывая это, все реки бассейна по их гидрохимическим параметрам объединены в группы. Сравнительная характеристика химического состава, оценка выноса основных веществ отдельными группами рек и общий сток их с бассейна в озеро показали, что главным поставщиком органических, биогенных, минеральных и взвешенных веществ являются

основные крупные притоки – Шуя, Суна, Водла, откуда в озеро попадает около 60–70% от всего органического и биогенного стока с бассейна (табл. 9). Среди остальных притоков самый большой вклад в химический сток вносят Андома, Пяльма, Вытегра, Беломорско-Балтийский водный путь. Наибольшую массу органических веществ приносит в озеро р. Водла (32%), немного меньше – реки Шуя (24%) и Суна (11%). Максимальное их количество (84–96%) находится в растворенном виде и лишь немного (3–16%) – во взвешенном. Органическое вещество в основном стойко к биохимическому окислению ($\frac{ПО}{БО} \cdot 100 = 54–66\%$; БПК₅ – 0.8–1.18 мг О₂/л), интенсивно окрашено (цветность 76–130°) за счет болотного гумуса (заболоченность 18%), мелиоративного стока и лесной подстилки водосбора.

Из отдельных определяемых нами групп органических веществ от 9 (Суна) до 18% (Шуя) от общего их содержания составляют таниды. Среди остальных притоков главную роль в стоке органических и биогенных веществ играют реки южного и юго-восточного побережья; в стоке минеральных веществ – реки южного (особенно р. Вытегра) и северо-западного побережья (п-ова Заонежья). Реки с заболоченным водосбором вносят в озеро большое количество окрашенных, биохимически стойких органических веществ гумусовой природы. Максимальный сток взвешенных веществ с водосбора осуществляется за счет шуйских вод, главным образом в период весеннего половодья, причем преобладают взвеси органического характера (87–93%).

С водами 3 крупных притоков в озеро поступает до 67% азота и фосфора, причем максимальный вклад вносит р. Шуя, водосбор которой наиболее освоен и испытывает максимальную антропогенную нагрузку. Несколько меньше азотистых и фосфорных соединений, 74–90% которых составляют органические формы, поступает с водами р. Водлы, водосбор которой также освоен в сельскохозяйственном отношении, и еще меньше – с водами рек Суны, Вытегры, Андомы. Среди минеральных форм азота в речном стоке превалирует аммонийная.

Реки остальной части водосбора озера несут значительно меньшее количество (1–11%) органических веществ, однако со стоком рек северного, северо-восточного и юго-восточного побережья поступает значительное количество танидов, СПАВ, летучих фенолов, углеводородов. Реки южного побережья поставляют в озеро больше (18%), чем остальные (1–10%), взвешенных веществ, общего фосфора и азота (11–12%), преимущественно в виде азот- и фосфорсодержащих органических соединений, а также растворенных минеральных солей, особенно р. Вытегры (см. табл. 9).

Анализ данных химического стока с бассейна показал, что реки с заболоченным водосбором несут в озеро окрашенное, биохимически стойкое органическое вещество, в связи с чем в приустьевых участках озера повышаются величины цветности, окисляемости, а также концентрация отдельных групп органических веществ. Реки п-ова Заонежье и южного побережья поставляют в озеро больше растворенных солей.

Таблица 9

Среднегодовой сток (г) органических веществ и биогенных элементов с бассейна в Онежское озеро

Реки	Органическое вещество			Таниды	Фенолы	Нефтепродукты	СПАВ	Взвешенные вещества	N общий	P общий	N органический	P органический
	сумма	растворенное	взвешенное									
Водла	122800	113600	9200	20810	85	583	125	13320	2273	133.2	2181	112.4
Шуя	95950	80500	15450	17820	18	327	178	16930	3492	184.2	2733	166.4
Суна	43660	32140	1520	3810	20	195	457	2792	1673	28.0	1241	22.8
П-ова Заонежье	4630	4484	146	712	1.4	93	159	503	210	5.0	169	4.3
Побережий:												
северо-западного	8138	7864	274	2643	1.2	115	258	651	334	5.0	301	4.5
северного	7055	6400	655	2902	1.0	107	305	3010	347	8.0	309	6.6
северо-восточного	19830	19060	770	7979	2.5	147	307	1618	679	21.4	624	18.5
юго-восточного	40470	36800	3670	16560	4.8	392	73	5336	1065	54.4	895	46.5
южного	42860	38770	4090	12640	5.4	97	185	9678	1378	63.4	1162	56.6
юго-западного	6190	5790	400	1697	0.7	96	63	1354	152	10.3	105	7.0
Общий сток в озеро	391583	355408	36175	87573	140	3912	2110	55199	11511	511.9	9812	445.6

Примечание. Здесь и в табл. 13, 15, 17, 26, 27 СПАВ – синтетические поверхностно-активные вещества.

Средние концентрации некоторых веществ
с акватории Онежского озера

Районы озера	Фосфор общий	Крем- ний	Азот, мг N/л			
			аммо- нийный	нитрит- ный	нитрат- ный	суммар- ный
Петрозаводская губа	0.035	0.27	0.17	0.005	0.27	0.97
Кондопожская губа	0.022	0.32	0.12	0.006	0.21	0.67
Залив Большое Онего	0.011	0.26	0.13	0.004	0.08	0.37
Повенецкий залив	0.022	0.13	0.24	0.008	0.24	0.98
Центральный плес	0.013	0.12	0.13	0.004	0.21	1.01
Южная часть	0.019	0	0.15	0.004	0.28	1.45
Среднее по озеру	0.020	0.17	0.16	0.005	0.22	0.91

Примечание. Здесь и в табл. 11–15, 17–21, 23, 25, 29–31, 35 ОВ –

Таблица 11

Масса некоторых химических веществ (т),
акватории Онежского

Зима	Запас воды в снеге, км ³	ОВ	Танниды	Углеводо- роды	Фенолы
1984/85 г.	0.579	2680	218	49	3
1985/86 г.	0.557	779	435	101	3
1986/87 г.	0.794	1093	790	62	4

Реки, подверженные антропогенному воздействию, несут в озеро с водой нефтепродукты, синтетические поверхностно-активные и смолистые вещества, азот и фосфор. В частности, с аллохтонным стоком р. Шуи, водосбор которой испытывает максимальную антропогенную нагрузку (мелиорация, рекреация, животноводство, полеводство и др.), в Петрозаводскую губу Онежского озера поступает максимальное количество растворенных и взвешенных веществ (24–31%), азота (23%) и фосфора (36%). Река Суна поставляет больше всех СПАВ (22%). За счет разложения высшей водной растительности, хвои, лесной подстилки, т. е. деструкции органических веществ на водосборе, с речным стоком поступают фенольные соединения, причем от 22 до 31% – за счет самых крупных притоков (Водлы, Шуи, Суны).

Анализ общего химического стока с бассейна в Онежское озеро показал, что озерная вода за счет притоков обогащается окрашенным аллохтонным органическим веществом, в основном стойким к биохимическому окислению; 90.7% его приходится на растворенное, а 9.3 – на взвешенное в воде. Из отдельных, определяемых нами групп

(мг/л) в снеговых водах
в марте 1985 г.

ОВ	Фенолы	Нефтепро- дукты	Танни- ды	Взвешен- ные веще- ства	Общая ми- нерализа- ция	Сульфат- ты	Каль- ций
9.8	0.006	0.11	1.0	8.8	9.4	6.5	1.2
4.0	0.003	0.13	1.0	6.1	15.3	7.0	2.8
2.1	0.005	0.06	0	1.6	7.2	6.6	0.5
6.5	0.006	0.08	0.5	6.8	8.8	5.5	0.7
2.3	0.005	0.04	0	1.0	6.3	4.6	0.5
4.4	0.008	0.12	0	1.6	6.3	4.8	0.4
4.9	0.006	0.09	0.4	4.3	6.6	5.8	1.0

органическое вещество.

аккумулированных в снежном покрове
озера

Фосфор общий	Фосфор минераль- ный	Азот мине- ральный	Азот аммо- нийный	Сумма мине- ральных веществ	Сульфаты
11	5.6	617	87	3600	3170
8	3.6	488	86	4288	2354
8	3.6	564	232	5343	2932

органических веществ 22.4% (от общего содержания ОВ) составляют танниды, 1% – гуминовые, 8.8% – фульвокислоты, 0.02% – фенолы, 1% – углеводороды и 0.05% – синтетические поверхностно-активные вещества (СПАВ). Из общего поступления азота и фосфора 81% составляют азотсодержащие, а 87% – фосфорсодержащие органические соединения.

Первоначальный состав поверхностных вод формируется в период их пребывания в атмосфере [44], поэтому изучение химического состава атмосферных осадков представляет большой интерес при исследовании формирования поверхностного стока. Влияние атмосферных осадков на гидрохимию поверхностных вод особенно ощутимо в условиях Севера, где содержание растворенных солей и биогенных элементов очень низкое и приближается к их количеству в снеговых водах. Это свидетельствует о преобладании атмосферного питания, а иногда о нем как о единственном источнике формирования химического состава воды некоторых малых озер Карелии. Так, например, в озера Вендюрской группы (южная Карелия) со снеговыми водами

поступает почти половина аммонийного и нитратного азота, а также сульфатов [258, 259], тогда как в Онежское озеро — лишь 6–20% азота и фосфора и 1–3% органических веществ.

Снеговые воды различных участков акватории озера очень отличаются по своему химическому составу (табл. 10). Минимальные количества биогенных элементов, минеральных и органических, а также взвешенных веществ аккумулируются за зимний период в снежном покрове центральной части Онежского озера и залива Большое Онего. В южной части, Петрозаводской и Кондопожской губах, подверженных антропогенному влиянию, этих веществ накапливается в 2–3 раза больше за счет локальных источников дымовых выбросов.

Следует отметить, что в снежном покрове аккумулируется в 1.5–6 раз больше минеральных веществ, чем органических, особенно сульфатов, содержание которых составляет 48–88% от суммы ионов. Среди взвешенных веществ преобладают взвеси органического характера. Из минеральных форм азота превалирует аммонийная и нитратная, среди фосфорсодержащих соединений — органические и лишь в снеговых водах вершинной части Кондопожской губы — фосфатный фосфор. В зимний период 1984/85 г. в снежном покрове на акватории Онежского озера аккумулировалось больше минерального и общего фосфора, нитратов и сульфатов, органических веществ. Зимой 1986/87 г., хотя запас воды в снеге был в 1.5 раза больше, чем в предыдущие годы, этих компонентов при таянии поступало меньше, а увеличивалось содержание растворенных солей, аммонийного азота на фоне высокого содержания нитратного, а также таннидов.

Данные табл. 11 показывают, что поступление различных компонентов со снеговыми водами в озеро неоднородно и определяется как их концентрацией, так и запасом воды в снежном покрове. Даже близкие по водности зимы 1984/85 и 1985/86 гг. резко различаются по содержанию органических и минеральных веществ, фосфора, азота и взвесей. Наблюдаемая межгодовая динамика содержания и поступления компонентов химического состава снеговых вод обусловлена их запасом, концентрацией этих веществ в дымовых выбросах предприятий, расположенных на берегу озера и в его бассейне, а также метеорологической обстановкой.

Трехлетние (1985–1987 гг.) наблюдения за химическим составом снега с акватории Онежского озера и его водосбора показали, что атмосферные осадки не играют существенной роли в формировании гидрохимического режима такого крупного олиготрофного водоема, однако в зависимости от запаса воды в снеге и концентрации химических веществ, аккумулированных в снежном покрове, доля их участия в формировании качества воды различна (табл. 11). Результаты балансовых расчетов на основе наблюдений 1984–1985 гг. свидетельствуют о том, что в озеро со снеговыми водами поступает до 20% общего фосфора (из них 8% минерального), 7% аммонийного и 14% нитратного азота, 7% органических веществ (из них 0.3% таннидов),

1.3% углеводов, 3.8% фенольных соединений и 2.7% взвешенных веществ. Но, хотя доля атмосферного питания Онежского озера невелика, однако оно обогащает озерные воды сульфатами, аммонийным и нитратным азотом.

Доля подземных вод в общем речном стоке составляет 20–30% и осуществляется полностью за счет атмосферных осадков.

Таким образом, анализ источников формирования качества воды Онежского озера свидетельствует о том, что основную роль в формировании гидрохимического режима Онежского озера играют приточные воды с водосбора. Однако в настоящее время немаловажную роль в этом процессе играет антропогенный фактор, который вносит свои коррективы и в природный речной сток на территории бассейна и в химический состав озерных вод.

4.2. Химический состав воды Онежского озера

Онежское озеро — крупный водоем олиготрофного типа с очень сложной морфометрией, динамикой водных масс различного происхождения, неравномерным распределением речного стока и разной степенью влияния антропогенных факторов. Наряду с интенсивным воздействием хозяйственной деятельности крупных промузлов, расположенных на его берегах и в его бассейне, озеро используется для водного транспорта, рыбного хозяйства, гидроэнергетики, рекреации, принимает дренажный сток лесной и сельскохозяйственной мелиораций, с сельхозугодий и весь поверхностный сток с освоенного водосбора, в том числе максимально освоенного водосбора р. Шуи. Все это обусловило неоднородность химического состава воды отдельных участков озера.

Качество воды литоральной зоны, крупных заливов и южной части в результате многостороннего комплексного использования за последние 20 лет значительно изменилось. В связи с ростом антропогенной, в частности органической и биогенной, нагрузки на озеро увеличились количественные показатели химического состава воды, изменилось их соотношение и пространственно-временное распределение в озере, ухудшилось качество воды отдельных районов, что свидетельствует о наступлении ранней стадии антропогенного зотрофирования этих районов, граница которых распространяется в сторону его открытой части. Однако, несмотря на возрастающее антропогенное влияние, вода центральной части и большинства глубоководных районов озера (Повенецкого залива, Большого и Малого Онего, Уницкой и Лижемской губ), в меньшей степени подверженных влиянию природного речного, склонового стока с водосбора и антропогенных факторов, сохранила олиготрофный характер и достаточно высокое качество. В этих районах ее химический состав сходен, отличается относительным постоянством и малой амплитудой внутригодовых колебаний. Онежская вода характеризуется уникальными природными качествами — высокой прозрачностью, мягкостью и чистотой, она малоокрашена вследствие

низкого содержания органических веществ, низкоминерализована, бедна биогенными элементами, особенно минеральными формами азота и фосфора, хорошо насыщена кислородом.

Гидрохимический режим Онежского озера изучался Институтом озероведения в 1965–1967 гг. [55] и с 1964 г. — Отделом водных проблем Карельского филиала АН СССР [111, 112, 257]. С тех пор произошли большие изменения качества его воды. В данной работе основное внимание уделено современному состоянию качества воды отдельных районов озера, источникам, условиям и основным закономерностям его формирования, пространственно-временной изменчивости органических, биогенных веществ и газового режима водоема, тенденции изменения качества воды и направленности процесса антропогенного эвтрофирования.

4.2.1. Центральное Онего

Характерной чертой этого района является обособленность центрального водного тела озера от прибрежной зоны, испытывающей влияние речного стока с водосбора. Наиболее четко она выражена весной и обусловлена возникновением термического бара, который препятствует смешению литоральных и пелагиальных водных масс. В период весеннего и осеннего термобара воды центрального водного тела и литоральной зоны озера резко различаются по своему химическому составу. С продвижением фронта термобара в сторону Центрального плеса и его разрушением происходит смешение речных и литоральных вод с озерными. Ввиду того что объем водных масс глубоководного центрального водного тела в несколько раз превосходит объем воды мелководной литоральной части, качество озерной воды в результате их смешения мало изменяется.

В период летней межени, когда устанавливается вертикальная стратификация водных масс, они неоднородны по глубине и особенно отличаются по газовому режиму, находящемуся в прямой зависимости от температуры воды. В этот период в формировании качества озерных вод большую роль играют синоптические, термические и динамические факторы. Однако химический состав воды Центрального плеса озера отличается относительно устойчивой гомогенностью величин гидрохимических показателей и малой амплитудой внутрigoдовых колебаний (табл. 12).

Общее содержание органических веществ, рассчитанное по бихроматной окисляемости [205], в течение года колебалось от 10.1 до 15.7 при среднегодовом значении 11.2 мг/л. Органическое вещество преимущественно автохтонного происхождения, о чем свидетельствуют отношения его косвенных характеристик: $C_{\text{орг}} : N_{\text{орг}} = 10-19$, $C_{\text{орг}} : P_{\text{орг}} = 295-482$, $\frac{\text{БПК}_5}{\text{ПО}} = 0.1-0.2\%$. Количество новообразованного органического вещества зависит от водности, термики и продуктивности года. Но так как водные массы глубоководной центральной части озера плохо прогреваются и бедны биогенными элементами, то продукционные

возможности его довольно ограничены, что и подтверждается низким содержанием органических веществ, а также слабой их внутри- и межгодовой динамикой (табл. 13). Органическое вещество в течение всего года малоокрашено (цветность зимой 16–18°, в период открытой водной поверхности — 21–24°), так как в основном представлено бесцветным планктоногенным веществом, что подтверждается низкой среднесезонной величиной отношения $C_{\text{орг}} : N_{\text{орг}}$, которое в 1977 г. было равно 11–17, в 1980 г. — 9–12, в 1981 г. — 11–18, и содержит мало водного гумуса ($\text{ПО} - 5.8-7.3$, $\frac{\text{Цв}}{\text{ПО}} - 2.5-3.6$). По содержанию органического вещества воду Центрального плеса озера можно считать малогуомозной. К настоящему времени достоверной тенденции увеличения содержания органических веществ в воде этого района озера не выявлено.

Основным источником поступления биогенных элементов в центральную часть озера является минерализация новообразованного органического вещества, атмосферные осадки, а также природный и антропогенный сток с водосбора. В настоящее время основное внимание при характеристике режима биогенных элементов уделяется количественной оценке общего фосфора и азота как внутри водоема, так и на водосборе. Увеличение поступления в водоем азота и фосфора с водосбора обусловлено антропогенным влиянием в бассейне озера.

Центральный плес Онежского озера характеризуется низким содержанием биогенных элементов, присущим всем холодноводным олиготрофным озерам Севера. В настоящее время содержание общего фосфора здесь в среднем составляет 9–13 мкг/л, и за период исследований (1977–1984 гг.) оно менялось от 6 до 17 мкг/л. Однако следует отметить, что в июле 1977 г. за счет высокого содержания органических фосфорсодержащих соединений (90–93% от общего фосфора), образующихся в результате внутриводоемных процессов, были подмечены экстремальные концентрации этого элемента: 21 мкг/л на 20- и 21–27 — на 30- и 50-метровых глубинах, а также в сентябре — 34 мкг/л на 37-метровой глубине в районе, прилегающем к Петрозаводской губе. Такие эпизодические всплески количественного содержания общего фосфора в гипolimнионе центральной части Онежского озера могут служить одним из признаков зарождающегося процесса антропогенного эвтрофирования.

Основной формой соединения фосфора является органическая (90–95%). Содержание минерального фосфора здесь очень низкое (1–3 мкг/л) и почти не изменяется по акватории, глубине, сезонам и годам.

Преобладает органический азот (55–78%), из минеральных форм превалирует нитратный (16–23%), затем аммонийный (8–9%), нитритный практически отсутствует или наблюдается в виде следов [83]. В сезонной динамике распределения органического азота отмечен небольшой летний максимум (что связано с интенсификацией продукционных процессов в теплое время года), сочетающийся с минимумом нитратов, потребляемых фитопланктоном. К осени с охлаждением

Таблица 12
Поступление в Онежское озеро органических веществ
и атмосферными осадками

Источник поступления	Фосфор		Азот		
	общий	минеральный	общий	аммонийный	нитратный
Речной сток	513	67	12109	1400	810
Атмосферные осадки	11	6	248	87	129
Сумма	524	73	12357	1487	939

Таблица 13
Среднегодовые и среднеголетние величины
Центрального плеса

Год	Прозрачность, м	Цветность, град	Окисляемость, мг О/л		БПК ₅ , мг	БПК ₂₀ , O ₂ /л	NH ₄ ⁺ , мг N/л	N _{общ}
			ПО	БО				
1977	—	22	7.8	14.7	0.90	2.10	0.04	0.45
1980	4.3	22	7.1	13.3	0.89	—	0.05	0.69
1981	4.0	22	6.8	16.2	0.72	1.26	0.04	0.42
Среднеголетняя	4.2	22	7.2	14.7	0.84	1.68	0.04	0.52

Примечание. Здесь и в табл. 14, 15, 17–23, 26, 27 окисляемость: ПО –

водоема замедляются процессы аммонификации и усиливаются – нитрификации, что сопровождается постепенным накоплением нитратного азота, содержание которого достигает максимума в подледный период. В межгодовой динамике содержания общего азота отмечена некоторая периодичность (см. табл. 13), обусловленная термическими условиями в водоеме, определяющими ход внутриводоемных процессов, влияющих на цикл азота. Тенденции накопления азота за наблюдаемый период не выявлено.

Из отдельных органических веществ, источником поступления которых являются речной и склоновый стоки, в воде Центрального плеса определялись танины, углеводороды, фенолсодержащие соединения, синтетические поверхностно-активные вещества. Содержание веществ из группы танинов колебалось в течение года от аналитического 0 до 2 при среднегодовой концентрации 1 мг/л. Фенолсодержащие соединения за 3-летний период исследований определены в количестве 0–4 мкг/л, причем в весенне-летний период они чаще отсутствовали, а к осени достигали максимума.

и биогенных элементов (т) с водами притоков за 1984–1987 гг.

Сульфаты	ОВ	Танины	Углеводороды	Фенолы	Взвешенные вещества
3358	391580	87840	3912	80	55206
2906	2680	218	49	3	1532
6264	394260	88058	3961	83	56738

показателей качества воды
Онежского озера

R _{общ} , мг P/л	C _{орг} , N _{орг}	Общее содержание ОВ, мг/л	Фенолы, мг/л	Нефтепродукты, мг/л	СПАВ, мг/л	Танины, мг/л	Взвешенное вещество, мг/л	Сумма ионов, мг/л
0.013	14	11.7	0.004	—	—	1	0.7	38.8
0.009	10	10.5	0.003	0.20	0.18	1	0.4	35.6
0.012	15	11.2	0.006	0.51	0.10	1	0.8	42.8
0.011	13	11.1	0.004	0.36	0.14	1	0.6	39.1

перманганатная, БО – бихроматная; БПК – биологическое поглощение кислорода.

Углеводороды, основным источником поступления в воду которых является водный транспорт, так как Центральное Онего – основная магистраль движения пассажирских и грузовых судов во все районы озера и Беломорско-Балтийский канал, отсутствовали или были обнаружены в небольших количествах (в среднем 0.03–0.2 мг/л). Среднегодовой их максимум (0.51 мг/л) отмечен в многоводном 1981 г. В сезонной динамике содержания углеводородов выявлен осенний максимум с постепенным их накоплением с июня по октябрь. Самые низкие концентрации определены в июне 1980 г., самые высокие – в октябре того же года в придонных слоях воды.

Содержание анионоактивных СПАВ, источником которых являются поверхностный, склоновый и антропогенный стоки, менялось за весь период исследований от аналитического 0 до 0.05 мг/л. Для сезонной динамики их содержания характерен весенне-летний максимум и спад в летне-осенний период. Среднее содержание в 1980 г. (0.18) было больше, чем в 1981-м (0.1 мг/л) и в остальные годы.

Взвешенных веществ в воде Центрального Онего мало (от 0 до 2 мг/л), 90–95 % из них составляют органические. В июне их значительно больше (1.2–2.4 мг/л), чем в октябре (0–0.4 мг/л). В периоды летней и зимней стагнации они не обнаруживаются.

Содержание и распределение кремния и железа в водной массе Центрального плеса аналогичны таковым всех холодноводных глубоких северных водоемов олиготрофного типа [54].

Абсолютное и относительное содержание растворенного в воде кислорода является косвенным показателем интенсивности продукционных и деструкционных процессов в водоеме, а его дефицит в гипolimнионе в летний период служит одним из признаков процесса антропогенного эвтрофирования озер. За период 1975–1987 гг. в течение года абсолютное содержание кислорода изменялось от 11 до 14.1 мг/л при относительном, равном 90–105 %. Самое высокое его количество было отмечено в подледный период (13–14.1 мг/л), в поверхностном горизонте подо льдом оно колебалось от 13.8 до 14 мг/л (94–96 % насыщения). Амплитуда колебаний от поверхности до дна очень мала (1–2 %). Дефицит кислорода в водной массе Центрального плеса в среднем составляет 4–6 %. Высокое абсолютное и относительное его содержание по всей водной массе свидетельствует о замедленном ходе в холодный зимний период процессов деструкции органических веществ, накопленных за лето [175].

Содержание растворенной двуокиси углерода в воде невысокое и менялось по глубине от 1 до 1.4 мг/л, по акватории – от 0.9 до 1 мг/л. Вода имеет нейтральную или слабощелочную рН (7–7.1).

В период весеннего перемешивания и начинающегося слабого прогрева (2.1–2.5 °С) водных масс пелагиали озера насыщение их кислородом остается прежним (94–96 %) при несколько меньшем абсолютном его содержании (13–13.3 мг/л). Перенасыщения поверхностных слоев воды растворенным кислородом в этот период не отмечено за все годы наблюдений. Растворенной двуокиси углерода накапливается к концу зимы значительно больше (1.7–2 мг/л), вода становится слабокислой (рН 6.8–6.9).

В период летней межени при прогреве поверхностных слоев воды до 14–16 °С насыщение их растворенным кислородом приближалось к максимуму (97–98 %), а в некоторых районах в 1977 г. за счет гистерезиса наблюдалось их перенасыщение кислородом до 105 %. Заметной разницы в дефиците кислорода между эпи- и гипolimнионом в водной толще этих районов, за некоторым исключением, не было отмечено. В другие годы исследований этого не наблюдалось. Заметного потребления кислорода на деструкцию органического вещества в гипolimнионе не определено. Вода летом слабощелочная (рН 7.2–7.3).

Период осеннего выхолаживания и установившейся гомотермии водных масс сопровождался гомоокиснением и гомогенным распределением растворенной двуокиси углерода по глубине; рН воды была на уровне весенних величин. Растворенной двуокиси углерода стало меньше (1.5–1.8 мг/л), чем весной, и чуть больше, чем зимой.

Таким образом, для водной толщи Центрального плеса озера в течение всего года характерно высокое насыщение ее растворенным кислородом, что свидетельствует о слабом потреблении его на деструкционные процессы и сохранении олиготрофного характера этого района озера. Однако единичные случаи значительного дефицита кислорода и повышения содержания общего фосфора в гипolimнионе являются сигналом, предвестником зарождающегося процесса антропогенного эвтрофирования.

Вода центральной части Онежского озера за рассматриваемый период осталась чистой, высокопрозрачной (4–5 м), с очень низким содержанием взвешенных веществ. В периоды зимней и летней стагнации они практически отсутствуют, в отдельных случаях обнаружены в ничтожных количествах (0.1–0.2 мг/л). В период осеннего перемешивания их определено 0.2–0.4 мг/л, а весной их содержание увеличивается до 1.2–2.8 мг/л с преобладанием (80–90 %) взвесей органического характера.

4.2.2. Залив Большое Онего

Залив Большое Онего является самым глубоководным районом озера. Речной сток почти отсутствует, берега в основном каменистые, населенных пунктов мало. Поэтому роль поверхностного и склонового стоков в формировании качества воды залива невелика. Его центральной глубоководной части присущи все характерные черты олиготрофного водоема: низкие значения большинства гидрохимических показателей, высокое насыщение водных масс кислородом, низкая биологическая продуктивность. По своим физико-химическим свойствам вода залива близка к таковой основного плеса озера [166, 174].

Вода залива отличается большой прозрачностью (4.5–5.2 м), хорошо насыщена кислородом (92–106 %, или 10.2–13.6 мг/л), почти равномерно распределенным по акватории и глубине, бедна органическими биогенными взвешенными веществами, а также растворенными минеральными солями. Большую роль в формировании ее качества играют гидрологические факторы. В периоды весеннего прогрева и осеннего выхолаживания водоема создается разница в поле температуры, вызванная термическим баром и обуславливающая различие качества воды. Химический состав воды литоральной зоны, прилегающей к пелагиали, приближается к таковому глубоководной зоны залива вследствие постоянного и активного водообмена с озером, менее значительного прогрева ее водных масс и отсутствия поверхностного стока.

Органическое вещество. Общее содержание органических веществ в воде залива невелико и колеблется в течение периода открытой водной поверхности от 9 до 16.6 мг/л, причем оно неодинаково в различных его участках: в глубоководном центральном – 8.8–12.6 мг/л в прилегающем к нему прибрежном мелководье – 9.2–12.8, в районе средних глубин – 9.2–13, в мелководном эвтрофированном, хорошо прогреваемом (например, губа Чеболакша) – 12–13.6 мг/л. Количественный и качественный состав органических веществ, растворенных в воде

Таблица 14
Среднегодовые значения общего содержания органического вещества и его косвенных показателей в воде залива Большое Онего

№ станции	Общее содержание ОВ, мг/л	C _{орг} , мг/л	ПО, мг О/л	Цветность, град	Отношение ПО/БО · 100	$\frac{C_{орг}}{N_{орг}}$
1977 г.						
1	—	—	—	—	—	—
16	12.9	6.2	7.2	21	44	15
3	—	—	—	—	—	—
4	—	—	—	—	—	—
1978 г.						
1	10.7	5.1	6.7	15	49	12
16	11.5	5.5	6.5	15	54	11
3	11.2	5.3	6.9	17	49	12
4	12.6	6.0	7.3	17	46	13
1979 г.						
1	11.3	5.4	7.2	22	49	—
16	11.3	5.2	7.0	23	50	—
3	—	—	—	—	—	—
4	11.6	5.5	7.6	24	44	—

залива, характеризуется следующими величинами его косвенных показателей: цветности — 20–22°, перманганатной окисляемости — 6.6–7.4 и бихроматной — 14.3–19 мг О/л, БПК₅ — 0.7–2.2, БПК₂₀ — 1.7–3.2 мг О₂/л, отношения C_{орг} : N_{орг} — 13–18.

Количественная оценка общего содержания органических веществ и средних величин его косвенных показателей свидетельствует о том, что вода основного плеса и прилегающих к нему мелководных участков по содержанию и качественному составу органических веществ однородна. Лишь в малых закрытых эвтрофированных губах с замедленным водообменом оно выше. Косвенные показатели органических веществ также выше, чем в основном глубоководном плесе залива (табл. 14).

Растворенное в воде органическое вещество весной преимущественно аллохтонного происхождения, летом — автохтонного, малоокрашенное. С момента освобождения водоема ото льда до середины июня преобладают стойкие к биохимическому окислению органические вещества гумусовой природы, что подтверждается высокой величиной отношения $\frac{ПО}{БО} \cdot 100$ — около 50%, низкими значениями отношения C_{орг} : N_{орг} — 18–20, а также коэффициента цветности по перманганатной окисляемости $\frac{Цв}{ПО}$ — 2.7–3.2, малой величиной БПК₅ — 0.98–1.34 мг О₂/л. Интенсивный прогрев воды с середины июня, повышенное содержание органических веществ и биогенных элементов активизируют

развитие планктона, сопровождающееся изменением качественных характеристик органического вещества: величина отношения $\frac{ПО}{БО} \cdot 100$ снижается до 43–30%, C_{орг} : N_{орг} — до 10–15, коэффициент $\frac{Цв}{ПО}$ — до 2.5–2, а величина БПК₅ возрастает до 1.32–1.8 мг О₂/л. Эти изменения косвенных показателей свидетельствуют о новообразовании автохтонного органического вещества, что подтверждается и более высокими значениями биомассы и численности бактерио- и фитопланктона по сравнению с ранней весной [252].

В сезонной динамике содержания органических веществ отмечены 3 максимума: весенне-летний — в середине июня, летний — в момент максимального прогрева воды и осенний, когда происходит накопление органических веществ в результате разложения отмершего планктона и затухания бактериальных процессов. Весенний подъем в содержании органических веществ (12–12.2 мг/л) в глубоководной зоне залива начинается позднее (12–14 июня) из-за медленного прогрева водной массы и более позднего в связи с этим развития планктона [93], чем в районе средних и малых глубин (2–4 июня). Самое высокое количество органических веществ (12.6–13.4 мг/л) отмечено в хорошо прогреваемом и мелководном участке залива (губа Чеболакша), и процесс его новообразования начался здесь раньше, чем в глубоководном районе, сразу же после вскрытия губы. За весенним подъемом содержания органических веществ в основном плесе залива сразу же следует его постепенное снижение с 12 до 10.7 мг/л. В губе Чеболакша в результате интенсивного прогревания воды и продолжающегося развития планктона [93] количество органических веществ держится на одном и том же уровне в течение всего июня.

За счет активного новообразования автохтонного органического вещества изменяется его качественный состав в сторону легкоокисляемых соединений (отношение C_{орг} : N_{орг} снижается с 13 до 10, величина БПК₅ увеличивается с 0.9 до 1.2 мг О₂/л). Водные массы залива начинают обогащаться местным планктоногенным органическим веществом, и его количество к концу июня—началу июля достигает весеннего максимума (13.4 мг/л). В 1-й декаде июля при прогреве поверхностных слоев до 17.5 °С и максимальном развитии фитопланктона начинается летний пик в содержании органических веществ. В прибрежной и глубоководной зоне основного плеса залива их летний максимум (11.8–13 мг/л) в 1979 г. был отмечен 10 июля, а в 1978 г. (11.6 мг/л) — 15 августа. Такая разница в сроках максимального накопления новообразованного автохтонного органического вещества связана с тем, что 1978 г. был более холодным (среднегодовая температура поверхности воды ниже нормы на 1–2 °С) и период прогревания более растянутым.

С середины июля концентрация органических веществ снижается в связи с интенсификацией бактериальных процессов и минерализацией ОВ. Однако с середины августа, с накоплением отмирающего фито- и зоопланктона, содержание их снова увеличивается (12–12.8 мг/л),

Таблица 15

Среднегодовые и среднемноголетние величины показателей

Год	Прозрачность, м	Цветность, град	Окисляемость, мг О/л		БПК ₅	БПК ₂₀	NH ₄ ⁺	N _{общ}
			ПО	БО				
			мг О ₂ /л		мг N/л			
1977	5.1	21	6.8	12.3	0.72	2.24	0.05	0.65
1978	5.0	16	6.7	12.8	0.92	—	0.07	0.71
1979	5.3	22	7.2	15.3	0.85	—	0.04	0.66
1982	5.2	21	6.8	16.8	1.07	2.17	0.04	0.59
Средне-много-летняя	5.2	20	6.9	14.3	0.89	2.20	0.05	0.65

а с конца августа начинается постепенная убыль, обусловленная затуханием продукционных процессов и минерализацией уже имеющегося запаса. Однако в начале октября отмечается новый незначительный подъем их концентрации (11.8–13.4 мг/л) за счет осеннего перемешивания богатых остатками мертвого планктона придонных горизонтов воды с поверхностными.

Закономерности сезонной динамики общего содержания органических веществ характерны и для косвенных его показателей. В течение периода открытой водной поверхности величина цветности изменялась от 14 до 28°, окисляемости — от 6.1 до 9.1 мг О/л. В глубоководной части залива величины цветности (11–21°) и окисляемости (6.2–7.8 мг О/л) ниже и интервалы внутригодовых колебаний меньше, чем в прибрежных участках и мелководных губах (16–28 и 6.7–9.1 соответственно), куда наряду с образующимся автохтонным органическим веществом в результате смыва с водосборной площади поступает аллохтонное. В периоды весеннего половодья и осеннего паводка в литоральной зоне залива величины этих показателей несколько выше, чем в межени.

Необходимо отметить, что сезонные колебания содержания органических веществ и величин его косвенных показателей в глубоководной зоне незначительны: так, в 1978 г. количество ОВ было равно 10.1–11.6 мг/л, цветность — 11–21°, перманганатная окисляемость — 6.2–7.8 мг О/л, а в 1979 г. 10.2–12.2, 21–25 и 5.7–8.1 соответственно. В литоральной зоне (губа Чеболакша) они более существенны: в 1978 г. общее содержание ОВ менялось от 10.5 до 13.2 мг/л, величина цветности составляла 21–26°, перманганатной окисляемости — 6.5–8.3, бихроматной — 10.1–15.7 мг О/л, а в 1979 г. 11.6–13.6, 18–24, 6.8–8.1 и 14.6–17.3 соответственно. Проведенные исследования показали, что сезонные изменения общего содержания органических веществ, их косвенных показателей, а также фосфор- и азотсодержащих органических соединений обусловлены периодичностью развития гидробионтов.

качества воды залива Большое Онего

P _{общ} ['] мг P/л	$\frac{C_{орг}}{N_{орг}}$	Фенолы, мг/л	Нефтепро- дукты, мг/л	СПАВ, мг/л	Таннины, мг/л	Взвешен- ные веще- ства, мг/л	Сумма ионов, мг/л
0.014	16	—	—	—	—	—	—
0.014	12	—	—	—	—	—	—
0.013	11	—	—	—	—	—	—
—	16	0.004	0.52	0.03	0.4	0.1	41.8
0.014	14	0.004	0.52	0.03	0.4	0.1	41.8

Азотсодержащие органические соединения в воде залива составляют 60–75% от общего азота [174], а фосфорсодержащие — 85–95% от общего фосфора. В течение вегетационного периода количество первых колебалось от 0.21 до 0.82 мг N/л, вторых — от 0.006 до 0.033 мг P/л. Их распределение по акватории залива и сезонам подчиняется тем же закономерностям, что и общее содержание органических веществ. Их максимальное количество определено в губе Чеболакша, наиболее продуктивном районе залива (табл. 15), в конце вегетационного сезона. Довольно высокое содержание отмечено в конце июля—начале августа, что обусловлено максимальным развитием планктона. В сезонной динамике четко прослеживаются 3 их максимума, совпадающие с пиками наличия органических веществ. Особенно отчетливы летний и осенний максимумы: в глубоководной зоне залива наибольшее количество азот- и фосфорсодержащих соединений обнаружено в конце августа. В губе Чеболакша в период максимального прогрева воды возрастание их концентрации начинается в конце июля и заканчивается в конце августа, т. е. наблюдается в течение всего периода вегетации планктона, причем с 10 июля по 15 августа она держится на одном уровне. Весенний пик сильнее выражен в прибрежной мелководной части залива, в глубоководной он слабее.

Общее количество органических веществ, в том числе азот- и фосфорсодержащих, подвержено не только внутри-, но и межгодовой изменчивости, хотя и не очень значительной. В холодном 1978 г. в воде залива их было меньше, чем в более теплом и продуктивном 1979 г.

Концентрация органических веществ и его косвенных показателей неоднородна не только по акватории, сезонам, годам, но и по глубине залива. В начале периода открытой водной поверхности в результате установившейся гомотермии наблюдается их равномерное распределение по всей водной толще. С начала прогревания верхних горизонтов воды происходит расслоение водных масс по вертикали. В поверхностном, наиболее прогретом, полуметровом слое воды содержание органических веществ и значение его косвенных показателей выше (13–15.1 мг/л),

чем в нижележащих, не прогретых (10.7–11.8). С середины июня в распределении температуры устанавливается прямая стратификация, сопровождающаяся неоднородным распределением органических веществ, биогенных элементов и растворенных в воде газов, что обусловлено также неравномерным развитием гидробионтов. Максимум органических веществ отмечен в наиболее прогреваемом и продуктивном 0–6-метровом слое воды и совпадает с максимумом развития фитопланктона [93].

Дальнейшее прогревание водных масс сопровождается опусканием максимума органических веществ из трофогенного 0–10-метрового слоя в нижележащие горизонты, что связано с перемещением максимума биомассы фитопланктона. Повышение температуры воды в середине июля до 17.5 °С в 1979 г. и до 13.1 в 1978 г. вызвало интенсификацию бактериальных процессов в поверхностных горизонтах, с чем был связан летний максимум органических веществ (14.3 мг/л – в 1979 г. и 10.9 – в 1978 г.) с преобладанием его легкоокисляемых форм (отношение $C_{орг} : N_{орг}$ в верхнем трофогенном слое равно 8–11, в нижележащих – 12–15).

В 3-й декаде августа в гипolimнионе устанавливается гомогенное распределение органических веществ по вертикали (10.3–10.9 мг/л) с преобладанием трудноокисляемых. Такое изменение качественного состава ОВ обусловлено тем, что образовавшееся к этому времени планктонное органическое вещество частично минерализуется, а остальная его часть трансформируется в водный гумус. Это подтверждается увеличением отношения $C_{орг} : N_{орг}$ до 17–18 и перманганатной окисляемости к бихроматной – до 45–47 %.

Период осеннего охлаждения водных масс сопровождается снижением численности бактерий и отмиранием фитопланктона, опусканием их в нижележащие горизонты, что вызывает увеличение количества планктонного органического вещества в глубоких слоях воды. С середины октября наблюдается равномерное распределение содержания ОВ по вертикали.

Дубильные вещества в воде залива находятся в ничтожных количествах (0–1 мг/л при среднегодовом значении 0.4) ввиду ограниченности поверхностного и склонового стоков, которые являются источником их поступления. В период весеннего половодья и осеннего паводка их несколько больше и они сосредоточены в поверхностных слоях воды, в глубинных же и придонных водах отсутствуют. Фенольных соединений природного происхождения в период летнего прогрева не наблюдается, а к осени накапливается до 4 мкг/л за счет замедления биохимических процессов в условиях низких температур. Углеводороды определены в малых количествах – 0.14–0.37 мг/л, СПАВ в воде залива нет.

Взвешенные вещества обнаружены в воде только в период весеннего половодья, и то в небольших количествах (0.1–0.2 мг/л), что связано с отсутствием в этом районе поверхностного стока. В остальное время года в воде залива их не было.

Биогенные элементы и газовый режим. Вода залива, особенно его центральной глубоководной части, принадлежащей к олиготрофному

типу, бедна биогенными элементами, особенно минеральными формами фосфора и азота, а также железом.

Содержание минерального фосфора в воде очень низкое (2–4 мкг/л) и мало меняется по акватории, глубине и сезонам года. В глубоководной зоне его количество не превышает 3 мкг/л и одинаково за весь период исследований. Низкое содержание минерального фосфора является одним из факторов, лимитирующих развитие гидробионтов в заливе. Относительно высокая численность и биомасса фитопланктона в период максимального прогрева воды при постоянном недостатке фосфора обеспечивается за счет высокой скорости его оборачиваемости в водоеме. Освобождающийся в результате внутриводоемных процессов фосфор сразу же потребляется фитопланктоном, обуславливая равновесное и почти постоянное его содержание в воде залива, в том числе и в литоральной зоне (губа Чеболакша). Содержание общего фосфора в воде залива за весь период исследований не превышало 25 мкг/л при среднем значении 0.013.

Из минеральных форм азота преобладал нитратный (см. табл. 15). В течение вегетационного периода 1977 г. содержание нитратов колебалось от 0.07 до 0.28 мг/л, в 1978 г. – от 0.1 до 0.27 и в 1979 г. – от 0.02 до 0.23. В глубоководной зоне их распределение по глубине и акватории залива более умеренное (0.12–0.22 мг N/л), чем в литоральной (0.04–0.17) и в районе малых и средних глубин. В начале и конце вегетационного периода в воде их больше, чем в период летнего прогрева и максимального развития фитопланктона, когда происходит массовое потребление нитратов. В пелагиали залива количество нитратов в 1978 г. было не менее чем 0.13 мг N/л, в 1979 г. – ниже 0.1, а в литоральной зоне с середины июля до середины августа 1979 г., когда вода прогрелась до 17.2–20.8 °С, наблюдалось их максимальное потребление. В воде их было определено лишь 0.02–0.09 мг N/л. С конца августа в связи с начавшимся охлаждением водных масс и уменьшением численности фитопланктона количество нитратов постепенно увеличивается до 0.11–0.15, достигая в октябре своего максимума – 0.17 мг N/л. Таким образом, в более теплом и продуктивном 1979 г. фитопланктоном потреблялось больше нитратов, чем в более холодном 1978-м.

Содержание аммонийного азота во время исследований изменялось от 0.03 до 0.14 мг N/л. В период весеннего половодья оно не превышало 0.03–0.06 мг N/л и было почти одинаково по всей глубине. С началом прогревания водных масс и интенсивного развития фитопланктона количество аммонийного азота постепенно увеличивается до 0.09, а на глубине 60–80 м достигает 0.14 мг N/л, что обусловлено интенсификацией бактериальных процессов минерализации органических веществ. С середины июля его содержание снова снижается до 0.05–0.06 мг N/л в связи с уменьшением численности бактерий. В середине августа наблюдалась повторная вспышка численности бактериопланктона, вызвавшая увеличение концентрации аммонийного азота до 0.08–0.1 мг N/л. В конце сентября–начале октября, в период осеннего выхолаживания водных масс, уменьшается численность сапрофитов,

минерализующих органическое вещество, поэтому и содержание аммонийного азота падает до 0.05–0.07 мг N/л, приближаясь к весенним величинам.

Общее количество минерального азота изменялось от 0.16 до 0.26 мг N/л, причем в глубоководной олиготрофной зоне залива его больше (см. табл. 15), чем в литоральной, что связано с его более интенсивным потреблением в последней. Концентрация общего азота в воде залива не превышала 0.89 мг N/л за весь период исследований.

Содержание суммарного железа очень низкое – 0.02–0.1 мг/л, причем в глубоководной части его еще меньше (0.02–0.04), чем в литоральной (0.03–0.1). В его сезонной динамике отмечен небольшой подъем весной и осенью и спад в летние месяцы.

Кремния в воде залива также мало (0.3–0.7 мг/л). В начале вегетации его было 0.6–0.7 мг/л, а затем, во время массового развития фитопланктона, его количество снизилось до 0.3–0.5 и осталось на этом уровне до конца вегетационного периода.

Вода залива сильно насыщена кислородом (91–105%). Его абсолютное содержание колеблется от 10.4 до 14.4 мг/л. Сразу после освобождения залива ото льда устанавливается гомотермия, сопровождающаяся гомооксигенией. С началом быстрого прогресса водных масс в результате гистерезиса наблюдается перенасыщение поверхностных слоев воды кислородом до 101–104% в 1978 г. и до 101–109 в 1979-м. В открытых ветровому перемешиванию прибрежных водах залива насыщение водных масс не опускается ниже 91%. В районе замедленного водообмена и ветрового перемешивания (губа Чеболакша) в течение всего периода открытой водной поверхности содержание растворенного кислорода остается высоким, но в начале июня 1978 г. и в начале августа 1979 г. на поверхностном горизонте наблюдался значительный его дефицит (23 и 32% соответственно), который был связан с его интенсивным потреблением на активно протекающие при высоких летних температурах воды (17.4–18.4 °С) процессы биохимического окисления автохтонного органического вещества. В гипolimнионе дефицит составляет лишь 2–6%, т. е. основной водной массе свойственно высокое насыщение кислородом и малая амплитуда его сезонных колебаний, что характерно для всех глубоких олиготрофных озер Севера.

Содержание растворенной двуокиси углерода менялось от 1.2 до 3.2 мг/л, и накапливалась она в максимальных количествах в придонных горизонтах. Реакция среды была нейтральной или слабощелочной (рН 6.9–7.2).

Многолетние наблюдения за химическим составом воды залива Большое Онего выявили его неоднородность по акватории и глубине и слабую временную изменчивость (см. табл. 15), обусловленную периодичностью развития гидробионтов и гидрометеорологическими факторами. В сезонной динамике содержания органических веществ и биогенных элементов выявлены 3 максимума – весенний, летний и осенний. В течение вегетационного периода изменяются не только

их количественные показатели, но и качественный состав органического вещества в зависимости от перераспределения автохтонного и аллохтонного материала. По содержанию органических форм азота, фосфора и углерода 1979 г. был богаче, чем 1977 и 1978 гг., хотя величина продукции тоже довольно низкая, характерная для олиготрофных водоемов.

4.2.3. Повенецкий залив

Повенецкий залив – самый крупный глубоководный залив в Онежском озере. Он изолирован от основного плеса, и его водообмен с озером осуществляется через Заонежский залив. Химический состав воды формируется за счет озерных, высокогумифицированных окрашенных приточных вод с водосбора, атмосферных осадков, подземного и антропогенного стоков (табл. 16, 17). Приведенные в таблицах данные показывают, что основными источниками формирования качества воды залива являются водные массы Центрального плеса озера и речной сток с водосбора. Приточные воды обогащают залив взвешенными, органическими (73% которых составляют таниды) и минеральными веществами. Наибольшее количество стойких к биохимическому окислению органических веществ гумусовой природы несут реки Кумса, Лумбушка, Повенчанка, взвешенных – Вичка и Беломорско-Балтийский водный путь [170]. Из биогенных элементов больше всего вносится общего азота, преимущественно органического и аммонийного, и фосфора. Атмосферные осадки являются источником поступления в основном нитратов и сульфатов. На качество воды залива оказывает влияние и судоходство, так как он является частью магистрали, проходящей из Волго-Балта в Беломорско-Балтийский водный путь.

Большая губа Повенецкого залива служит источником водоснабжения г. Медвежьегорска и одновременно приемником антропогенного стока. Состав воды его прибрежных участков, особенно северной части вдоль Медвежьегорского побережья, а также малых губ (Пиндушской, Повенецкой, Лумбуши, Пергубы, Кумсагубы и Оровгубы, Челмужской), изменился под влиянием речного и склонового стоков с водосбора, а также антропогенного воздействия. Эти изменения выразились в обогащении ее органическим веществом речных вод, окрашенных гумусом, в некотором увеличении или уменьшении минерализации, ухудшении газового режима воды отдельных участков, возрастании содержания нестойких органических веществ антропогенного стока, появлении специфических органических соединений типа нефтепродуктов, смолистых и дубильных, а также взвешенных веществ.

Вода центральной глубоководной части Повенецкого залива характеризуется высоким качеством, обладает относительным постоянством химического состава, отличается малой амплитудой сезонных колебаний и принадлежит к олиготрофному типу [177]. Вследствие изолированности залива, характера водообмена и особенностей речного стока она отличается от воды центрального плеса озера более низким содержанием органических веществ и биогенных элементов, меньшей

Таблица 16
Поступление взвешенных, органических
с атмосферными осадками и речным

Вид поступления	Взвешенное вещество	Органическое вещество	Танниды
Снеговые воды	834	798	61
Речной сток	5026	30907	11544
Общее поступление	5860	31705	11605

Таблица 17
Среднегодовые и среднемноголетние величины показателей

Год	Прозрач- ность, м	Цвет- ность, град	Окисляемость, мг О/л		БПК ₅	БПК ₂₀	NH ₄ ⁺	N _{общ}
			ПО	БО				
1975	—	18	6.5	13.1	0.77	—	—	—
1977	3.8	21	6.8	16.5	1.15	2.04	0.04	0.40
1978	5.8	18	5.9	12.9	1.15	2.41	0.04	0.62
1979	3.8	25	6.8	12.8	0.92	—	0.06	0.62
Средне- много- летняя	4.5	21	6.5	13.8	1.0	2.22	0.05	0.55

и биогенных веществ (т)
стоком в Повенецкий залив

Фосфор общий	Азот			
	аммонийный	нитритный	нитратный	общий
3	31	1	29	120
34	87	0	44	1213
37	118	1	73	1333

качества воды Повенецкого залива

P _{общ} мг P/л	$\frac{C_{орг}}{N_{орг}}$	Фенолы, мг/л	Нефтепро- дукты, мг/л	СПАВ, мг/л	Взвешенные вещества, мг/л	Сумма ионов, мг/л
—	—	—	0.03	0.05	1.0	—
0.013	16	—	—	—	0.9	40.1
0.015	11	0.010	—	—	0.1	40.1
0.013	12	0.011	0.22	—	—	—
0.014	13	0.010	0.12	0.05	0.7	40.1

степенью окрашенности и высокой прозрачностью (5–6 м). По содержанию органических веществ, биогенных элементов и уровню биологической продуктивности центральную глубоководную часть Повенецкого залива можно отнести к ультраолиготрофному типу. Вода этого района характеризуется самой низкой в озере величиной цветности (14–16° весной, 18–20 летом и осенью) и окисляемости (4.9–5.9 мг О/л весной и 5.2–5.7 летом).

Общее содержание органических веществ, вычисленное по формуле, предложенной Б. А. Скопинцевым [205], не превышает 12.6 мг/л в июне и 11.8 в августе. Органическое вещество малоокрашенное, летом преимущественно автохтонного происхождения. Узкие значения отношений $C_{орг} : N_{орг}$, равные 9–12, и $\frac{ПО}{БО} \cdot 100 = 24–39\%$, а также низкие коэффициенты цветности по перманганатной (2–3) и бихроматной (1–2) окисляемости указывают на присутствие лабильного органического вещества. Однако невысокие величины БПК₅ (0.16–1.47 мг О₂/л), высокие значения отношений $\frac{ПО}{БО} \cdot 100 = 39–48\%$ и $C_{орг} : N_{орг} = 13–18$ в воде некоторых горизонтов и районов залива свидетельствуют и о наличии биохимически стойкого водного гумуса [165]. Косвенные показатели органического вещества глубоководной зоны залива мало изменяются по глубине, акватории и сезонам

(см. табл. 17). Вода этой части характеризуется сходством и постоянством химического состава, малой амплитудой внутри- и межгодовых колебаний (см. табл. 15).

Повенецкий залив изолирован от основного плеса, и водообмен его с озером осуществляется через Заонежский залив. Вода последнего отличается большей степенью окрашенности (цветность 22–25°), а также повышенными величинами окисляемости (6.9–8.8 мг О/л), отношения $\frac{ПО}{БО} \cdot 100 = 37–52\%$, коэффициента цветности по перманганатной окисляемости (3–4), т. е. более высоким содержанием органических веществ, преимущественно стойких к биохимическому окислению. Такое повышение цветности и окисляемости воды обусловлено влиянием высокогумифицированных вод речного стока и окрашенных вод Челмужской губы, в которую впадает крупный приток — р. Немина, повышающая в губе цветность воды до 60–75°. Остальные реки, впадающие в Заонежский залив, имеют заболоченный водосбор и несут в него также сильно окрашенную воду (цветность 90–230°). Приточные воды с водосбора в период весеннего половодья оказывают большое влияние на содержание органических веществ в литоральной зоне залива, особенно в период существования термического бара. Самые высокие величины содержания органических веществ и его косвенных характеристик были отмечены в обособленных губах —

Челмужской и Оровгубе, подверженных влиянию высокогумусных притоков. Вода Оровгубы характеризуется следующими показателями: цветность 44–63°, перманганатная окисляемость 8.3–11.9 мг О/л, бихроматная – 15.7–22.4. Общее содержание ОВ весной выше (17.4–17.6 мг/л), чем летом (10.7–12.4). Органическое вещество в течение всего года стойко к биохимическому окислению, гумусовой природы, о чем свидетельствуют высокие величины отношения перманганатной окисляемости к бихроматной (52–54%), $C_{орг} : N_{орг}$ (17–18), коэффициентов цветности по перманганатной (5) и бихроматной (3) окисляемости.

Вода Челмужской губы еще более гумифицирована, что подтверждается повышенными величинами цветности (60–75°), перманганатной окисляемости (13.2–14.4 мг О/л), отношения $\frac{ПО}{БО} \cdot 100$ (51–54%) и $C_{орг} : N_{орг}$ (21–24), коэффициента цветности по перманганатной (5–6) и бихроматной (3–4) окисляемости. Общее содержание органических веществ также выше (17.2–19.7 весной и 15.3–16.8 мг/л летом).

Вода малых губ северо-западного побережья залива (Толвуйская) по количеству и качеству органического вещества приближается к воде центральной части залива.

Вода Большой, Пиндушской, Пергубы, Лумбуши, Кумсагубы и северного побережья Повенецкого залива в районе г. Медвежьегорска, кроме воздействия речного и склонового стоков, испытывает антропогенное влияние. Прибрежные воды Большой губы в районе г. Медвежьегорска более окрашены, особенно в период весеннего половодья и осеннего паводка (цветность 24–43° в июне и 30–45° в августе–сентябре), в результате притока цветных гумусных вод рек Кумы и Вички (цветность 40–67°). Качество воды этого района характеризуется нижеприведенными показателями:

ПО, мг/л	7.4–9.4
БО, мг/л	17.4–20.2
Цветность, град	25–45
Содержание, мг/л:	
нефтепродуктов	0.1–0.2
танинов	6–8
взвешенных веществ	0.8–1.2
азота аммонийного, мг N/л	0.04–0.06
БПК ₅ , мг О ₂ /л	0.9–1.2

Органическое вещество литоральных вод весной стойко к биохимическому окислению, преимущественно аллохтонное и представлено в основном водным гумусом болотного происхождения. Это подтверждается повышенными значениями отношения $\frac{ПО}{БО} \cdot 100$ (50–52%), коэффициента цветности по перманганатной (4–5) и бихроматной (3) окисляемости, низкой величиной БПК₅ (0.67–1.03 мг О₂/л). Летом преобладает автохтонное органическое вещество,

а также лабильное – за счет антропогенного стока, повышающего величину бихроматной окисляемости, БПК₅, содержание аммонийного азота, фосфатного фосфора, летучих фенолов, СПАВ и т. д.

Губа Лумбуши испытывает влияние высокогумусных притоков рек Лумбушки и Пиндушки, а также антропогенного стока пос. Пиндуши, судоремонтного и деревообрабатывающих заводов. В результате этого общая концентрация органических веществ увеличилась до 13.2 мг/л, величина перманганатной окисляемости – до 6.9–9.4 мг О/л, цветности – до 25–29°, БПК₅ – до 1.4 мг О₂/л, возросло содержание органических веществ антропогенного происхождения – фенолов, нефтепродуктов, СПАВ, смолистых и взвешенных (3.4 мг/л).

В воде Пергубы, где расположен порт – автомат по перегрузке с железнодорожного транспорта на водный, содержание органических веществ увеличилось до 14.2 мг/л, взвешенных – до 1.2, нефтепродуктов – до 0.11 мг/л, аммонийного азота – до 0.03 мг N/л, возросла перманганатная окисляемость (6.1 мг О/л), появилось дополнительное количество фосфатного фосфора, особенно в донных отложениях [165].

Вода Повенецкой губы под влиянием активного судоходства, хозяйственной деятельности в зверосовхозе и пос. Повенец содержала повышенное по сравнению с фоновым (центральная глубоководная часть Повенецкого залива) количество нефтепродуктов, фенолов, взвешенных веществ (2.6 мг/л), имела более высокие величины БПК₅, аммонийного азота, цветности, перманганатной и бихроматной окисляемости. В течение навигационного периода накапливались различные виды нефтепродуктов, количество которых к осени достигало максимума.

Качество воды Кумсагубы изменилось под влиянием промышленного стока канифольно-экстракционного завода, содержащего продукты экстракции древесины. В районе его воздействия увеличилась концентрация органических соединений (17.4–25.8 мг/л), в том числе танинов и смолистых, а также взвешенных веществ, минеральных солей, растворенной двуокиси углерода (9.2 мг/л), возросли значения перманганатной и бихроматной окисляемости. В настоящее время район губы, прилегающий к месту поступления антропогенного стока, заилен взвесями, сильно зарос.

Таким образом, вода глубоководной зоны Повенецкого залива мало подвержена сезонным и межгодовым изменениям, в силу чего сохранила свое высокое качество и олиготрофный характер. Вода литоральной зоны и малых губ, подверженных влиянию природного и антропогенного стока, изменила свой состав и качество в сторону заметного увеличения содержания органических и взвешенных веществ, а также других показателей антропогенной природы. Ее следует отнести к мезотрофному типу.

4.2.4. Южная часть озера

На формирование химического состава воды южной части озера большое влияние оказывает Центральный плес, впадающие по южному побережью реки, особенно Вытегра, атмосферные осадки и антропогенный

Таблица 18
Сезонная динамика средних величин
органического вещества воды южной части

Месяц	Общее содержание ОВ, мг/л	Окисляемость, мг О/л		Цветность, град
		ПО	БО	
Июнь	11.6	6.2	14.7	18
Август	8.8	7.2	11.2	22
Октябрь	10.2	7.8	13.0	21
Средняя за год	10.2	7.1	13.0	20

косвенных показателей
Онежского озера (1980 г.)

БПК ₅ , мг О ₂ /л	$\frac{C_{орг}}{N_{орг}}$	$\frac{ПО}{БО} \cdot 100, \%$	P _{орг} , мг P/л	N _{орг} , мг N/л
1.21	11	42	0.009	0.518
0.63	9	64	0.011	0.466
0.42	6	60	0.011	0.762
0.75	9	55	0.010	0.582

Таблица 19
Химический состав воды южной части
существования весеннего

Зона	Общее содержание ОВ, мг/л	Цветность, град	Окисляемость, мг О/л	
			ПО	БО
Термоинертная	11.6–14.9	21–24	7.0–7.3	14.7–16.2
Термоактивная	14.1–18.9	25–33	8.1–8.7	17.8–23.3

Онежского озера в период
термического бара

Таннины, мг/л	Si, мг/л	Fe, мг/л	$\Sigma_{п}$, мг/л	$\frac{ПО}{БО} \cdot 100, \%$	$\frac{C_{орг}}{N_{орг}}$
1.0	0.3	0.04	45.7	35–40	10–14
2–6	0.5–0.9	0.05	40.5–43.7	36–63	14–18

Примечание. Здесь и в табл. 25–27 $\Sigma_{п}$ – сумма ионов.

фактор. Химический состав воды южной части и Центрального плеса (см. табл. 13) сходен, но значения озерных показателей здесь как бы осредненные. Исключение составляют приустьевые участки рек Вытегры и Свири, отличающиеся от озерных природными особенностями и антропогенной нагрузкой [173]. Интенсивное ветровое перемешивание и активный водообмен с центральной частью озера обеспечивают относительно постоянное химического состава вод района.

Несколько отличаются от средних величин показатели химического состава воды этого района в периоды весеннего и осеннего термических баров (табл. 18, 19), оказывающих существенное влияние на формирование физических и химических процессов в озере. При этом создаются 2 обособленные зоны (термоактивная и термоинертная), резко отличающиеся гидрологическими и гидрохимическими показателями, в основном количественными и качественными характеристиками органического вещества, некоторых биогенных элементов и ионного состава (табл. 19).

При проведении термической съемки (17–19 V 1983 г.) южной части была установлена неоднородность поля температуры, обусловленная термическим баром. 18 мая его фронт находился в 2.5–3 км от мыса Чейнаволок и 4–5 км от мыса Петропавловского, в 10–20 км от южного берега, и оконтуривался 20-метровой изобарой (рис. 36). В термоинертной зоне находились холодные (3.4–4 °С) озерные воды с присущими им гидрохимическими характеристиками, близкими

к таковым Центрального плеса, а в термоактивной – прогретые до 6.9–7.6 °С прибрежные воды с более высокими концентрациями органических, биогенных и минеральных веществ [172].

Водные массы термоинертной зоны характеризовались низкими величинами цветности, перманганатной и бихроматной окисляемости, малым содержанием таннидов, кремния, железа и были более минерализованы за счет гидрокарбонатных соединений, ионов кальция и магния. Им было присуще однородное пространственное распределение всех компонентов, обусловленное гомотермией. Водные массы термоактивной прибрежной зоны занимали большую часть акватории мелководной южной части и отличались более высоким содержанием органических веществ и их косвенных показателей, а также таннидов, железа, кремния и общей суммы ионов. Повышенные концентрации этих веществ обусловлены здесь их поступлением с речными водами [173].

Зоны, разделенные фронтом термического бара, отличаются между собой не только количеством этих веществ, но и качественными характеристиками (табл. 19). Водные массы термоинертной зоны характеризуются более узким отношением $C_{орг} : N_{орг}$ и меньшей величиной отношения $\frac{ПО}{БО} \cdot 100$, указывающих на господство автохтонного органического вещества за счет интенсивного развития весенних холодолюбивых форм фитопланктона, преимущественно диатомовых. Воде

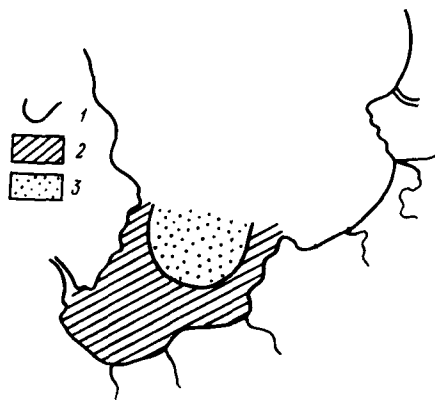


Рис. 36. Распределение величины цветности в поверхностных водах южной части Онежского озера 18.05.1983 г.
1 — фронт термобара. Цветность: 2 — 25–33°, 3 — 24–25°.

термоактивной зоны свойственны большие величины отношения

$\frac{ПО}{БО} \cdot 100$ и более широкое отношение $C_{орг} : N_{орг}$, что свидетельствует о преобладании стойкого к биохимическому окислению аллохтонного органического вещества, поступающего с речными водами.

Фронт термического бара препятствует перемешиванию этих разнокачественных водных масс, создавая 2 обособленные зоны с разными количественными и качественными характеристиками. Он оказывает существенное влияние на качество воды южной части озера в весенний и осенний периоды.

Общее содержание органических веществ в течение 1975–1983 гг. колебалось от 0.8 до 18.9 мг/л. Их косвенные показатели характеризовались следующими величинами: цветность воды — 16–25°, перманганатная окисляемость — 5.4–8.4 мг О₂/л и бихроматная — 16.2–23.3, БПК₅ — 0.17–2.3 мг О₂/л и БПК₂₀ — 0.58–3.49, коэффициент цветности по перманганатной окисляемости — 1–3. Значительный диапазон колебаний этих значений свидетельствует о том, что качество воды подвержено межгодовой изменчивости и обусловлено термикой и водностью года, а также влиянием антропогенных факторов. Большая величина отношения $\frac{ПО}{БО} \cdot 100$ и низкие значения БПК₅ в большинстве

случаев свидетельствуют о преимущественном содержании биохимически стойкого органического вещества [176]. Максимальные окисляемость и сумма ионов отмечены в приустьевом участке р. Вытегры, наименьшие — в истоке р. Свири. Содержание органического азота колебалось от 0.34 до 0.6 мг N/л, органического фосфора — от 0.010 до 0.012 мг P/л.

В сезонной динамике содержания органических веществ определенной закономерности не выявлено. В многоводные и холодные годы органических веществ содержалось больше в периоды весеннего половодья и осенних паводков за счет аллохтонного стока с водосбора. В теплые маловодные годы их было больше в летнее время за счет автохтонного органического вещества. Если проследить за межгодовой динамикой общего количества органических веществ и их косвенных показателей (табл. 20), то можно отметить, что в более теплые и многоводные годы (1979, 1981, 1983) органических веществ в воде южной части озера было больше, чем в холодные и маловодные.

Минеральные формы биогенных элементов содержатся в небольших количествах, особенно мало минерального фосфора (0.003 мг P/л), который почти не изменяется во времени и пространстве. Из соединений азота преобладают нитраты (0.47–0.32 мг N/л). В сезонной динамике их содержания отмечен осенний минимум, обусловленный минерализацией накопленного за лето новообразованного органического вещества. Весной их меньше и они поступают в основном с аллохтонным стоком с водосбора. Минимальное количество нитратов определено в летнюю межень, особенно в теплые годы, за счет потребления их фитопланктоном. Аммонийный азот варьировал от 0.02 до 0.05 мг N/л, нитритный — от аналитического 0 до 0.002 мг N/л. Содержание кремния колеблется в узких пределах (0.4–0.6 мг/л) и вполне удовлетворяет потребности озерного фитопланктона. Растворенное железо обнаружено в очень малых количествах (0.02–0.04 мг/л) с преобладанием закисной формы.

Насыщение водных масс растворенным в воде кислородом удовлетворительное и приближается к 100% (дефицит его составляет 3–7%).

Т а б л и ц а 20
Межгодовая динамика среднего содержания органических веществ и их

Год	Общее содержание ОВ, мг/л	Окисляемость, мг О ₂ /л		Цветность, град
		ПО	БО	
1975	9.2	6.8	11.7	21
1977	11.2	7.7	15.6	22
1979	12.0	6.4	15.2	23
1980	10.2	7.1	13.0	21
1981	12.2	7.4	15.2	22
1983	15.5	8.8	19.7	25
Средне много- летнее	11.7	7.4	15.1	22

косвенных показателей в воде южной части Онежского озера

	$C_{орг}$, мг/л	БПК ₅ , мг О ₂ /л	$\frac{ПО}{БО} \cdot 100$, %	$P_{орг}$, мг/л
	4.4	0.50	59	—
	5.7	0.81	54	0.014
	5.7	0.29	42	0.016
	4.9	0.75	55	0.012
	5.7	0.58	48	0.010
	7.4	0.87	45	0.017
	6.5	0.63	50	0.014

В июне 1980 г. на большей части акватории этого района в поверхностных слоях воды наблюдалось перенасыщение кислородом до 104%. В сентябре 1979 г. во всей водной массе южной части отмечалось низкое насыщение кислородом (67–75%) при пониженном абсолютном содержании (7.02–8.12 мг/л), что обусловлено интенсивным потреблением его на биохимические процессы и деструкцию большого количества автохтонного органического вещества, накопленного в теплое летнее время.

Концентрация растворенной двуокиси углерода колебалась от 1.3 до 1.8 мг/л, а в придонных водах ее накапливалось до 2.2. Величина pH менялась от 7.2 до 7.3, т. е. реакция среды была слабощелочная.

Взвешенных веществ содержалось от 0 до 2.5 мг/л, а в периоды весеннего половодья их количество повышалось до 12.4, что было обусловлено поверхностным стоком с водосбора и взмучиванием из донных отложений при частом и сильном волнении в мелководной зоне. В октябре 1980 г. в воде Свицкого Онега было определено 13.8 мг/л взвесей. На большей части акватории этого района преобладали взвеси органического характера, тогда как в приустьевых участках было больше минеральных.

4.2.5. Петрозаводская губа

Петрозаводская губа — один из крупных заливов юго-западной части Онежского озера, имеющих большое народнохозяйственное значение. В губу впадает, протекая через озеро Логмозеро, один из крупных притоков Онежского озера — р. Шуя со среднемноголетним расходом около 100 м³/с. Ее водосбор максимально освоен и подвержен влиянию целого ряда антропогенных факторов — это использование земель в сельском хозяйстве, создание животноводческих ферм, проведение мелиоративных работ на заболоченных массивах, увеличение объектов водопользования, рекреация и т. д.

Природные шуйские воды низкого качества и обогащают воду губы стойким окрашенным гумусом болот, почв, лесной подстилки, в результате чего повышаются величины цветности, окисляемости, БПК и ХПК ее воды, содержание таннидов, фенолов, гуминовых и фульвокислот. Речные воды несут в губу дополнительное количество железа, взвешенных веществ и компонентов антропогенной природы — нефтепродуктов, синтетических поверхностно-активных веществ (СПАВ), легкоокисляемого органического вещества, аммонийного и нитратного азота, фосфора и др. [168]. Поступающие в губу шуйские воды также незначительно снижают минерализацию и величину водородного показателя, тем самым ухудшая качество ее вод. Вторичный сток вносит сюда аммонийный и нитритный азот, фосфаты, легкоокисляемое органическое вещество, тем самым увеличивая величины БПК и ХПК, содержание биогенов, взвешенных веществ, фенолов, СПАВ, тяжелых металлов и т. д.

Озерные ультрапресные воды высокого качества и оказывают на воды губы благоприятное оздоравливающее влияние, обогащая их

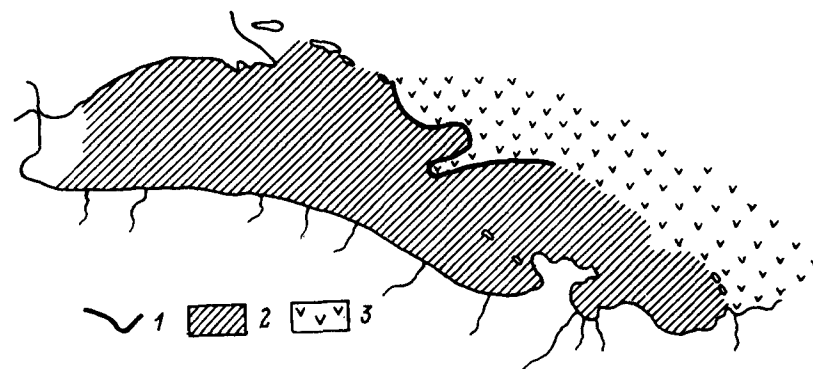


Рис. 37. Распределение величины цветности в поверхностных водах Петрозаводской губы и прилегающего к ней района озера 28.05.1981 г.

1 — фронт термобара. Цветность: 2 — 33–110°, 3 — 16–18°.

растворенным кислородом, минеральными солями, снижая антропогенную нагрузку и улучшая качество ее воды. Указанные водные массы различного происхождения влияют на формирование химического состава воды Петрозаводской губы. Речные воды наиболее сильно воздействуют в паводковые периоды, особенно весеннего половодья, когда идет сток с водосборной площади, озерные — в меженные, а антропогенный сток — круглогодично.

Формирующие воды и различные виды их комплексного использования порождают проблемы, связанные с изменением качества воды губы и разработкой водоохраных мероприятий с целью сохранения чистоты ее вод и их рационального использования.

Водные массы губы очень динамичны и отличаются в различных ее участках по своему качеству, которое определяется существующими здесь синоптическими и динамическими условиями [164]. В весенний период качество воды определяется термическим режимом водных масс. В результате разницы температур создается термический бар (рис. 37), который как бы „запирает“ воды внутри губы, препятствует их выходу в открытое озеро, способствует накоплению шуйских и подверженных антропогенному воздействию водных масс в котловине губы. Качество ее воды в этот период приближается к качеству шуйских вод.

Вода термоактивной зоны, т. е. губы, характеризуется следующими показателями: величина цветности составляет 50–120°, окисляемости — 8.1–25.3 мг О₂/л, БПК₅ — 0.48–1.75 мг О₂/л, содержание железа — 0.24–0.64, аммонийного азота — 0.1–0.3, нитритного — от следовых количеств до 0.009 мг N/л, взвешенных — 0.8–19 и дубильных веществ — 6–12 мг/л. Вода термоинертной зоны представлена трансформированными озерными массами и характеризуется более низкими величинами всех показателей ее химического состава (табл. 21).

С выходом фронта термического бара из Петрозаводской губы и удалением его в сторону открытого плеса озера вода ее, подверженная

Таблица 21

Общая характеристика органических веществ воды Петрозаводской губы в 1981 г.
(средние данные по участкам)

Часть губы	Цветность, град	Окисляемость, мг О/л		ПО • 100, %	C N	C P	Содержание ОВ, мг/л	БПК, мг О ₂ /л	
		ПО	БО					БПК ₅	БПК ₂₀
Центральная Внешняя	63	11.7	22.8	51	21	422	17.9	1.14	—
	46	9.9	19.1	52	17	394	15.1	1.12	2.25
Центральная Внешняя	34	10.5	18.8	56	13	853	14.9	0.44	1.03
	42	11.3	19.8	57	14	572	15.5	0.47	—
Центральная Внешняя	32	9.6	17.8	54	10	332	14.2	0.44	1.03
	27	8.6	16.8	51	12	357	13.3	0.47	—
Центральная Внешняя	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	21	7.9	13.9	57	14	332	11.0	—	3.62
Центральная Внешняя	43	10.6	19.8	54	15	536	15.7	0.84	1.39
	34	9.4	17.4	54	14	414	13.7	1.17	3.07
Среднее по всей губе	38	9.9	18.4	54	14	475	14.6	1.03	2.40

максимальному влиянию шуйских вод, выносятся из губы и движется вдоль городского побережья. При сопутствующих ветрах стоковое шуйское течение усиливается и в многоводные годы его влияние ощущается далеко за пределами губы, вплоть до Пухтинских островов. За счет поступления озерных вод качество водных масс губы улучшается, особенно вдоль северо-восточного берега, и они приближаются к озерным по своему химическому составу.

В летнюю межень в результате интенсивного прогресса водных масс наблюдается их термическое расслоение и устанавливается прямая стратификация с наличием термоклина на разной глубине. Это обуславливает вертикальную неоднородность химического состава водных масс. В результате изменения гидрологического режима в губу поступает значительное количество озерных вод, которые сосредотачиваются в придонных горизонтах по всей котловине губы. Они характеризуются более низкими показателями величин цветности (27–43°), окисляемости (5.5–8.1 мг О/л), БПК₅ (0.3–0.8 мг О₂/л), более минерализованы (Σ_n – 40–45 мг/л), богаче кислородом [121].

В связи с уменьшением расходов воды шуйский поток прижимается к городскому побережью, но его влияние прослеживается на значительном расстоянии от устья. Вода на этом участке отличается высокими величинами цветности и окисляемости, большим содержанием железа, таннидов, более низкими значениями рН, БПК₅, минерализации и т. д. Водные массы литоральной и глубоководной зон губы в этот период различаются по своему химическому составу (табл. 21, 22). В зависимости от направления господствующих ветров в губе возникают циклонические и антициклонические циркуляции водных масс, сопровождающиеся в первом случае улучшением качества воды, во втором – ухудшением в результате возврата трансформированных вод внутрь губы.

Период осенней гомотермии характеризуется наибольшим перемешиванием водных масс, в связи с чем воды губы теряют свою индивидуальность. В результате установившейся гомотермии происходит выравнивание всех гидрохимических характеристик по глубине и акватории губы. Центральная и литоральная ее части становятся малоотличимы по химическому составу воды (табл. 22). При этом концентрация показателей антропогенной природы снижается, но они распределяются равномерно по всей водной массе, в результате чего паводковые периоды являются наиболее неблагоприятными для качества воды губы.

В период ледостава, когда влияние ветра исключено и перемешивание вод в губе минимальное (в основном за счет плотностного и конвекционного), поток шуйских вод быстро гасится, растекается по дну, и они заполняют большую часть котловины губы. Глубокие слои характеризуются высокими показателями цветности, окисляемости, железа и т. д. Верхние горизонты представлены чистыми озерными водами с низким содержанием органических веществ, железа, кремния, более высокими минерализацией, рН, насыщением растворенным кислородом (табл. 21, 22), поэтому в данный период их вода обладает самым высоким качеством.

Таблица 22

Содержание биогенных элементов в воде Петрозаводской губы (1981 г., среднее по участку)

Часть губы	Фосфор, мг P/л		Азот, мг N/л				Fe, мг/л	Si, мг/л
	P _{мин}	P _{орг}	N _{орг}	NH ₄ ⁺	NO ₂ ⁻	NO ₃ ⁻		
Центральная Внешняя	0.003	0.022	0.43	0.06	0.001	0.08	0.29	0.5
	0.003	0.019	0.47	0.04	0.001	0.12	0.19	1.0
Центральная Внешняя	0.004	0.010	0.59	0.06	0.001	0.11	0.08	0.4
	0.013	0.029	0.57	0.08	0.002	0.12	0.13	0.4
Центральная Внешняя	0.002	0.023	0.69	0.05	Следы	0.15	0.20	0.2
	0.002	0.028	0.61	0.05	Нет	0.10	0.12	0.4
Центральная Внешняя	—	—	—	—	—	—	—	—
	0.010	0.017	0.40	0.04	Нет	0.27	0.07	0.4
Центральная Внешняя	0.003	0.018	0.57	0.06	0.001	0.11	0.19	0.4
	0.007	0.023	0.51	0.05	0.001	0.15	0.13	0.6
Среднее по всей губе	0.005	0.020	0.54	0.05	0.001	0.14	0.15	0.5

Весна

Лето

Осень

Зима

Среднее за год

Таким образом, сезонные исследования химического состава воды Петрозаводской губы показали, что активный водообмен с озером обеспечивает удовлетворительное насыщение водных масс кислородом, высокую степень разбавления и способность к самоочищению в теплое время года, однако это полностью не устраняет подавляющего влияния речного и вторичного стоков на качество воды губы. В результате этого из воды изымается большое количество кислорода, которое идет на процессы химического и биохимического окисления веществ природного и антропогенного происхождения. Так, в придонных водах на 27–30-метровой глубине в центральной части губы зимой 1978 г. был отмечен значительный дефицит кислорода (22–57%), а в результате антропогенного воздействия в придонных водах за Ивановскими островами зимой 1981 г. было обнаружено скопление большого количества (43 мкг/л) фосфатов. Эти факты свидетельствуют о наличии процесса антропогенного эвтрофирования Петрозаводской губы и прилегающих к ней районов озера.

Результаты многолетних наблюдений за химическим составом воды Петрозаводской губы позволяют сделать вывод о том, что наметилась определенная тенденция в изменении качества воды, выразившаяся в возрастании величин БПК и ХПК, содержания аммонийного и нитратного азота, общего фосфора, фенолов, взвешенных веществ, нефтепродуктов. Однако с ликвидацией локальных выпусков, вводом в эксплуатацию очистных канализационных сооружений, а также проведением ряда других важных водоохраных мероприятий [164] за последнее время улучшился кислородный режим, снизилось содержание аммонийного азота, летучих фенолов. В то же время в связи с ростом антропогенной нагрузки на водоем увеличилось содержание взвешенных веществ, нефтепродуктов, величина БПК₅.

Петрозаводское Онего. Водные массы Петрозаводской губы в результате водообмена с водами Центрального плеса озера оказывают влияние на качество воды прилегающего к ней района Петрозаводского Онего [167]. В период весеннего половодья, особенно в многоводные годы, литоральные воды этого района подвержены влиянию шуйских вод и местного речного стока [168], а глубоководная зона — воздействию онежских озерных (табл. 23, 24). В весенний период здесь, как и в Петрозаводской губе, возникает термический бар, который препятствует смешению прибрежных и глубоководных вод. Качество воды литорали и пелагиали этого района в период существования термобара значительно различается, особенно по содержанию органических веществ и их косвенных показателей (см. рис. 38).

Аллохтонное органическое вещество, вносимое речным стоком с заболоченного водосбора, интенсивно окрашено, стойко к биохимическому окислению, гумусовой природы, что подтверждается высокой величиной отношения перманганатной окисляемости к бихроматной, а также органического углерода к органическим фосфору и азоту (табл. 23, 24). В этот период в литоральных водах величина цветности в 2–3, окисляемости в 1.5, таннидов — в 2, СПАВ — в 4, а взвешенных веществ в 10 раз больше, чем в глубоководной зоне [145].

Таблица 23

Общая характеристика органических веществ воды Петрозаводского Онего (1981 г., среднее по району)

Зона	Цветность, град	Окисляемость, мг О/л		ПО · 100, % БО	Сорг Nорг	Сорг Рорг	Содержание ОВ, мг/л	БПК ₅ мг О ₂ /л		
		ПО	БО					БПК ₅	БПК ₂₀	
Литоральная часть Глубоководная зона	50	9.5	19.0	50	14	346	16.5	1.18	—	
	24	6.8	15.3	44	13	580	12.0	1.52	—	
Литоральная часть Глубоководная зона	29	8.5	17.9	47	18	601	14.2	1.01	—	
	29	7.9	17.6	45	17	864	13.9	0.95	1.68	
Литоральная часть Глубоководная зона	21	8.1	15.8	51	11	410	12.4	0.44	—	
	21	7.4	13.8	54	11	513	10.9	0.34	—	
Литоральная часть Глубоководная зона	20	7.4	13.3	56	13	444	10.4	1.45	3.42	
	17	6.9	13.4	51	14	414	10.6	1.65	2.60	
Литоральная часть Глубоководная зона	Среднее за год									
	30	8.4	16.5	51	14	450	13.4	1.02	—	
	23	7.2	15.0	48	14	593	11.8	1.11	—	
Среднее по всему Петро- заводскому Онего	26	7.8	15.8	49	14	522	12.6	1.07	—	

Таблица 24

Содержание биогенных элементов в воде Петрозаводского Онего (1981 г., среднее по участку)

Зона губы	Фосфор минераль- ный, мг P/л	Азот, мг N/л			Fe _{общ} , мг/л	Si, мг/л
		NH ₄ ⁺	NO ₂ ⁻	NO ₃ ⁻		
Литоральная Глубоководная	0.002	0.04	Нет	0.27	0.02	0.5
	0.002	0.04	„	0.26	0.23	0.4
Литоральная Глубоководная	0.002	0.06	0.001	0.09	0.04	0.2
	0.002	0.06	0.001	0.08	0.07	0.2
Литоральная Глубоководная	0.002	0.05	Нет	0.13	0.09	0.3
	0.002	0.04	„	0.15	0.05	0.2
Литоральная Глубоководная	0.002	0.04	Нет	0.27	0.02	0.5
	0.002	0.04	„	0.26	0.03	0.4
Литоральная Глубоководная	0.002	0.05	Нет	0.19	0.04	0.4
	0.002	0.04	„	0.19	0.04	0.3
Среднее по всему Петро- заводскому Онего	0.002	0.05	„	0.19	0.04	0.3

Эти водные массы хуже насыщены кислородом, содержат больше растворенной двуокиси углерода, т. е. приближаются по качеству к речным водам.

В многоводные годы, как например, 1981-й, когда сток р. Шуи был вдвое больше, чем в предыдущие, эта разница в химическом составе литоральных и глубоководных водных масс более значительная. В экстремально многоводные годы высокогумифицированный шуйский поток воздействует на качество не только литоральной (включая Деревяную и Уйскую губы), но и глубоководной зоны. Малые реки – Ужесельга, Нелукса, Орзega, Деревянка, Уечка, Уя – не оказывают существенного влияния вследствие малых расходов воды.

Прибрежные воды богаче биогенными элементами, особенно нитратами, железом, кремнием. Из форм азота и фосфора преобладает органическая. Аммонийного азота несколько меньше, чем в озерных водах, что свидетельствует о преобладании в этом районе процессов нитрификации. Минерального фосфора так же мало, как и в озерных водах, и его содержание не отличается по акватории и глубине. Наличие в воде литоральной зоны большого количества (до 3.5 мг/л) растворенной двуокиси углерода и гуминовых веществ обусловило низкое значение рН (6.6–6.8) воды. По величине общей минерализации (35–39 мг/л) литоральные воды близки к речным и относятся к гидрокарбонатному классу, группе кальция. Самая низкая минерализация в этот период отмечена в приустьевом участке р. Нелуксы, что связано с разбавлением талыми снеговыми водами, поступающими с речным и склоновым стоком. Вода литоральной зоны в весенний период низкого качества в результате подавляющего влияния речного и антропогенного стоков.

Качество глубоководных вод, расположенных в термоинертной зоне с температурой воды 4.5 °С, было значительно лучше. Они имели низкие величины цветности, перманганатной и бихроматной окисляемости, БПК₅, более узкое отношение $C_{орг} : N_{орг}$ и широкое $C_{орг} : P_{орг}$, низкое отношение цветности к перманганатной окисляемости (3.1), нейтральную реакцию воды (см. табл. 23, 24). Все эти косвенные характеристики свидетельствуют об автохтонной природе органического вещества. Воды глубоководной зоны бедны биогенными элементами, особенно органическими формами азота и фосфора, что указывает на слабую интенсивность продукционных процессов в этом холодноводном районе озера. Насыщение водных масс растворенным кислородом высокое (92–98%), что характерно для Центрального плеса озера и глубоководных районов его крупных заливов. Общая минерализация и соотношение главных ионов такие же, как и в воде основного плеса озера.

В период летней межени основным фактором, определяющим качество воды, являются динамические процессы, особенно ветровые течения и апвеллинг. Основным источником формирования качества воды в этот период служат озерные воды, местный же речной сток оказывает локальное влияние. Поэтому резкая разница в химическом составе водных масс литоральной и глубоководной зон сглаживается (см табл. 23, 24). В 1981 г. они содержали мало органических веществ,

железа и кремния, имели низкую величину БПК₅, среднее отношение $C_{орг} : N_{орг}$. В минерализации органических веществ преобладали процессы нитрификации. В некоторых участках количество нитратов снизилось до 0.04–0.06 мг N/л в результате потребления их фитопланктоном. В вертикальном распределении большинства показателей наблюдалась прямая стратификация согласно распределению температуры.

В период существования апвеллинга, способствующего подъему холодных глубоководных озерных вод центрального водного тела и перемещению их в литораль, а теплых поверхностных литоральных – в центр озера, обнаруживается аномальное распределение химических ингредиентов в литорали и пелагиали озера. Так, в результате длительного воздействия ветров южного и юго-западного направлений наблюдалось перемещение теплых прибрежных вод в глубоководную зону основного плеса, а холодных озерных – в мелководную прибрежную зону, т. е. создалась ситуация, обратная весенней: прибрежные воды были холоднее и беднее органическим веществом и биогенными элементами, а поверхностные глубоководные зоны – теплее и богаче органическими, биогенными и взвешенными веществами. Апвеллинг благоприятно воздействует на качество литоральных водных масс.

В некоторые периоды исследований в глубоководной зоне ветровому перемешиванию были подвержены водные массы верхнего 20-метрового столба. Более глубокие слои воды не были затронуты и представлены чистыми озерными водами с характерными для них гидрохимическими характеристиками.

Период осеннего перемешивания и выравнивания поля температуры сопровождается равномерным по глубине и акватории района распределением химических ингредиентов, в количественном отношении близких к таковым трансформированных онежских вод.

Реки, впадающие в озеро в этом районе, хотя и несут большое количество органических веществ, стойких к биохимическому окислению, но не оказывают существенного влияния на качество литоральных водных масс. Однако в приустьевых участках Орзegi и Деревянки обнаружено больше таннидов и взвешенных веществ, что обусловлено локальным влиянием этих рек. В сентябре вода этого района в 1.5–2 раза богаче нитратами, чем летом, за счет деструкции органических веществ, накопленных за летний период. Увеличивается и содержание органических форм азота и фосфора. Насыщение водных масс кислородом довольно высокое (91–93%) и равномерное по всем горизонтам, лишь на больших глубинах встречается его дефицит (21–22%) в результате потребления на деструкцию органических веществ, накопленных за лето и осаждающихся в придонные горизонты. Реакция среды нейтральная. Величина суммы ионов (42–43 мг/л) близка к летним показателям.

В период ледостава водные массы Петрозаводского Онего представлены озерными, о чем свидетельствуют близкие количественные характеристики качества воды литорали и пелагиали (см. табл. 23, 24). В это время вода была самого высокого качества и имела самые низкие

за весь период исследований величины цветности (в прибрежье — 20–21, в глубоководной зоне — 15–18°), перманганатной окисляемости (6.5–7.5 мг О/л), содержания железа (0.2–0.3), кремния (0.3–0.5 мг/л), минерального фосфора (2 мкг/л) и т. д. Подо льдом было отмечено самое большое количество нитратов, накопленных за счет минерализации органических веществ автохтонного и аллохтонного происхождения, в том числе азот- и фосфорсодержащих. Нитриты отсутствовали, взвешенные вещества были обнаружены только в воде Уйской и Пухтинской губ (0.4 мг/л). Насыщение воды растворенным кислородом самое высокое (96%) в течение всего года (при абсолютном значении 13–14 мг/л) и во всей толще водной массы, с ничтожной разницей по горизонтам (0.1–0.3 мг/л), что характерно для всех олиготрофных водоемов. В распределении двуокиси углерода отмечена обратная стратификация. Активная реакция среды близка к нейтральной или слабощелочная. Общая минерализация и соотношение главных ионов аналогичны таковым озерных вод основного плеса.

Все приведенные данные свидетельствуют о том, что в зимний период район Петрозаводского Онего заполнен озерными водами высокого качества. Однако следует отметить, что на 25-метровой глубине обнаружено большое содержание фосфатного фосфора (43 мкг/л), что указывает на влияние городского коллектора.

Таким образом, глубоководная зона Петрозаводского Онего большую часть года заполнена озерными водами хорошего качества. Качество литоральных вод более низкое, что определяется местным речным стоком и шуйским течением. Степень влияния шуйских вод зависит от объема и дальности их распространения, связанных с водностью года. В паводковые периоды это влияние более ощутимо, чем в меженные. Оно усугубляется антропогенным воздействием города и водосбора р. Шуи. Алвеллинги, возникающие под воздействием длительных ветров определенного направления, оказывают благоприятное влияние на качество воды в летнее время. Однако нельзя не отметить тенденции к его ухудшению в этом районе под влиянием антропогенных факторов.

4.2.7. Кондопожская губа

Химический состав воды Кондопожской губы формируют природные озерные воды участков Онежского озера, прилегающих к губе, поверхностный сток р. Суны и озер ее бассейна, атмосферные осадки и антропогенный сток города и целлюлозно-бумажного комбината [169]. Данные, представленные в табл. 25, показывают, что роль атмосферных осадков в формировании химического состава воды этого крупного глубоководного залива несущественна [135, 171]. Основное воздействие оказывают сунские речные воды и антропогенный сток. Влияние первых благоприятно и зависит от сезона и водности года. Речной и склоновый стоки влияют на качество воды губы локально, что ярче всего проявляется в период весеннего половодья, когда расходы его наибольшие. Антропогенный фактор во все сезоны

года очень отрицательно воздействует на гидрохимический режим Кондопожской губы. Озерные воды ввиду активного водообмена губы с озером интенсивно разбавляют ее воду, повышая самоочищающую способность водных масс и снижая отрицательное влияние антропогенных факторов.

Кроме этих, чисто химических факторов, на качество воды губы оказывают влияние метеорологические и гидродинамические условия, особенно в период открытой водной поверхности, а также ее морфология, рельеф дна и продукционно-деструкционные процессы на разных трофических уровнях. Одновременное воздействие всех данных факторов во многом определяет гидрохимический режим Кондопожской губы: в связи с этим изменился химический состав ее природных вод, появились специфические вещества в концентрациях, не свойственных ее природной воде, а также токсичные, являющиеся продуктами разложения органических веществ и варки целлюлозы.

Водные массы губы в какой-то мере справляются с минеральными, взвешенными, биогенными и лабильными органическими веществами, но полностью не самоочищаются от стойких органических веществ, таких как лигносульфонаты, таниды, нефтепродукты и других, постоянно присутствующих в воде. Об этом свидетельствуют также высокие величины перманганатной окисляемости, отношения $\frac{ПО}{БО} \cdot 100$, $S_{орг} : N_{орг}$ (табл. 26). Из токсичных веществ минерального характера можно отметить сульфиды, сульфиты, тиосульфаты, являющиеся продуктами сульфитной варки целлюлозы и анаэробного разложения органических веществ.

В период открытой водной поверхности трансформированные водные массы сосредотачиваются на верхних горизонтах и при сопутствующих ветрах перемещаются вдоль губы в сторону открытого плеса озера.

Во время весеннего половодья на фоне антропогенного фактора проявляется влияние речного, ливневого и склонового стоков и процессов десорбции из донных отложений. На химический состав воды губы большое воздействие оказывают также термические и динамические условия. С началом весеннего прогревания водных масс создается разница температуры по глубине и акватории губы, определяющая появление термического бара. Весенний термический бар способствует локализации водных масс внутри губы, препятствуя их выходу в Центральный плес и перемешиванию с озерными водами, что сопровождается ухудшением качества ее воды. В то же время господствующие ветры западного и северо-западного направлений перемещают антропогенный сток в сторону восточного берега и Центрального плеса, обуславливая постепенное снижение концентрации веществ природного и антропогенного происхождения в этом направлении (см. табл. 26).

В вершинной части губы, куда поступает антропогенный сток, обнаружены самые высокие содержания аммонийного азота, железа, кремния, солей калия и натрия, сернистых соединений, отдельных

Т а б л и ц а 25
Поступление некоторых веществ (т)
и речным стоком в Кондопожскую

Источник поступления	Общее содержание ОВ	Танниды	Кремний	Азот	
				аммонийный	нитритный
Атмосферные осадки	57.0	14.0	4.3	1.7	0.08
Речной сток	43665	3808	—	196	0
Всего	43722	3822	—	197.7	0.08

Т а б л и ц а 26
Средние показатели компонентов химического состава воды (мг/л)

Район	Окисляемость, мг О/л		БПК ₅	БПК ₂₀	Кислород	
	ПО	БО	мг О ₂ /л	мг О ₂ /л	мг О ₂ /л	%
В е с н а						
Вершинный	16.5	33.3	1.77	3.52	9.7	81
Центральный	12.9	22.0	1.42	2.51	11.0	87
Взаимодействия губы с озером	7.9	18.2	1.17	2.46	12.7	98
Среднее за сезон	12.4	24.5	1.45	2.86	11.1	85
О с е н ь						
Вершинный	24.9	49.0	1.73	2.48	4.5	38
Центральный	12.2	28.1	1.58	1.78	9.4	80
Взаимодействия губы с озером	9.2	21.8	0.41	1.49	10.3	89
Среднее за сезон	20.3	32.7	1.20	2.00	7.8	73
Л е т о						
Вершинный	40.0	58.3	1.60	2.41	3.6	35
Центральный	12.0	22.9	1.10	1.90	9.1	87
Взаимодействия губы с озером	8.8	16.8	1.00	1.71	10.5	98
Среднее за сезон	20.3	32.7	1.20	2.00	7.8	73
З и м а						
Поверхностный горизонт	11.0	20.9	1.70	3.51	11.0	75
Придонный горизонт	23.8	39.4	4.90	10.07	7.3	54
Среднее за сезон	17.4	30.2	3.30	6.79	9.2	65

с атмосферными осадками
губы Онежского озера

	нитратный	общий	Фосфор	Взвешенные вещества	Σп
			общий		
	3.0	9.5	0.3	86.7	217.6
	236.4	1673	27.9	2792	—
	239.4	1682.5	28.2	2878.7	—

отдельных районов Кондопожской губы (1982–1984 гг.)

СО ₂	Азот, мг N/л		Р _{общ} , мг P/л	Ca ²⁺	Na ⁺
	аммонийный	нитратный			
4.4	0.17	0.07	0.022	4.3	2.1
3.6	0.12	0.10	0.014	4.6	2.2
1.9	0.07	0.13	0.017	4.9	2.1
3.3	0.12	0.10	0.018	4.6	2.1
10.4	0.12	0.03	0.038	4.8	2.6
2.6	0.06	0.08	0.019	5.3	2.2
2.3	0.05	0.10	0.016	5.4	1.9
5.4	0.14	0.07	0.021	4.5	2.5
10.6	0.29	0.06	0.032	4.3	3.3
3.5	0.08	0.06	0.017	4.3	2.1
2.0	0.06	0.08	0.015	4.9	2.1
5.4	0.14	0.07	0.021	4.5	2.5
3.3	0.06	0.10	0.017	4.8	1.6
8.6	0.10	0.07	0.024	5.2	2.2
6.0	0.08	0.09	0.021	5.0	1.9

Таблица 26

Район	SO ₄ ²⁻	Σп	Сульфиды	Сульфиты	Тиосульфаты	Лигносульфонаты
Весна						
Вершинный	9.9	31.5	1.08	13.33	0.69	0.54
Центральный	9.9	40.4	1.23	15.98	0.63	0.43
Взаимодействия губы с озером	9.4	41.5	—	—	—	0.22
Среднее за сезон	9.7	37.8	1.15	14.64	0.66	0.40
Осень						
Вершинный	12.2	39.4	0.18	0.59	4.00	0.88
Центральный	10.2	41.9	—	—	—	0.41
Взаимодействия губы с озером	9.7	40.9	0.06	0	0.37	0.29
Среднее за сезон	12.3	41.7	1.90	0.77	0.52	0.53
Лето						
Вершинный	17.1	43.8	4.01	1.31	1.19	0.85
Центральный	10.2	40.1	0.37	0.39	0.38	0.39
Взаимодействия губы с озером	9.5	41.2	1.20	0.60	0	0.34
Среднее за сезон	12.3	41.7	1.9	0.77	0.52	0.53
Зима						
Поверхностный горизонт	9.1	38.1	0.43	2.37	3.05	0.25
Придонный горизонт	10.5	41.0	2.10	1.87	4.82	0.56
Среднее за сезон	9.8	39.6	1.22	2.12	3.94	0.41

групп органических, а также взвешенных и минеральных веществ. Поступление в повышенных концентрациях легкогидролизуемого органического вещества сопровождается изъятием из воды большого количества кислорода и приводит к его острому дефициту (24–40%). Отсутствие или наличие следовых количеств нитритного или нитратного азота свидетельствует об ослаблении в этой части губы процессов нитрификации, преобладании аммонификации и слабой деструкции органических веществ.

В то же время поступающие через Кондопожский канал сунские речные воды способны некоторому разбавлению и самоочищению этих измененных водных масс губы. Подхваченные сунским стоковым течением, последние перемещаются вдоль губы, прижимаясь к юго-западному берегу, что подтверждается более высокими концентрациями в них вышеперечисленных веществ и заниженными – нитратов,

(продолжение)

Фенолы	Нефтепродукты	Дубильные вещества	Взвешенные вещества	СПАВ
0.006	0.4	7.5	2.1	0.29
0.009	0.3	5.5	1.6	0.03
0.003	0.4	0.7	0.6	0
0.006	0.4	4.6	1.4	0.11
0.002	4.3	15.2	2.6	0.18
0.002	5.6	10.2	0.8	0.39
0.001	0.4	4.0	0.2	0.14
0.002	3.4	9.8	1.2	0.24
0.004	1.2	11.1	2.8	2.02
0.002	1.0	7.5	0.7	0.23
0.003	0.2	3.2	0.6	0.02
0.003	0.8	7.3	1.4	0.76
0.005	0.3	2.6	0.9	0.17
0.006	0.3	4.6	3.8	0.87
0.006	0.3	3.6	2.4	0.52

растворенного кислорода, величинами рН. Трансформированные кондопожские воды с более низким содержанием органических, биогенных и минеральных веществ распределяются по всей акватории губы, преимущественно в верхнем 10–15-метровом слое. Средние показатели общего содержания органического вещества и его косвенных характеристик, а также биогенных элементов воды центральной глубоководной части губы, представленные в табл. 26, в 1.5 раза ниже, чем в вершинной, за счет процессов химического и биохимического окисления, разбавления и осаждения. Общее количество минеральных солей и отдельных ионов, наоборот, выше за счет поступления озерных водных масс с большей величиной суммы ионов.

В период полного конвективного и ветрового перемешивания вещества антропогенной природы поднимаются из придонных горизонтов, где они накапливаются зимой, и распределяются по всей водной

массе в сравнительно высоких концентрациях. В этом районе по своему химическому составу выделяются водные массы Сунской губы, где обнаружены повышенные содержания дубильных взвешенных, лабильных органических веществ, летучих фенолов, нефтепродуктов, железа и кремния за счет речного стока Суны. Однако это влияние носит локальный характер и сглаживается за счет активного водообмена с Кондопожской губой.

Водные массы в районе взаимодействия губы с Центральным плесом озера по содержанию основных химических компонентов приближаются к онежским; но не идентичны им, что свидетельствует об изменении качества этих вод (см. табл. 26) под влиянием антропогенных факторов. Весной вода Кондопожской губы обладает самым низким качеством за счет дополнительного поступления в нее накопленных за зиму трансформированных стоков на придонных горизонтах. Самоочищение от них происходит слабо, что обусловлено низкой микробиальной активностью в непрогретой водной массе.

В период летней межени в результате активизации процессов самоочищения при повышенных температурах и более интенсивного разбавления озерными водами качество воды губы улучшается. В распределении водных масс с различными гидрохимическими характеристиками по акватории губы наблюдалась та же закономерность, что и в период начинающегося весеннего прогрева. Однако разница между участками более контрастная, хотя наиболее измененной остается вода в вершинной части губы. Если сравнивать качество поверхностных вод, которые подвержены наибольшему изменению под влиянием антропогенного воздействия в летний период, на современном этапе (1982 г.) и около 10 лет назад (1970 г.), то становится очевидным весьма существенное ее изменение (табл. 27): во-первых, антропогенному влиянию подвержена уже вся акватория губы, вплоть до выхода в открытое озеро, и, во-вторых, степень этого воздействия в разных районах губы различна.

В районе максимального антропогенного воздействия в вершинной части губы по сравнению с 1970 г. на 17% увеличилось количество трудноокисляемых органических веществ техногенного происхождения, на 8% — таннидов, на 18% — двуокиси углерода, на 12% — растворенных минеральных веществ, на 10% — взвешенных из-за увеличения антропогенного стока (на 12%), неэффективности очистки биологическим путем стойких к биохимическому окислению органических веществ техногенной природы и некондиционности биологических очистных сооружений, которые в момент исследований находились в стадии пусконаладочных работ. Содержание нефтепродуктов, наоборот, понизилось вдвое за счет их улавливания, извлечения и регенерации. Количество аммонийного азота осталось на прежнем уровне, в следовых количествах появились нитриты, которых в 1970 г. не было. Концентрация сульфидов сократилась в 4.5 раза. Абсолютное и относительное содержание растворенного в воде кислорода уменьшилось вдвое. В центральной глубоководной части губы стало меньше органических веществ, в том числе нефтепродуктов, снизились величины БПК₅ и общей

минерализации, в том числе ионов кальция, сульфидов, сульфитов и тиосульфатов. Содержание аммонийного азота, сульфатов и взвешенных веществ осталось на прежнем уровне.

В районе взаимодействия водных масс Кондопожской губы с онежскими в результате благоприятного разбавляющего влияния последних повысилось насыщение воды кислородом, снизилось содержание таннидов, появились в больших количествах нитраты.

Таким образом, на большей части акватории губы уменьшилось содержание веществ антропогенного происхождения, но антропогенное воздействие распространилось на всю губу до самого выхода в открытое озеро и даже на водные массы прилегающего к губе района Центрального плеса.

Осенью в результате выхолаживания водоема устанавливается гомотермия, сопровождающаяся гомогенным распределением всех компонентов химического состава по глубине. За счет этого снижается их концентрация в водной массе, но зато они распределяются по всей вертикали и снижают качество воды. Отрицательным моментом этого периода является то, что процессы биохимического окисления, а следовательно, и самоочищения ослабевают из-за низких осенних температур, что подтверждается относительно высокими концентрациями перманганатной и бихроматной окисляемости, таннидов, нефтепродуктов, лигносульфонатов и др. Насыщение воды кислородом значительно ниже, чем летом: его дефицит в районе взаимодействия губы с озером составлял 8–10%, в ее центральной — 11–16 и вершинной части — 32–51%. Однако качество воды в этот период несколько выше, чем весной.

Отличительной особенностью подледного периода является резкая разница между концентрациями показателей химического состава поверхностных и придонных водных масс. Верхний слой воды центральной глубоководной части губы заполнен трансформированными онежскими водами с соответствующими им гидрохимическими характеристиками и обладающими хорошим качеством. Придонные водные массы с высокими величинами гидрохимических характеристик накапливались в глубоководных впадинах по обе стороны островов Нигриш и Ламп, между западным берегом и о-вом Соколым. Для придонных вод этих впадин характерны высокие величины перманганатной (37.9–48.1) и бихроматной (52.3–83.3 мг О/л) окисляемости, БПК₅ (4.2–8.4 мг О₂/л), железа (0.3–1.9 мг/л), аммонийного азота (0.12–0.28 мг N/л) и низкие (0–0.09) нитратного, что свидетельствует о преобладании аммонификации над нитрификацией. Также обнаружено накопление сернистых соединений, отдельных групп органических веществ и т. д.

Почти весь кислород из воды изъят, и наблюдается его острый дефицит (81–93%) или даже полное отсутствие. В последнем случае все процессы происходят в анаэробных условиях, в результате чего в воде накапливаются большие количества сероводорода и сульфидов, а также сульфитов, тиосульфатов и сульфатов, фосфатного фосфора, железа и стойких к биохимическому окислению органических веществ.

Таблица 27

Среднее содержание компонентов химического
Кондопожской губы

Год исследования	Окисляемость, мг О/л		БПК ₅ , мг О ₂ /л	Кислород		СО ₂	Азот, мг N/л	
	ПО	БО		мг/л	%		аммонийный	нитратный
Вершинный								
1970	52.2	92.9	3.1	4.1	33	12.0	0.50	0.00
1982	63.1	88.4	1.4	1.4	14	14.6	0.48	0.06
Средний								
1970	17.2	30.9	2.0	8.4	72	6.2	0.11	0.02
1982	16.9	28.1	1.8	5.9	56	6.6	0.10	0.05
Глубоководный								
1970	14.8	25.3	1.8	9.9	86	4.3	0.07	0.01
1982	12.0	22.9	1.1	0.1	87	3.5	0.08	0.06
Прилегающий								
1970	6.3	25.0	1.0	10.0	93	2.7	0.05	0.02
1982	8.8	16.8	1.0	10.5	98	2.0	0.06	0.08

Вода этого района имеет самую низкую величину рН (6.2). Придонные воды остальной части губы также содержат значительно больше перечисленных веществ, чем вышележащие, и испытывают значительный дефицит кислорода (7–23%). В этот период процессы биохимического окисления замедлены из-за низких температур, минерализация органических веществ идет слабо. Создается большой запас стойких органических веществ, являющийся в период весеннего половодья их источником и причиной ухудшения качества воды.

Анализ сезонной динамики химического состава воды Кондопожской губы показал, что основной причиной его изменения во все сезоны года является антропогенный сток. За последние годы комбинатом проведен ряд водоохраных мероприятий, важным звеном которых является ввод в эксплуатацию биологических очистных сооружений, которые в момент исследований находились на стадии пусконаладочных работ и не смогли оказать должного положительного эффекта на качество воды губы. Благодаря проведению других мероприятий концентрация ряда показателей антропогенного воздействия (нефтепродуктов, фенолов, сернистых и взвешенных веществ) несколько снизилась. Однако в связи с увеличением сброса стойких органических веществ возросла величина перманганатной окисляемости, количество таннидов, лигносульфонатов, уменьшилось содержание растворенного в воде кислорода.

состава воды (мг/л) отдельных участков
летом 1970 и 1982 гг.

Р _{общ} , мг P/л	Взвешенные вещества	Танниды	СПАВ	Кальций	Сульфаты	Σ _п	Фенолы
–	3.8	11.0	–	5.0	16.7	45.6	–
0.035	4.2	13.0	2.79	5.1	22.7	51.5	0.005
–	1.2	3.4	–	4.5	10.3	43.9	–
0.028	1.3	9.2	1.24	3.5	11.4	36.0	0.002
центральный							
–	0.5	9.2	–	4.5	8.8	39.4	–
0.017	0.7	7.5	0.23	4.3	10.2	40.1	0.002
к озеру							
–	0.3	8.0	–	4.5	8.2	37.9	–
0.015	0.6	3.2	0.02	4.9	9.5	41.2	0.003

Это привело к изменению качества всей водной массы губы и прогрессированию процесса антропогенного эвтрофирования, захватившего и водные массы прилегающих к губе районов Центрального Онего.

Заклучение

Онежское озеро – крупный водоем олиготрофного типа с очень сложной морфометрией, динамикой водных масс различного происхождения, неравномерным распределением речного стока и разной степенью влияния антропогенных факторов. Все это обусловило неоднородность химического состава воды отдельных его районов. Вода Центрального плеса озера и глубоководных районов Повенецкого залива, Большого и Малого Онего, Уницкой и Лижемской губ, с малым речным стоком и не испытывающих сильного антропогенного воздействия, высокого качества, сходна по химическому составу. Она характеризуется высокой прозрачностью, малоокрашена в результате низкого содержания органических веществ гумусового происхождения, бедна биогенными элементами, имеет низкую минерализацию, хорошо насыщена кислородом, принадлежит к олиготрофному классу.

Крупные губы и заливы испытывают значительное влияние притоков, несущих воду, богатую органическими веществами гумусового происхождения, железом, кремнием, таннидами, фенолами и другими

веществами, а также испытывающих большую антропогенную нагрузку. Максимальные концентрации веществ природного и антропогенного происхождения сосредоточены в литоральных водах, примыкающих к местам расположения крупных промузлов, городов и населенных пунктов, а также в приустьевых участках рек. Максимальную антропогенную нагрузку испытывают Петрозаводская и Кондопожская губы, прибрежные воды Большой губы Повенецкого залива и его отдельных малых губ – Пиндушской, Пергубы, Кумсагубы, Лумбуши, Повенецкой, а также южная часть Онежского озера в районе Волго-Балтийского канала и Свирской губы.

Наибольшее содержание нефтепродуктов наблюдалось в местах прохождения основных судоходных трасс, так как озеро является важной транспортной магистралью Карелии. Под влиянием антропогенных факторов происходит нарушение естественного гидрохимического режима, изменение химического состава природных вод этих районов, проявляющееся в диспропорции его количественных соотношений и появлении различных специфических веществ, не свойственных природным водам, нарушении кислородного режима и оборачиваемости минеральных форм азота и фосфора. Вода этих участков перешла в другой класс трофности – мезотрофный, а некоторых мелководных – и в эвтрофный. Процесс антропогенного эвтрофирования затронул не только указанные районы, но и водные массы участков Центрального плеса, прилегающих к ним.

5. ДОННЫЕ ОТЛОЖЕНИЯ

Одним из показателей экологической специфики Онежского озера является содержание химических ингредиентов в его донных отложениях [56, 66, 189]. Наиболее подробная характеристика осадков, их гранулометрического состава, стратиграфии и физико-химических свойств даны в работах Н. И. Семеновича [204] и А. А. Курочкиной [87]. В разные годы, но почти с одинаковой полнотой автор раздела [35–38] изучала современный химический состав донных отложений и его формирование в крупных заливах и открытой части Онежского озера.

5.1. Общая характеристика и гранулометрический состав

По данным Н. И. Семеновича [204], на Онежском озере можно выделить 6 основных типов осадков: 1) камни, галька и гравий; 2) песок; 3) крупноалевритовый ил; 4) мелкоалевритовый ил; 5) глинистый ил; 6) глина. Валунно-галечные отложения залегают обычно неширокой полосой у уреза воды и встречаются отдельными участками на всем протяжении береговой линии, однако максимума достигают в северной части озера, в области кристаллического щита. Большие их скопления наблюдаются у западного берега, между Кондопожской и Петрозаводской губами, ближе к Большому Клименецкому острову, а у восточного берега – в районе о-ва Мудр и на стыке Заонежского и Повенецкого заливов.

Пески также встречаются почти на всем протяжении береговой линии, однако наибольшее распространение имеют в центральной и южной частях озера. В Центральном Онего пески распространены в основном в прибрежной части восточного берега. При их преобладании на отдельных участках дна Южного Онего встречаются каменистые луды и крупно- и мелкоалевритовые илы. Вся обширная глубоководная область Центрального и Большого Онего с примыкающими к нему губами покрыта тонкими глинистыми илами. На различных участках дна имеются выходы мягких глин, подстилающих современные осадки. Илы имеют разную консистенцию (жидкую, полужидкую, мягкую, комковатую).

Окраска донных отложений варьирует от охристой, желто-коричневой, коричневой до зеленовато-бурой и от зеленовато-серой до серой.

Пески по преимуществу желтого цвета, но в некоторых районах приобретают охристо-коричневую и бурую окраску.

Гранулометрический состав донных отложений различен [184, 204]. Тонкоструктурные илы с содержанием пелитовой фракции более 70% занимают значительные площади дна Центрального и Большого Онего и в меньшей степени распространены в прилегающих к последнему губах. Средние диаметры частиц этих осадков выражаются величинами $Md < 0.005$ мм. В осадках Онежского озера встречаются гранулометрические структуры, которые характеризуются одновершинными, двухвершинными и многовершинными профилями.

В южной части озера, примерно до линии Ропручей–устья р. Андомы, наблюдается абсолютное преобладание осадков с одновершинными гистограммами [204]. В Центральном Онего вдоль западного берега наиболее сортированные осадки с одновершинными гранулометрическими структурами встречаются в заливах и излучинах береговой линии, что объясняется отложением здесь продуктов размыва и абразии берегов, приносимых прибрежными течениями. Осадки с такими же графиками наблюдаются в прибрежной полосе у западного берега, что связано не только с влиянием динамического фактора, но и с составом поступающего терригенного материала, образующегося при сортировке и дифференциации различных фракций гетерогенных наземных отложений в воде.

Вдоль западного берега также отмечены отложения с низким многовершинным гранулометрическим профилем и с широким диапазоном фракций. Около восточного берега Центрального Онего от устья р. Андомы до устья р. Водлы повсеместно господствуют осадки с одновершинными графиками и преобладанием одной фракции, что определяется составом береговых наносов. Для осадков открытой части Центрального Онего, являющейся областью спокойной седиментации, доминирующими профилями графиков являются двухвершинные, с превалированием мелкопелитовой и мелкоалевритовой фракций.

Для участков Петрозаводского Онего, где большие площади дна слагаются глинами, покрытыми тонким слоем песка и гравия, характерны низкие многовершинные графики с широким диапазоном фракций. В Петрозаводской губе наиболее распространенным типом гранулометрического профиля осадков является двухвершинный, с максимумами мелкопелитовой и мелкоалевритовой фракций. В северной части губы и в Логмозере количество последней фракции значительно выше, чем первой. В центральной части Петрозаводской губы осадки с максимумом глинисто-пелитовых фракций имеют многовершинный профиль.

В районе Большого Онего и примыкающих к нему губ широко распространены гранулометрические структуры с двухвершинными и асимметричными одновершинными графиками того же типа, что и в открытом озере. В южной части Повенецкого залива, характеризующегося сложным рельефом дна и пестрым литологическим составом донных отложений, гранулометрические профили отличаются разнообразием и доминированием многовершинных структур. В осадках

открытого озера в средней и северной частях залива в гранулометрических структурах наблюдается тенденция к двухвершинности, а прибрежных участков – к низким многовершинным и двухвершинным профилям.

5.2. Формирование и распределение химических ингредиентов

Интенсивное антропогенное влияние на озеро нарушает течение естественных биохимических процессов. Увеличивается поступление биогенных элементов и органических веществ. В последнее время скорость их значительно возросла. За многолетний период исследований собран новый фактический материал по донным отложениям. Отбор проб производили дночерпателями, а также трубками ГОИН и ударного типа оригинальной конструкции. Содержание органических веществ, общего и минерального азота и фосфора определяли общепринятыми методами [13, 186], качественный состав органического вещества – методом кислотного гидролиза [78]. Растительные пигменты экстрагировали из свежего грунта 90%-ным уксусом. Хлорофилл „а”, „b”, „с” и феофитин определяли спектрофотометрическим методом (прибор Specol) [266]. Микроэлементы анализировали спектральным методом.

Повенецкий залив является северной частью Онежского озера. Отделенный мелководным порогом, он представляет собой по существу самостоятельный водоем, значительный по площади и глубоководный в центральной части. Из-за отсутствия значительных притоков поступление в залив терригенного материала невелико [38]. В центральной глубоководной части накапливаются илы зеленовато-серой, серой и бурой окраски. По всей площади дна наблюдаются выходы глин, подстилающих современные осадки. Встречаются рудные корки черного и охристого цветов.

Содержание органического вещества в донных отложениях низкое (рис. 38), и только в центральном глубоководном районе оно достигает 2.5–4.3%. Процентное содержание углерода гуминовых веществ от его общего количества в осадках (гуминовый коэффициент) колеблется в широких пределах (табл. 28). Основной составной частью органического вещества являются фульвовые кислоты (величины отношения $ГК : ФК = 0.4–0.9$), что служит показателем ранней стадии преобразования органических веществ. Содержание хлорофилла „а” (4.72 мг/100 г сух. грунта), „b” (0.93 мг/100 г), „с” (0.7 мг/100 г) и преобладание феофитина (6.63 мг/100 г) указывают на быстрое окисление органического вещества во время процесса седиментации, а также и в твердой фазе осадков (табл. 29). Высокий окислительно-восстановительный потенциал (порядка $169 \div +20$ мВ) и низкое значение отношения C/N (1.6–10.6) свидетельствуют об интенсивности процессов трансформации органических веществ.

Концентрации в поверхностном слое осадков органического азота (рис. 39), на долю которого приходится почти 99% его суммарной

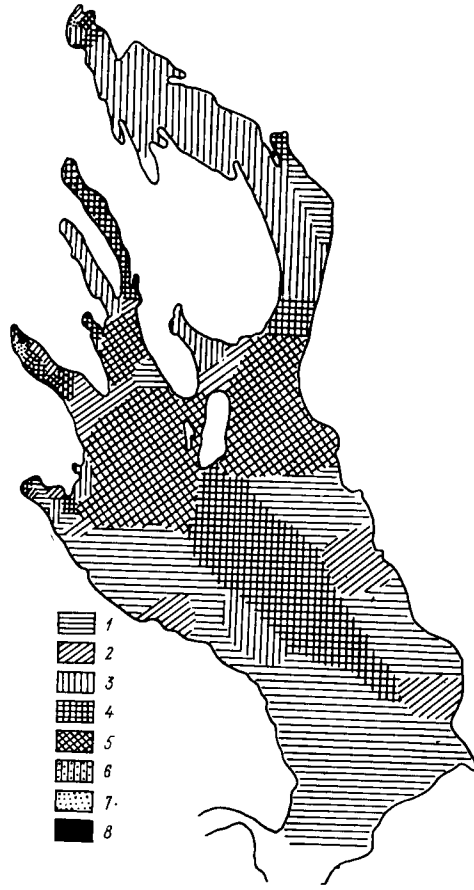


Рис. 38. Распределение ОВ (% от сух. массы) в донных отложениях Онежского озера. 1 - < 0,5, 2 - 0,5-1, 3 - 1-2, 4 - 2-3, 5 - 3-4, 6 - 4-6, 7 - 6-10, 8 - > 10.

величины, составляют 5,4-36,8% от органического вещества. Судя по отношению C/N [120], донные отложения Повенецкого залива почти повсеместно обогащены азотом. Из неорганических форм в небольших количествах содержится аммонийный азот (табл. 30) с максимумом его в осадках центральной части.

Характерным для осадков Повенецкого залива по сравнению с другими районами озера является относительно высокое количество общего фосфора (табл. 31, рис. 40). Содержание легкоподвижного фосфора от общего в среднем составляет 28,8%, большая часть его находится в органической форме. По величине отношения C/P (2,2-19,4) органическое вещество донных отложений Повенецкого залива, по классификации М. В. Мартыновой [120], относится к первой группе (обогащено фосфором). Содержание железа ниже кларковых значений,

Таблица 28
Содержание органического вещества (% от сух. массы) в донных отложениях Онежского озера

Район	Число станций	Гумус	Углерод С	С _{т.в}	С _{т.к}	С _{ф.к}	К _{гум}	$\frac{С_{т.к}}{С_{ф.к}}$	$\frac{С}{N}$
Повенецкий залив	4	$\frac{0.57-4.31}{2.11}$	$\frac{0.33-2.50}{1.23}$	$\frac{0.02-0.59}{0.25}$	$\frac{0.01-0.28}{0.09}$	$\frac{0.01-0.49}{0.16}$	$\frac{3.5-37.4}{4.5}$	$\frac{0.1-2.5}{0.8}$	$\frac{1.6-10.6}{4.6}$
Залив Большое Онего	11	$\frac{0.62-9.93}{3.78}$	$\frac{0.36-5.76}{2.49}$	$\frac{0.12-2.11}{1.19}$	$\frac{0.04-0.77}{0.39}$	$\frac{0.08-1.34}{0.80}$	$\frac{11.3-62.8}{41.0}$	$\frac{0.1-1.9}{0.6}$	$\frac{1.3-9.9}{5.6}$
Кондопожская губа	21	$\frac{0.93-38.58}{8.15}$	$\frac{0.54-22.38}{4.73}$	$\frac{0.12-2.19}{0.73}$	$\frac{0.05-1.21}{0.25}$	$\frac{0.07-0.98}{0.48}$	$\frac{9.38-29.2}{16.8}$	$\frac{0.7-1.2}{0.9}$	$\frac{1.2-79.6}{18.8}$
Петрозаводская губа	21	$\frac{0.09-5.02}{2.02}$	$\frac{0.05-2.91}{1.19}$	$\frac{0.02-1.30}{0.43}$	$\frac{0.01-0.53}{0.17}$	$\frac{0.01-0.77}{0.26}$	$\frac{2.2-100.0}{29.4}$	$\frac{0.7-1.0}{8.0}$	$\frac{2.2-18.0}{8.2}$
Петрозаводское Онего	18	$\frac{0.14-4.46}{1.45}$	$\frac{0.08-2.59}{0.89}$	$\frac{0.02-1.51}{0.38}$	$\frac{0.01-0.44}{0.13}$	$\frac{0.01-1.07}{0.25}$	$\frac{2.9-65.2}{42.6}$	$\frac{0.4-1.0}{0.5}$	$\frac{0.4-8.4}{2.7}$
Южное Онего	13	$\frac{0.21-4.86}{1.02}$	$\frac{0.12-2.82}{0.59}$	$\frac{0.2-1.43}{0.22}$	$\frac{0.01-0.78}{0.11}$	$\frac{0.01-0.65}{0.11}$	$\frac{5.7-100.0}{35.5}$	$\frac{1.0-1.2}{1.1}$	$\frac{0.5-10.2}{3.1}$

Примечание. Углерод: С_{т.в} - гуминовых веществ, С_{т.к} - гуминовых кислот, С_{ф.к} - фульвокислот; К_{гум} - гуминовый коэффициент, отношение содержания углерода гуминовых веществ к его общему количеству. Здесь и в табл. 29-35 над чертой - экстремные величины, под чертой - средние.

Таблица 29

Содержание растительных пигментов (мг/100 г сух. грунта) в донных отложениях Онежского озера

Район	Число станций	Хлорофилл			Феопигмент	Хлорофилл Феопигмент, %	Растительные пигменты ОВ, %
		"а"	"б"	"с"			
Повенецкий залив	10	$\frac{0.06-10.33}{4.72}$	$\frac{0.03-2.26}{0.93}$	$\frac{0-2.19}{0.70}$	$\frac{0.22-13.22}{6.63}$	$\frac{40.9-266.7}{169.7}$	$\frac{0.01-0.3}{0.2}$
Кондопожская губа	2	$\frac{5.61-14.71}{10.16}$	$\frac{1.20-3.45}{2.32}$	$\frac{0.20-3.09}{1.64}$	$\frac{9.61-19.80}{14.70}$	$\frac{72.9-107.3}{90.1}$	$\frac{0.2-0.5}{0.4}$
Петрозаводская губа	2	$\frac{0-9.08}{4.54}$	$\frac{0-2.10}{1.05}$	$\frac{0-0.09}{0.04}$	$\frac{0-12.48}{6.24}$	$\frac{0-110.7}{55.3}$	$\frac{0-0.5}{0.3}$
Петрозаводское Онего	1	$\frac{0.19}{-}$	$\frac{0.06}{-}$	$\frac{0.005}{-}$	$\frac{0.33}{-}$	$\frac{77.3}{-}$	$\frac{0.1}{-}$
Южное Онего	3	$\frac{0.14-2.36}{1.12}$	$\frac{0-0.24}{0.08}$	0	$\frac{0.22-3.74}{1.45}$	$\frac{63.1-284.6}{137.1}$	$\frac{0.3-1.1}{0.7}$

Таблица 30

Содержание азота (% от сух. массы) в донных отложениях Онежского озера

Район	Число станций	N _{орг}	NH ₄	NO ₃	NO ₂	N _{мин} , %	$\frac{N_{\text{мин}}}{N_{\text{орг}}}, \%$	$\frac{N_{\text{орг}}}{\text{ОВ}}, \%$
Залив Большое Онего	11	$\frac{0.22-0.73}{0.50}$	$\frac{0.0007-0.001}{0.0008}$	$\frac{0.00001-0.00008}{0.00004}$	$\frac{0.000003-0.00001}{0.000006}$	$\frac{0.000713-0.00109}{0.000846}$	$\frac{0.1-0.3}{0.2}$	$\frac{3.6-26.4}{18.8}$
Повенецкий залив	12	$\frac{0.12-0.51}{0.28}$	$\frac{0.001-0.005}{0.003}$	$\frac{0.00003-0.0002}{0.0001}$	$\frac{0.00001-0.00003}{0.00002}$	$\frac{0.00121-0.00521}{0.00321}$	$\frac{0.2-2.7}{1.3}$	$\frac{5.4-36.8}{18.7}$
Кондопожская губа	21	$\frac{0.09-0.68}{0.33}$	$\frac{0.0004-0.02}{0.0007}$	$\frac{0.0001-0.0008}{0.0004}$	$\frac{0.000007-0.00003}{0.00002}$	$\frac{0.000507-0.02083}{0.0013}$	$\frac{0.6-3.1}{1.9}$	$\frac{0.7-26.9}{9.7}$
Петрозаводская губа	21	$\frac{0.01-0.42}{0.10}$	$\frac{0.003-0.07}{0.02}$	$\frac{0.00001-0.00008}{0.00004}$	$\frac{0.00006-0.00008}{0.00007}$	$\frac{0.00307-0.07016}{0.002007}$	$\frac{16.7-30.7}{23.7}$	$\frac{3.4-37.5}{10.1}$
Петрозаводское Онего	18	$\frac{0.09-0.61}{0.34}$	$\frac{0.001-0.005}{0.003}$	$\frac{0.00003-0.0001}{0.00005}$	$\frac{0.00001-0.00006}{0.00003}$	$\frac{0.00104-0.00516}{0.0031}$	$\frac{0.7-1.6}{1.1}$	$\frac{6.7-53.1}{21.9}$
Южное Онего	13	$\frac{0.07-0.40}{0.23}$	$\frac{0.0008-0.006}{0.001}$	$\frac{0.00003-0.0003}{0.0001}$	$\frac{0.000003-0.00005}{0.00001}$	$\frac{0.000833-0.00635}{0.00359}$	$\frac{0.2-3.0}{0.9}$	$\frac{5.7-100.0}{47.9}$

Таблица 31
Содержание фосфора (% от сух массы) в донных отложениях Онежского озера

Район	Число станций	Р _{общ}	Р _{легк}	Р _{орг}	$\frac{Р_{легк}}{Р_{общ}}, \%$	$\frac{Р_{орг}}{Р_{общ}}, \%$	$\frac{Р_{орг}}{ОВ}, \%$	$\frac{C}{P}$
Залив Большое Онего	11	$\frac{0.03-0.16}{0.09}$	$\frac{0.004-0.013}{0.01}$	$\frac{0.026-0.147}{0.08}$	$\frac{8.1-13.3}{10.7}$	$\frac{86.7-91.9}{89.3}$	$\frac{4.2-9.1}{6.6}$	$\frac{13.7-39.1}{26.4}$
Повенецкий залив	12	$\frac{0.05-0.30}{0.16}$	$\frac{0.01-0.08}{0.04}$	$\frac{0.03-0.27}{0.12}$	$\frac{6.9-58.3}{28.8}$	$\frac{44.4-93.1}{71.2}$	$\frac{1.2-13.8}{6.9}$	$\frac{2.2-19.4}{9.4}$
Кондопожская губа	21	$\frac{0.04-0.27}{0.09}$	$\frac{0.01-0.05}{0.03}$	$\frac{0.03-0.22}{0.06}$	$\frac{5.9-63.4}{35.2}$	$\frac{75.0-81.5}{78.2}$	$\frac{0.6-3.2}{1.9}$	$\frac{9.3-520.5}{37.3}$
Петрозаводская губа	21	-	$\frac{0.001-0.02}{0.005}$	-	-	-	-	-
Петрозаводское Онего	18	$\frac{0.02-0.21}{0.09}$	$\frac{0.004-0.06}{0.02}$	$\frac{0.011-0.196}{0.07}$	$\frac{5.6-44.0}{23.8}$	$\frac{11.0-90.4}{55.6}$	$\frac{0.8-28.0}{6.7}$	$\frac{1.6-22.6}{9.9}$
Южное Онего	13	$\frac{0.005-0.09}{0.04}$	$\frac{0.001-0.04}{0.02}$	$\frac{0.004-0.07}{0.02}$	$\frac{4.1-66.7}{31.5}$	$\frac{12.5-96.0}{66.6}$	$\frac{0.4-22.9}{5.4}$	$\frac{0.9-31.5}{14.2}$

Таблица 32
Содержание железа и марганца (% от сух. массы) в донных отложениях Онежского озера

Район	Число станций	Fe ²⁺	Fe ³⁺ + Fe ²⁺	Fe ₂ O ₃	MnO	Mn	$\frac{Mn}{Fe}$
Залив Большое Онего	11	$\frac{0.01-0.12}{0.04}$	$\frac{0.12-1.21}{0.49}$	$\frac{3.9-17.0}{9.9}$	$\frac{0.14->>0.25}{0.24}$	$\frac{0.07-3.54}{1.07}$	$\frac{0.4-22.2}{4.6}$
Повенецкий залив	12	$\frac{\text{Следы}-0.26}{0.12}$	$\frac{0.03-0.36}{0.16}$	$\frac{1.85-9.8}{4.9}$	$\frac{0.084->0.25}{0.19}$	$\frac{0.02-1.12}{0.31}$	$\frac{0.2-13.5}{2.7}$
Кондопожская губа	21	$\frac{0.01-0.28}{0.13}$	$\frac{0.04-0.61}{0.26}$	$\frac{1.05-10.5}{7.2}$	$\frac{0.17-0.60}{0.27}$	$\frac{0.03-1.35}{0.27}$	$\frac{0.1-21.2}{2.7}$
Петрозаводская губа	21	$\frac{0.01-0.24}{0.07}$	$\frac{0.03-0.41}{0.17}$	$\frac{5.0-11.0}{7.6}$	-	$\frac{\text{Следы}-0.37}{0.09}$	$\frac{0.1-3.9}{1.1}$
Петрозаводское Онего	18	$\frac{0.01-0.24}{0.04}$	$\frac{0.01-0.31}{0.09}$	-	-	$\frac{0.02-2.59}{0.43}$	$\frac{0.3-45.6}{6.3}$
Южное Онего	13	$\frac{0.003-0.23}{0.04}$	$\frac{0.004-0.24}{0.08}$	-	-	$\frac{0.02-0.64}{0.19}$	$\frac{0.1-145.0}{15.1}$

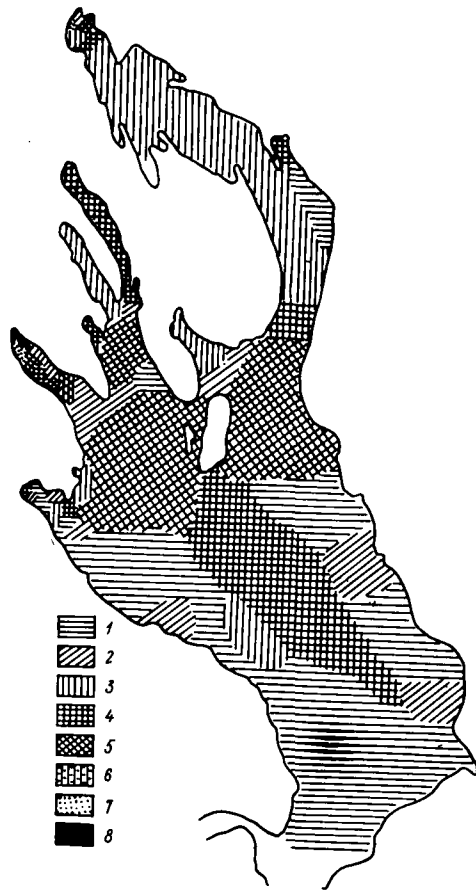


Рис. 39. Распределение азота (% от сух. массы) в донных отложениях Онежского озера.

1 - < 0.1 , 2 - $0.1-0.2$, 3 - $0.2-0.3$, 4 - $0.3-0.4$, 5 - $0.5-1$, 6 - > 1 .

а марганца — превышает кларк (табл. 32) [41]. Осадки залива богаты SiO_2 , Al_2O_3 , CaO и TiO_2 (табл. 33).

Большая губа Повенецкого залива — самая северная часть водоема. Его береговая линия образует ряд небольших губ, в каждой из которых существуют свои микроусловия. Большое влияние на формирование химического состава донных отложений губы оказывают антропогенные факторы, а также притоки, несущие взвеси и гумусные воды. Наибольшему антропогенному воздействию подвержены губы Лумбуши, Кумса и Повенецкая. Основная часть котловины открытого плеса [35] покрыта илами серого и серо-зеленого цветов, представляющими собой тонкодетритную гиттию. У берегов они содержат значительное количество растительных остатков. Глинистые грунты дна в основном ленточного строения, встречаются повсеместно, являясь

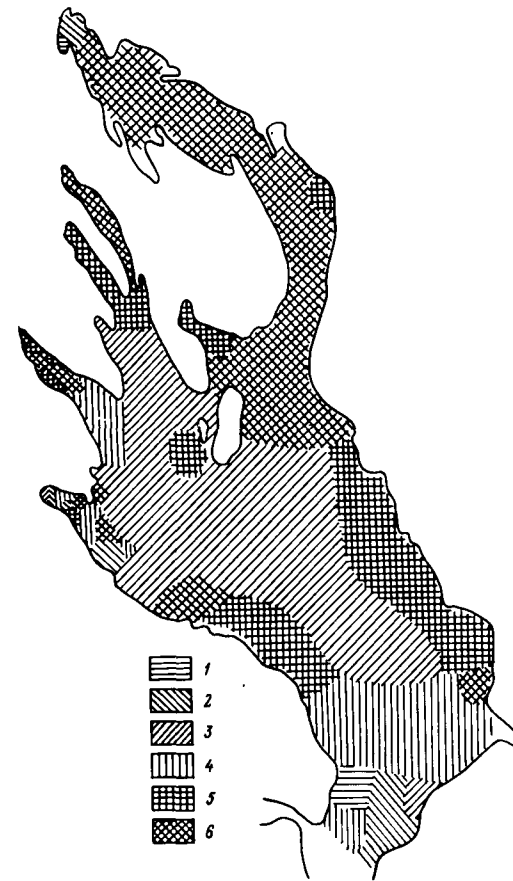


Рис. 40. Распределение легкоподвижного фосфора (% от сух. массы) в донных отложениях Онежского озера.

1 - < 0.002 , 2 - $0.002-0.005$, 3 - $0.005-0.01$, 4 - $0.01-0.02$, 5 - $0.02-0.03$, 6 - > 0.03 .

продолжением широко распространенных в бассейне губы ленточных глин. У Повенца чистая серо-голубая глина залегает вблизи берегов. Рудные образования встречаются чаще всего в смеси с илом. В области литорали простираются песчаные и каменистые отложения.

Средние значения содержания органического вещества в осадках открытого плеса колеблются от 0.48 до 4.68% (рис. 31, табл. 34). Максимальные концентрации характерны для районов с небольшими глубинами. В прямой зависимости от содержания гумуса находится и количество азота: средняя его величина 0.16, наибольшая — 0.29%. Отношение C/N колеблется от 6.2 до 40.7. Азота в органическом веществе содержится 5.6% (табл. 35). По величине отношения C/N донные отложения характеризуются „обычным”

Таблица 33

Валовой химический анализ донных отложений
(% от абс. сух массы) Онежского Озера

Район	Число станций	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO
Залив Большое Онего	11	40.0–63.0	0.23–0.80	7.8–14.5	0.6–2.0	1.0–2.8
		51.7	0.47	11.1	1.5	1.8
Повенецкий залив	12	51.5–61.5	4.0	9.3–14.0	0.9–2.9	0.19–2.4
		55.9	–	10.6	1.6	0.99
Кондопожская губа	6	48.0–58.0	0.37–0.80	8.8–17.0	1.2–2.5	1.6–4.5
		54.2	0.67	12.7	1.9	2.5
Петрозаводская губа	21	43.0–60.0	0.63–0.91	8.8–14.5	1.2–1.8	1.3–1.85
		53.0	0.71	9.1	1.5	1.6

(наиболее часто встречающимся) относительным содержанием азота (см. рис. 39).

Сравнительная бедность осадков Большой губы органическим веществом объясняется отсутствием условий для его образования в самом водоеме. Поступление его с водосбора, имеющего незначительную заболоченность (около 6%), также невелико. Несколько повышенные концентрации органических веществ в глубоководном районе вызваны, по-видимому, более низкими температурами, тормозящими процессы разложения отмерших организмов, поступающих в донные отложения.

Кумсагуба, расположенная в восточной части Большой губы, узкая, вытянутая в северо-западном направлении, глубоководная. Берега ее в вершине низкие, ближе к выходу в озеро переходят в высокие, которые хорошо защищают эту часть водоема от ветрового воздействия [35]. В донных отложениях преобладают серые и серо-зеленые илы. В отличие от открытой части Большой губы концентрации органического вещества в осадках сравнительно высокие – в среднем 10.8% (от 5.8 до 13.5), с максимумом в северной части, к югу они постепенно снижаются. Содержание углерода гуминовых веществ по отношению к его общему количеству ($K_{гум}$) в отложениях составляет 18.8–38.4%. Судя по величине отношения C/N, ГК : ФК и $K_{гум}$, главным источником накопления органического вещества в осадках, видимо, являются остатки высшей водной растительности, которая занимает около 30% акватории [76], и планктона. Поскольку Кумсагуба хорошо защищена от ветров, волновые процессы в ней развиты ограниченно, поэтому перемешивание вод, а следовательно, взмучивание и перенос верхнего слоя осадков выражены слабо. Все эти факторы способствуют накоплению в донных отложениях органического вещества.

Губа Лумбуши отчленена от основной акватории Большой губы группой островов, мелководна. В нее впадают 2 небольшие речки,

Таблица 34

Химический анализ донных отложений (% от сух. массы) Большой губы Повенецкого залива

Район	Число станций	Гумус	Углерод С	Железо Fe ³⁺	Фосфор Р _{легкоподв}	C/N
Собственно Большая губа	8	$\frac{0.48-4.68}{2.48}$	$\frac{0.28-2.72}{1.41}$	$\frac{0.01-0.18}{0.10}$	$\frac{0.002-0.007}{0.003}$	$\frac{6.2-40.7}{13.6}$
Губа Лумбуши	6	$\frac{2.26-10.76}{5.53}$	$\frac{1.31-6.26}{3.22}$	$\frac{0.05-0.30}{0.14}$	$\frac{0.002-0.003}{0.0025}$	$\frac{9.8-15.5}{12.9}$
Район г. Медвежьегорска	11	$\frac{0.12-3.51}{2.27}$	$\frac{0.08-2.04}{1.41}$	$\frac{0.01-0.27}{0.12}$	$\frac{0.001-0.005}{0.003}$	$\frac{5.5-50.0}{19.2}$
Повенецкая губа	12	$\frac{0.03-2.41}{1.06}$	$\frac{0.02-1.40}{0.61}$	$\frac{0.007-0.13}{0.07}$	$\frac{0.001-0.009}{0.004}$	$\frac{8.4-19.9}{13.9}$
Пергуба	4	$\frac{0.49-3.69}{1.86}$	$\frac{0.29-2.15}{1.08}$	$\frac{0.03-0.29}{0.10}$	$\frac{0.002-0.008}{0.005}$	$\frac{3.1-31.3}{17.2}$
Кумсагуба	3	$\frac{3.89-8.96}{5.99}$	$\frac{2.25-5.20}{3.48}$	$\frac{0.04-0.63}{0.43}$	$\frac{0.09-0.10}{0.096}$	$\frac{6.8-12.7}{9.9}$

Таблица 35
Содержание азота в донных отложениях (% от сух. вещества) Большой губы Повенецкого залива

Района	Число станций	N _{орг}	NH ₄	NO ₃	NO ₂	N _{млн}	$\frac{N_{\text{млн}}}{N_{\text{орг}}}, \%$	$\frac{N_{\text{орг}}}{\text{ОВ}}, \%$
Собственно Большая губа	8	$\frac{0.01-0.29}{0.16}$	$\frac{0.00001-0.0002}{0.0001}$	$\frac{0-0.0001}{0.00003}$	$\frac{0.00005-0.0001}{0.00007}$	$\frac{0.00007-0.0004}{0.0028}$	$\frac{0.1-1.3}{0.4}$	$\frac{1.0-9.1}{5.6}$
Губа Лумбуши	6	$\frac{0.08-0.51}{0.26}$	$\frac{0.00005-0.0005}{0.0002}$	$\frac{0-0.0008}{0.00002}$	$\frac{0.00004-0.00007}{0.00005}$	$\frac{0.00007-0.00058}{0.00025}$	$\frac{0.08-0.1}{0.09}$	$\frac{3.6-5.6}{4.5}$
Район г. Медвежьегорска	11	$\frac{0.01-0.23}{0.10}$	$\frac{0.00002-0.0002}{0.0001}$	$\frac{0-0.0001}{0.00002}$	$\frac{0.00003-0.0001}{0.00006}$	$\frac{0.00004-0.00024}{0.00012}$	$\frac{0.1-1.2}{0.3}$	$\frac{0.9-10.7}{4.8}$
Повенецкая губа	12	$\frac{0.001-0.16}{0.08}$	$\frac{0-0.0002}{0.0001}$	$\frac{0-0.00004}{0.00001}$	$\frac{0.00003-0.0001}{0.00006}$	$\frac{0.00002-0.00032}{0.00011}$	$\frac{0.2-2.0}{0.9}$	$\frac{3.2-6.4}{5.0}$
Пергуба	4	$\frac{0.01-0.24}{0.11}$	$\frac{0.00001-0.0001}{0.00005}$	$\frac{0-0.00001}{0.000003}$	$\frac{0.000004-0.000009}{0.000005}$	$\frac{0.00014-0.00019}{0.0000538}$	$\frac{0.05-0.1}{0.07}$	$\frac{3.1-3.9}{3.4}$
Кумсагуба:	3	$\frac{0.29-0.41}{0.34}$	$\frac{0.002-0.004}{0.003}$	$\frac{0.0001-0.0003}{0.0002}$	$\frac{0.0001-0.0003}{0.0002}$	$\frac{0.0022-0.0046}{0.0034}$	$\frac{1.1-7.6}{4.3}$	$\frac{4.6-8.5}{6.3}$

которые несут воды, богатые стойким органическим веществом болотного характера [38]. Донные отложения представлены серыми и серо-зелеными илами с железистыми вкраплениями и большим количеством древесных отходов. Концентрации органического вещества в среднем составляют 5.53% (от 2.26 до 10.76), азота органического – 0.26% (ниже, чем в Кумсагубе) (табл. 35). Осадки губы Лумбуши характеризуются более высоким значением отношения C/N – 12.9 (табл. 34), и отличаются от таковых в Кумсагубе и Большой губе не только количеством органических веществ, но и их качеством. На формирование донных отложений здесь значительное влияние оказывают выпадающие в губу реки (Лумбушка и Пиндушка), а также антропогенный фактор.

В районе г. Медвежьегорска, где берега преимущественно песчаные, открытые, подверженные интенсивному ветроволновому воздействию, литораль выражена слабо. Донные отложения формируются под влиянием стока рек Кумсы и Вички, воды которых несут органические взвеси, поступающие как с водосбора, так и с городскими стоками. Кроме того, немаловажное воздействие оказывает сброс бытовых и промышленных сточных вод непосредственно в Большую губу. В донных отложениях этого района наблюдается очень большое скопление неразложившихся древесных остатков. Количество органического вещества в осадках ниже, чем в вышеназванных районах, – в среднем 2.27% (см. табл. 34). Концентрация азота органического колеблется от 0.01 до 0.23% и составляет в среднем 4.8% от органического вещества. Величина отношения C/N – 5.5–50. Максимальное значение этого показателя отмечено вблизи устьев рек, что свидетельствует о крайне низком содержании азота в органическом веществе осадков.

Повенецкая губа представляет собой сравнительно мелководный район озера, открытый для ветроволнового воздействия. Изрезанные ее берега в вершинах губ песчаные. В губу выпадают 2 притока с гумусовыми водами. Основными типами осадков в этой части являются глинистые грунты с песком и галькой. Местами встречаются серые и серо-зеленые глинистые илы. Содержание органического вещества в донных отложениях самое низкое и в среднем составляет 1.06% (см. табл. 34), мало и азота органического (0.08%). Величина отношения C/N (13.9) также указывает на относительную бедность осадков азотом.

В донных отложениях всей Большой губы преобладающей формой минерального азота является аммонийная (см. табл. 35). Повышенные количества аммонийного азота (0.0003–0.0007%) характерны для приустевых участков и мест, подверженных антропогенному влиянию (районы г. Медвежьегорска, Повенца, губы Лумбуши и Кумсагубы). Концентрации нитратного и нитритного азота крайне низкие (см. табл. 35), незначительно и содержание минерального азота (0.4% от общего).

В распределении легкоподвижного фосфора в поверхностном слое осадков прослеживается определенная закономерность (см. рис. 40): обширной открытой части, удаленной от берега, свойственно его низкое

содержание — в среднем 0.002%. В Кумсагубе (в кутовой части) концентрация его в осадках увеличивается до 0.013%. Максимальное количество фосфора в донных отложениях Медвежьегорского и Повенецкого побережий, а также приустьевых участков рек является следствием антропогенного влияния и речного стока [35].

Валовые концентрации железа (3.5–7.25%) почти повсеместно превышали кларк [41], а легкоподвижного — составляли только 4.5–7.4% от его общего количества. Наибольшее содержание его обнаружено в донных отложениях Кумсагубы, восточной части губы Лумбуши, в литорали у г. Медвежьегорска и в восточной части Повенецкого побережья. Заметное влияние на накопление железа в осадках губы оказывает склоновый сток, так как почвы бассейна представлены подзолом с гумусово-железистым и железистым горизонтами на супесчаных и песчаных отложениях [124], а также речной сток, богатый железом. Хорошая аэрация и малые концентрации органического вещества в водах губы способствуют выпадению железа из раствора и осаждению его на дне. Придонные слои воды этих районов в течение всего года насыщены кислородом, содержат сравнительно мало двуокиси углерода и имеют нейтральную реакцию [237]. При таких условиях миграции железа из донных отложений в воду почти не происходит и осадки обогащаются этим элементом. В сравнительно больших масштабах идет и процесс рудообразования. Это подтверждается наличием в разных районах губы железорудных отложений, представленных бурой пленкой, черными вкраплениями, корками и прослойками.

Залив Большое Онего расположен в северо-западной части Онежского озера и является самым глубоководным его районом. Донные отложения представлены бурым и коричневым глинистыми илами с песком и плотной рудной коркой, толщина которой местами достигает 2–2.5 см. Ожелезнением в значительной степени и определяется бурая окраска этих илов. Органическое вещество в осадках содержится в небольшом количестве — 0.62–9.93% (см. табл. 28, рис. 38). Его максимальные концентрации отмечены в губах Горской и Чеболакше. По своей природе оно является автохтонным и характеризуется малыми величинами лигнино-гумусового комплекса (0.33–0.62%).

Количество $C_{орг}$ в донных отложениях находится в тесной зависимости от гранулометрического состава осадков: по мере уменьшения среднего диаметра частиц грунта количество органического вещества увеличивается [36]. При этом определяющий фактор, воздействие которого проявляется в переносе органических соединений течениями, — гидродинамический режим. Содержание углерода гуминовых веществ ($K_{гум}$, в % от его общего количества) составляет 11.3–62.8 (см. табл. 28). Доминирующей частью органического вещества являются преимущественно фульвовые кислоты (ГК : ФК = 0.6). Степень гумифицированности органического вещества уменьшается с увеличением концентрации $C_{орг}$, что свидетельствует о значительном содержании в осадках легкогидролизующих органических соединений автохтонного происхождения.

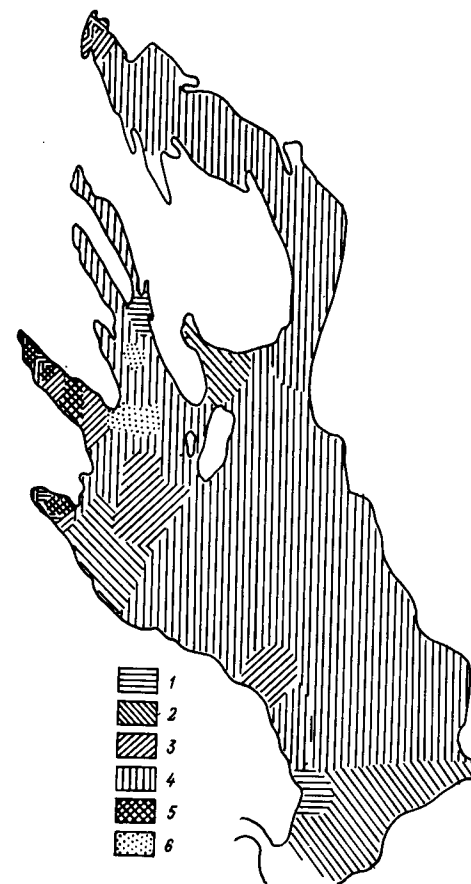


Рис. 41. Распределение легкоподвижного железа (% от сух. массы) в донных отложениях Онежского озера.

1 — < 0.01, 2 — 0.01–0.05, 3 — 0.05–0.1, 4 — 0.1–0.3, 5 — 0.3–0.5, 6 — 0.5–1.

Характерным для этого района является сравнительно высокое количество в донных отложениях органического азота (см. рис. 40) — 18.8% (см. табл. 30) в органическом веществе, на что также указывает отношение C/N (1.3–9.9). Минерального азота мало, преобладающей его формой является аммонийная (см. табл. 30). Немного в осадках и фосфора, как общего (0.09%), так и легкоподвижного (0.01%), но тем не менее, судя по величине отношения C/P, в органическом веществе донных отложений его содержание существенно. В пространственном распределении фосфора больших различий не наблюдается (см. рис. 41). Количество легкоподвижного фосфора по отношению к общему составляет 8.1–13.3% (см. табл. 31), что свидетельствует о его устойчивости в донных отложениях и невысокой десорбции из твердой фазы осадков.

Отличительной особенностью осадков этого района являются высокие концентрации железа (см. табл. 32). Его распределение по площади дна неодинаково (рис. 41), что, по-видимому, обусловлено различием окислительно-восстановительных условий. Валовое количество железа превышало кларковые значения, но легкоподвижное составляло только 0.3–0.7% от его валового содержания. Эти данные свидетельствуют о стабильности железа в донных отложениях залива и его незначительной мобилизации в иловый раствор. В отличие от других районов озера в донных отложениях залива происходит и накопление марганца. На большей площади дна его концентрации значительно превышали кларк (см. табл. 32).

Высокое содержание магния наблюдается по всей площади дна Большого Онего. Но концентрации кальция были низкими (0.6–2%), его экстремные значения отмечены в прибрежных частях у восточного и западного берегов. Распределение аутигенного кремния имеет ряд характерных особенностей. Область повышенного содержания SiO_2 (58–63% – см. табл. 33) захватывает всю центральную часть залива, несколько меньше его у западного берега (40%). Высокие концентрации SiO_2 могут быть вызваны скоплением на дне у центра залива отмерших планктонных диатомовых водорослей.

Кондопожская губа – один из крупнейших и глубоководных районов Онежского озера, характеризующийся сильной расчлененностью береговой линии и сложным рельефом дна. Донные отложения представлены преимущественно илами зеленовато-бурой, иногда серой окраски, с примесью песка, руды и глины. Железорудные образования обнаружены повсеместно на глубинах 30–35 м в виде горошин, мягкой рудной корки и углисто-черных мелких частиц. Значительную площадь занимают осадки, загрязненные отходами ЦБК. Морфологические особенности губы (врезанность в сушу, большая площадь, глубоководность и некоторая изолированность от открытой акватории Онежского озера), а также значительная антропогенная нагрузка оказывают существенное влияние на химический состав ее донных отложений.

Осадки губы характеризуются повышенным содержанием органического вещества (см. табл. 28), пространственное распределение их очень неравномерно (см. рис. 38). Вследствие антропогенного влияния создаются особые условия для формирования в донных отложениях $\text{C}_{\text{орг}}$. При одинаковом составе наблюдаются его совершенно различные концентрации. Осадки северной части залива отличаются очень высоким его содержанием и низким количеством общего азота (0.073–0.23%). Высокие скорости осадконакопления способствуют здесь более быстрой изоляции органических остатков от непосредственного контакта с водной толщей, а в связи с этим степень их минерализации до захоронения меньшая.

В донных отложениях накапливаются трудноминерализуемые безазотистые органические вещества с большим диапазоном отношения C/N (41.4–46.2) и доминированием гуминовых кислот (величина отношения $\text{ГК} : \text{ФК} = 1–1.2$). Характерным для этих осадков являются и максимальные концентрации хлорофилла „а” (14.71 мг/100 г),

„b” (3.45), „с” (3.09) и феофитина (19.8 мг/100 г) (см. табл. 29), что отражает черты явной эвтрофии, а превалирование феопигментов указывает на интенсивность бактериальной трансформации всех растительных пигментов.

Высокое содержание органического вещества (до 100%) обнаружено и в глубоководной впадине на выходе из губы, где преобладают мелкоалевритовые илы с максимальной пелитовой фракцией (до 40%), характеризующиеся слабой динамической активностью. Накопление органических веществ в этом районе происходит, по-видимому, вследствие заполнения понижений дна сточными водами глубинного выпуска ЦБК, которые не подвергаются взмучиванию. Взвеси и коллоидные частицы постепенно осаждаются, а низкие температуры тормозят процессы минерализации органических веществ.

Центральный район и южная часть губы, где расположены тонкодиспергированные осадки, отличаются наиболее высокими концентрациями $\text{N}_{\text{орг}}$ (0.58–0.67%) и низкими значениями отношения C/N (3–9.2). Содержание $\text{N}_{\text{орг}}$ в органическом веществе здесь составляет 9.9–19.8%. В донных отложениях превалируют фульвовые кислоты (величина отношения $\text{ГК} : \text{ФК} = 0.7–0.9$), что указывает на высокую подвижность гумуса. Здесь более чем в 2 раза ниже содержание хлорофилла „а” (5.6–7.05 мг/100 г), „b” (1.2–1.32) и феофитина (9.01–10), а хлорофилл „с” присутствует в незначительных количествах (0.2–0.35 мг/100 г).

Донным отложениям Кондопожской губы свойственны низкие концентрации минерального азота (см. табл. 30). В его пространственном распределении больших различий не наблюдается, несколько повышенное содержание отмечено лишь в мелкоалевритовых илах глубоководной зоны и в осадках северного района губы. Концентрации фосфора, как валового, так органического и легкоподвижного, в осадках сравнительно невысокие (см. табл. 31), с максимумом в центральной и северной частях губы. Очевидно, он в отложениях не накапливается, а в процессе минерализации органических веществ поступает в поровые и придонные слои воды. По величине отношения C/P (202–520.3) можно судить о том, что осадки губы, находящиеся под влиянием сточных вод ЦБК, относительно бедны фосфором, а центрального и южного районов (C/P 27–98.5) обогащены им [120].

Содержание железа ниже кларковых значений (см. табл. 32). При общем закономерном увеличении его количества по мере уменьшения размера частиц грунта наблюдаются некоторые особенности в пространственном распределении этого элемента (см. рис. 41). Осадки с относительно повышенными концентрациями железа (до 0.6%) занимают глубоководную зону губы и отдельными пятнами располагаются в ее северном районе, а также в западной части при входе в Сунскую губу между о-вами Нигриш и Соколий. Вероятно, на накопление железа в осадках оказывают большое влияние приточные гумифицированные воды и выщелачивание его из основных пород. По данным А. П. Виноградова [41], содержание железа в последних составляет 8.56%, что намного выше кларковых значений.

Количество марганца в донных отложениях сравнительно высокое. Неравномерное накопление его на площади дна обуславливает значительную разницу в предельных значениях (см. табл. 32). Наибольшее распространение имеют осадки с содержанием Mn 0.1–0.4%, создающие основной фон, на котором выделяются отдельные пятна, где оно колеблется в пределах 1.2–1.3%. Соотношение Mn/Fe в отложениях варьирует от 0.13 до 21.2. В глубоководном районе повсеместно встречаются рудные образования, по-видимому, являющиеся продуктом перегруппировки железа и марганца в верхнем слое иловой толщи в процессе диагенеза. Илы губы богаты кремнием (SiO_2 – 54.2%), количество его несколько ниже, чем в Повенецком заливе, однако содержание CaO, MgO и Al_2O_3 значительно выше (см. табл. 33).

Петрозаводская губа – крупный глубоководный залив со вторым по величине притоком Онежского озера – р. Шуей. Другие притоки, впадающие с западного берега, не оказывают существенного влияния на формирование ее режима. Значительную площадь дна ее глубоководной части покрывают серые илы и глины. Встречаются илы с зеленоватым оттенком и нередко с примесью руды. В материковой и островной литорали преобладают песчаные и песчано-гравийные отложения.

Химический состав донных отложений формируется под влиянием стока с бассейна, антропогенного фактора, бентосных и планктонных организмов. Осадки губы сравнительно бедны органическим веществом (см. рис. 38, табл. 28). Участки с его максимальным содержанием занимают небольшую площадь дна. Самый богатый органическим веществом участок примыкает к устью р. Шуи, несущей окрашенные гумусовые воды. Относительно высокие скорости осадконакопления здесь также способствуют концентрации органического вещества в отложениях, поскольку происходит более быстрая изоляция органических остатков от непосредственного контакта с водной толщей. Следствием этого является меньшая, чем в случае с медленно накапливающимися осадками, степень его минерализации до захоронения [53].

Центральную площадь дна губы занимают тонкоструктурные, мелкоалевритовые илы с содержанием органического углерода от 0.97 до 1.3%. Повышенные концентрации $\text{C}_{\text{орг}}$ присущи отложениям, формирующимся в зоне антропогенного влияния. Наименьшее его содержание (в среднем 0.27%) наблюдается в прибрежной мелководной части водоема, где дно выстилают песчано-галечные осадки. На распределение органического углерода основное влияние оказывают течения, обуславливающие перераспределение органических соединений. Кроме того, неравномерность в пространственном его распределении в донных отложениях связана с различиями биологической продуктивности губы и с разной степенью трансформации органического вещества до его захоронения в осадках.

Сумма гуминовых веществ, как и органических, находится в определенной связи с гранулометрическим составом. Максимальные количества приурочены к мелкоалевритовым осадкам и имеют разное происхождение: часть их приносится с притоками, часть – со сточными водами, часть образуется в самом водоеме. Наибольшее содержание

гуминовых веществ (от 1.18 до 1.3%) наблюдается в тех же районах, где обнаружены высокие концентрации $\text{C}_{\text{орг}}$. При этом с уменьшением дисперсности отложений растут не только абсолютные, но и относительные величины содержания гуминовых веществ, т. е. по мере перехода от прибрежных участков к глубоководным степень гумификации органического вещества повышается. Однако процент C гуминовых веществ в донных отложениях Петрозаводской губы довольно низок (0.02–1.3), что свидетельствует о высокой лабильности органического вещества. Наибольший гуминовый коэффициент отмечен в приустьевых участках рек. В отложениях глубоководной зоны он невысок.

Низкое содержание гуминовых и фульвовых кислот (0.03–0.69%) и величина отношения C/N (2.5–9) позволяют считать органическое вещество осадков преимущественно автохтонным. Сравнительно невысокое количество хлорофилла „a”, „b”, „c” и превалирование феофитина (см. табл. 29) указывают на активную трансформацию $\text{C}_{\text{орг}}$. Содержание общего азота в донных отложениях этой губы низкое (см. рис. 39) и колеблется от 0.01 (в песке) до 0.42% (в илах [162]). Из минеральных форм азота в сравнительно высоких количествах обнаружена аммонийная (см. табл. 30). Наиболее обогащены им осадки прибрежных районов (0.03–0.7%). Концентрации нитритного и нитратного азота незначительные, за исключением небольшого участка в районе устья р. Неглинки, где они несколько повышены.

Особенностью Петрозаводской губы является приуроченность повышенного содержания легкоподвижного фосфора к прибрежным участкам с песчаными осадками. По-видимому, его периферическая концентрация обусловлена влиянием аллохтонного органического фосфора, приносимого главным образом с бытовыми сточными водами, а также системой циркуляции воды в губе.

Содержание в поверхностном слое донных отложений железа, как валового, так и легкоподвижного, сравнительно высокое (см. табл. 32): его валовое количество превышало кларк более чем в 2 раза (5.5–11%) [41]. Распределение по площади дна отличается пестротой. В илистых осадках его концентрация совпадает с таковой рудных отложений, пески и глины характеризуются более низким содержанием и незначительными различиями экстремальных значений по сравнению с первыми [162]. Отложения губы бедны марганцем (см. табл. 32). Накопление его обусловлено теми же причинами, что и железа, но тенденции к совместному осаждению с железом не отмечено. Местом их преимущественной аккумуляции служат участки с малой гидродинамической активностью, где осадки не подвергаются взмучиванию. Наибольшее распространение имеют донные отложения с содержанием марганца 0.009–0.037%, создающие основной фон. Вероятно, это связано с более высокой миграционной способностью этого элемента. В осадках Петрозаводской губы много SiO_2 , TiO_2 , MgO, CaO (см. табл. 33), а Al_2O_3 меньше, чем в вышеназванных районах.

Донные отложения Петрозаводского Онего по своим физическим свойствам довольно разнообразны. Наибольшую площадь занимают илы,

выстилающие в основном центральную часть этого района. Песчаные грунты расположены в литоральной зоне. Гетерогенность осадков является результатом примеси руды, гравия, камней и глины. По цвету или преимущественно серые, коричневые, часто с бурым и черным наилком, пески – желтые, разных оттенков.

Осадки характеризуются невысоким содержанием органического вещества (см. табл. 28, рис. 38), образовавшегося в основном из остатков растительных и животных организмов, речных наносов, продуктов берегового стока и антропогенных процессов [163]. В донных отложениях мало пигментов (см. табл. 29). Наименьшее количество $S_{орг}$ (в среднем 0.34%) наблюдается в прибрежной мелководной части, где дно выстилают песчано-галечные грунты. Несколько повышенные его концентрации (1.13%) присущи отложениям, формирующимся в зоне антропогенного влияния, а максимальные (1.89–2.59%) – илистым осадкам глубоководной части. Содержание углерода гуминовых веществ по отношению к его общему количеству – $K_{гум}$ составляет 2.9–65.2 (см. табл. 28).

Доминирующей частью органического вещества являются фульвовые кислоты ($ГК : ФК = 0.4–1$), что свидетельствует о высокой подвижности гумуса. Величина отношения C/N колеблется от 0.4 до 8.4, минимальными значениями (0.4–1.81) характеризуются осадки Уйской губы и открытой части района. Генезис органического вещества этого района неясен. Возможно, такие низкие величины отношения C/N связаны с накоплением в осадках стойких к окислению азотсодержащих органических соединений [47]. Максимальные концентрации органического азота (0.3–0.61%) определены в илистых грунтах глубоководной зоны и на разрезе мыс Сальнов–мыс Шуйнаволоок, наименьшие (0.09%) – в Пухтинской губе, на остальной площади – 0.14–0.28% (см. рис. 39). Аммонийный азот обнаружен повсеместно в небольших количествах (см. табл. 30), нитритов и нитратов крайне мало. Все это свидетельствует об активных процессах минерализации органических веществ.

Концентрации фосфора, как валового, так органического и легкоподвижного, в осадках невысокие (см. табл. 31, рис. 40). В накоплении этого элемента существует определенная закономерность: в песках его среднее количество значительно ниже, чем в мелкоалевритовых и глинистых илах. Процентное содержание легкоподвижного фосфора от общего составляет в среднем 23.8, большая его часть находится в органической форме. Величина отношения C/P указывает на обогащенность фосфором органического вещества осадков.

Особенностью донных отложений Петрозаводского Онега являются низкие концентрации легкоподвижного железа и высокие – марганца (см. табл. 32), который аккумулируется в приустьевых и глубоководных участках с малой гидродинамической активностью, где осадки не подвергаются взмучиванию.

Донные осадки Южного Онега характеризуются повсеместным распределением песчано-алевритовых отложений различной мощности, подстилаемых микрослоистыми ленточными глинами. Илонакопление крайне ограничено.

Содержание органического вещества низкое (см. табл. 30): в преобладающей части донных отложений его концентрации не превышали 0.2–0.7% (см. рис. 39). В прибрежных районах с относительно повышенным продуцированием органической массы за счет разбавляющего влияния терригенной части осадков и сноса органических остатков в глубоководную часть озера процентное содержание $S_{орг}$ незначительно (0.2). Количество гуминовых веществ в осадках низкое, но тем не менее их процентное содержание в общем органическом веществе сравнительно высокое ($K_{гум}$ составляет 41.6). Величина отношения C/N колеблется от 0.5 до 9.7. Отмечена тенденция некоторого повышения этого значения в осадках приустьевой части р. Вытегры, органическое вещество которых в основном аллохтонного происхождения.

В органическом веществе преобладают гуминовые кислоты ($ГК : ФК = 1.2$), что также указывает на преобладание в нем наиболее стойких компонентов. На остальной площади, где пополнение запасов органического вещества идет за счет автохтонного материала, величина отношения C/N равна 3.1. Низкое содержание хлорофилла „а” (1.11 мг/100 г) и отсутствие хлорофилла „с” с преобладанием феофитина (см. табл. 29) указывают на быстрое окисление органического вещества во время оседания на дно, а также и в самих осадках.

Донные отложения этого района озера отличаются высоким содержанием общего азота в органическом веществе – 47.9% (см. рис. 40), что, возможно, обусловлено антропогенным влиянием. Осадки бедны минеральными формами азота и фосфором (см. табл. 30, 31). Содержание железа и марганца колеблется в очень широких пределах (см. табл. 32). Их накопление взаимосвязано с ОВ. Максимальные количества определены в мелкоалевритовых отложениях, где эти элементы осаждаются в комплексе с гуминовыми веществами. Для периферической части типичны невысокие их концентрации. По-видимому, в силу гидродинамической активности литоральных грунтов основная масса железа и марганца переносится с водой в глубоководный район и осаждается в илах.

5.3. Динамика органических веществ и биогенных элементов

Динамика химических ингредиентов в осадках водоема связана как с особенностями циркуляции водных масс, так и со степенью развития биологических процессов. Эти факторы оказывают влияние на характер накопления в донных осадках ОВ и биогенных элементов, а также на скорость обмена химическими компонентами между дном и водной массой.

Сезонные изменения содержания углерода отмечены повсеместно. Оно снижается от весны (в среднем 2.3%) к лету (1.8%), затем постепенно возрастает и в октябре составляет 2.8%. Аналогичные распределения характерны и для азота: его концентрация, как и органического вещества, падает (с 0.3 до 0.2%) в июле–августе, в период максимальной численности и биомассы гидробионтов. В это время,

по-видимому, происходит интенсивное потребление органических веществ. С резким уменьшением биомассы к осени в осадках постепенно накапливаются углерод и азот. Вероятно, в это время идет энергичная минерализация органических веществ с помощью бактерий.

Поступление новых количеств легкоразлагаемого детрита в донные отложения создает благоприятные условия для развития микроорганизмов и стимулирует бактериальный распад и ранее захороненных, более устойчивых органических остатков. Это подтверждается как отношением C/N, так и значениями гуминового коэффициента ($K_{гум}$), свидетельствующими о повышенной степени и скорости разложения органического вещества. Максимальные величины C/N (10) и $K_{гум}$ (70) отмечены в июле, минимальные (C/N – 7; $K_{гум}$ – 39.5%) приходятся на сентябрь, что указывает на энергично идущие процессы распада органических веществ. Среднее содержание ионов аммония в осадках колеблется в пределах от 0.0007 до 0.001% и лишь в августе, как исключение, снижается до 0.0002%. К осени оно вновь повышается, но не достигает его максимального количества (0.001%), отмеченного в июне.

Концентрации нитритного азота остаются почти неизменными, а нитратного – весной резко снижаются. В летнее время в донных отложениях отмечается небольшое увеличение нитратов. Несмотря на усиливающуюся осенью циркуляцию воды, содержание их в осадках сокращается незначительно, а нитриты сохраняются в том же количестве. В подледный период наблюдается повышение концентрации нитратного азота и очень незначительное – нитритного. Увеличение содержания этих форм азота, по-видимому, идет за счет процессов нитрификации в илах в условиях зимней стагнации.

Максимальное накопление легкоподвижного фосфора происходит также в зимний период (0.005%). Заметное снижение его количества весной (до 0.003%) по сравнению с зимним периодом, по всей вероятности, обусловлено весенней циркуляцией воды, способствующей равномерному распределению этого элемента в водной массе. Наименьшее его количество (0.0002%) определено в августе, в период максимальной численности и биомассы бентоса. По-видимому, в этот период он более активно потребляется организмами. Осенью содержание его увеличилось незначительно (до 0.0026%). Можно полагать, что осенняя циркуляция усилила миграцию и привела тем самым к выравниванию концентрации легкоподвижного фосфора в осадках и водной массе.

Количество железа в донных отложениях летом выше, чем весной. Вероятно, аккумулярованное в осадках железо при смене окислительных условий на восстановительные способно переходить в подвижное состояние.

Таким образом, сезонными наблюдениями установлено, что максимальное накопление как ОВ, так и биогенных элементов в осадках происходит в осенний и зимний периоды, летом их содержание резко падает.

5.4. Стратификация химического состава

Для характеристики распределения химических ингредиентов в толще отложений был отобран ряд колонок грунта в различных районах озера. Исследование показало хорошо выраженную химическую стратификацию. В качестве примера приведем результаты анализа колонок, взятых в районе, незначительно подверженном антропогенному влиянию, в зоне поступления промышленных сточных вод и в приустьевых участках. Почти во всех колонках верхний горизонт (0–20 см) окрашен в коричневые цвета разных оттенков за счет обогащения ила окислами железа и марганца. Глубже осадки представлены почти однородными мелкоалеуритовыми серыми илами с темными (темно-серыми, темно-коричневыми и темно-зелеными) прослойками через 3–5 см. С горизонта 70 см ил становится плотнее и к основанию колонки постепенно переходит в мягкую серую глину.

Органическое вещество в толще осадков распределяется неравномерно. Количество и качество его в разных горизонтах связано с рядом факторов, и прежде всего с теми условиями, которые существовали в период формирования соответствующих слоев осадка, степенью затронутого их диагенетическими преобразованиями (табл. 36). Для верхнего 20-сантиметрового слоя осадка характерно относительно повышенное количество органического углерода (4.2%) и низкое – азота (0.3%), хлорофилла „а” (0.22 мг/100 г) и „b” (0.2). В составе ОВ содержание $N_{орг}$ не превышала 4.2%.

В слое от 20 до 30 см концентрации $C_{орг}$ снижаются до 3.8%, а азота, наоборот, возрастают до 0.55%, соответственно увеличивается процентное содержание $N_{орг}$ в ОВ (до 8.4%). Несколько повышенное количество хлорофилла „а” (0.23 мг/100 г) указывает на возможное усиленное развитие фитопланктона в озере на данном этапе его развития. С горизонта 38–55 см снова происходит заметное увеличение ОВ (4.3% $C_{орг}$), содержание хлорофилла „а” и азота почти не претерпевает изменений, но значительно снижаются концентрации хлорофилла „b” и „с”, а также феофитина. По-видимому, в этот период на формирование осадков большее влияние оказывал терригенный сток. Ниже по разрезу (с 55 см до основания колонки) постепенно уменьшаются концентрации $C_{орг}$ (с 3.7 до 2.6%) и $N_{орг}$ (с 0.37 до 0.26%), хлорофилл „b” и „с” полностью исчезает, а пигменты представлены только минимальным количеством хлорофилла „а” (0.08) и феофитина (0.04 мг/100 г). У основания колонки содержание $C_{орг}$ и $N_{орг}$ низкое, а пигменты почти полностью разрушены.

Уменьшение содержания органических веществ от верхних горизонтов к нижним определяется в первую очередь распадом органических остатков в донных отложениях. С глубиной темпы распада замедляются, вследствие чего в горизонтах 100–120 см в осадках сохраняется значительное количество $C_{орг}$ – 71% от его первоначального содержания. Концентрация углерода гуминовых веществ в толще отложений изменяется подобно общему углероду, т. е. при некоторой неравномерности

Таблица 36

Содержание органических веществ в толще осадков, не подверженных антропогенному влиянию

Горизонт, см	C _{орг}	C _{гум}	N _{орг}	C/N	Хлорофилл			Феофитин
					% на воздушно-сух. навеску			
	„a”	„b”	„с”					
0–20	4.16	0.66	0.30	13.9	0.22	0.20	0.37	0.09
20–30	3.81	0.79	0.55	6.9	0.23	0.09	0.28	0.04
38–55	4.26	0.92	0.55	7.7	0.21	0.06	0.08	0.02
55–85	3.67	0.73	0.37	9.9	0.13	0.04	0.0	0.02
85–115	3.22	0.60	0.34	9.5	0.08	0.0	0.0	0.02
115–130	2.63	0.41	0.26	10.1	0.08	0.0	0.0	0.04

Таблица 37

Содержание органических веществ в толще осадков, подверженных антропогенному влиянию

Горизонт, см	C _{орг}	C _{гум}	N _{орг}	C/N	Хлорофилл			Феофитин
					% на воздушно-сух. навеску			
	„a”	„b”	„с”					
0–10	6.04	0.66	0.22	27.4	14.71	3.45	3.09	19.80
10–20	4.82	0.50	0.20	24.1	4.13	0.66	0.0	6.71
20–30	4.57	0.50	0.19	24.0	1.09	0.0	0.0	1.60
30–35	4.72	0.52	0.17	27.7	1.17	0.02	0.0	1.90

его распределения происходит уменьшение количества от верхних слоев (0.66 %) к нижним (0.4 %).

Наблюдающаяся неравномерность в распределении гуминовых веществ по длине колонки (как и C_{орг}), объясняется изменением условий осадконакопления в период формирования исследуемой толщи отложений. Отношение C/N имеет тенденцию к увеличению сверху вниз, что свидетельствует об опережающих темпах разложения азотсодержащих органических соединений в составе ОВ.

Для характеристики химического состава в толще отложений, подверженных сильному антропогенному влиянию (с максимальными концентрациями C_{орг} и растительных пигментов), были взяты небольшие (35 см) колонки грунта в северо-западной части Кондопожской губы (табл. 37). Поверхностный слой толщиной 0–2 см представлен илом коричневого цвета с черным налетом и отходами комбината. Далее, от 2 до 6 см, коричневый ил переходит в черный и приобретает запах сероводорода (в нем присутствует большое количество целлюлозных и древесных остатков), что свидетельствует об анаэробных процессах, происходящих в осадках этого горизонта (Eh = 80). Начиная с 6-сантиметрового слоя и до основания колонки цвет ила постепенно меняется от темно-зеленого

до серого, но запах сероводорода исчезает только с глубины 17 см.

Количество C_{орг} и хлорофилла „b” в толще отложений уменьшается, хотя и неравномерно, от верхних горизонтов к нижним (табл. 37), а содержание хлорофилла „a” и феофитина при резком его уменьшении в горизонтах 5–17 см до основания колонки остается почти неизменным, что указывает на большое поступление в осадки хлорофиллсодержащего органического детрита, а также, по-видимому, на его лучшую сохранность в восстановительных условиях илов. Максимальное количество C_{орг} (6.04 %) и пигментов (41.05 мг/100 г) характерно для слоя илов 0–10 см, а содержание гуминовых кислот и отношение C/N, наоборот, выше в основании колонки, что позволяет судить о значительной роли аллохтонного материала в формировании органического вещества осадков этого района и замедленном темпе процесса его минерализации.

5.5. Тенденции изменения химического состава осадков

Сброс промышленных и бытовых сточных вод в заливы Онежского озера оказывает большое влияние на формирование химического состава его донных отложений. Установлено, что содержание органического вещества в целом по озеру невысокое, но в его разных районах колеблется в очень широких пределах (от 1.8 до 25 %). Максимальные концентрации обнаружены в осадках крупных закрытых губ (Кондопожской, Петрозаводской и северной части Повенецкого залива). Резко повышенные концентрации органических веществ в этих заливах обусловлены значительным поступлением аллохтонного органического материала. Темпы седиментации здесь в 10–20 раз выше, чем в открытой части озера, поэтому органические остатки захороняются в донных отложениях в малоразрушенном состоянии.

Одним из главных компонентов органического вещества этих районов (особенно осадков Кондопожской губы) являются стойкие трудноминерализуемые остатки – целлюлоза, гуминовые и фульвовые кислоты, для которых характерно широкое отношение C/N. Доля лабильного C_{орг} незначительна (0.02–0.05 %). В толще отложений содержание углерода и азота претерпевает значительные колебания. Чаще всего с глубиной увеличивается концентрация первого и существенно уменьшается количество второго. Особенно четко проявляются тенденции изменения характера осадков Кондопожской губы. Так, работами 1964 г. установлено, что антропогенное влияние носило локальный характер, концентрировалось преимущественно в зоне поступления стоков ЦБК и убывало по мере удаления от нее. По данным 1970 г., эта зона увеличилась на 4 км в глубь озера. Исследования 1982 г. показали, что антропогенное влияние на осадки губы прослеживается на большей части ее акватории. При этом органическое вещество обладает низкими запасами легкогидролизуемых форм, нитрификационные процессы ослаблены.

В открытых частях Центрального и Большого Онего, а также в Уницкой и Лижемской губах содержание ОВ в 5–9 раз ниже, чем в выше-названных заливах. Самое низкое количество $C_{орг}$ отмечено в донных отложениях южного мелководья и Повенецкого залива (1.5–2.8% соответственно). Установлено, что ОВ этих районов преимущественно автохтонного происхождения. Значительно меньшую долю составляет аллохтонный органический материал, на что косвенно указывают соотношение C/N (8), содержание гуминовых веществ (1.2%) и гуминовый коэффициент (около 18%).

Обобщая вышеизложенное, можно заключить, что современное состояние донных отложений Онежского озера удовлетворительное. Характер осадков центральной глубоководной части озера за последние 20 лет практически не изменился. Содержание как органических веществ, так и биогенных элементов осталось невысоким. Противоположное представляют собой изолированные губы, служащие приемниками сточных вод. Обнаружено, что повышенные концентрации всех химических ингредиентов, наблюдаемые в осадках северных частей Кондопожской, Петрозаводской и Большой губ Повенецкого залива, являются следствием антропогенного влияния. По сравнению с 1964–1970 гг. площадь их в указанных районах значительно увеличилась.

6. ГИДРОБИОЛОГИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ОЗЕРА

6.1. Бактериопланктон

Пространственно-временное распределение бактериопланктона в Онежском озере изучено сравнительно неплохо [5, 6, 202]. Лимническая неоднородность озера, условно разделенного на центральный, периферийный и прибрежный районы, характеризуется и различным распределением бактериопланктона. Его средняя плотность в воде Центрального плеса составляет 0.1–0.3 млн кл./мл, число гетеротрофов – менее 100–270 кол./мл наряду с невысокой первичной продукцией – 0.05–0.2 мг $C/(л \cdot сут)$ [215], что соответствует экосистемам олиготрофного типа, концентрация же микроорганизмов в прибрежном районе – более 1 млн кл./мл (Кондопожская и Петрозаводская губы, табл. 38) – экосистемам мезотрофного типа [6, 251].

Многолетнее исследование отдельных районов Онежского озера – Большого Онего; Повенецкого залива, Петрозаводской и Кондопожской губ – позволило проследить характер изменений динамики развития и структуры микробных ценозов в условиях антропогенного воздействия как на водосбор, так и непосредственно на водоем. Исследования проводились по общепринятым в водной микробиологии методикам [198, 200, 231].

Речной сток в Онежского озера, интегрально отражающий взаимодействие водосбора и прибрежного района озера, представляет значительное количество рек и ручьев (см. гл. 1). Водам притоков Повенецкого залива (Кумса и др.), дренирующих кристаллические породы, свойственна повышенная минерализация. Плотность бактериопланктона в них низка и составляет в среднем 1.15 млн кл./мл. Петрозаводская и Кондопожская губы находятся в зоне влияния западного речного стока – рек Шуи, Суны и других с характерным для них повышенным содержанием гуминовых веществ [216]. Разнокачественность бактериопланктона в стоке проявляется в повышенном содержании гетеротрофов – индикаторов органического вещества, которое в р. Шуе, а также в протекающих по территории г. Петрозаводска реках Лососинке и Неглинке колеблется в пределах 1600–6500 кол./мл, т. е. их количество здесь равно 0.16–0.65% в отличие от воды северных рек (табл. 39), где оно составляет всего 0.01–0.09%.

Большая губа Повенецкого залива испытывает антропогенное воздействие расположенных на ее побережье промышленных центров – г. Медвежьегорска, пос. Повенца и других. Сообщаемость губы

Таблица 38

Численность и биомасса бактериопланктона
в отдельных районах Онежского озера

Район	Период наблюдений, гг.	Общая численность микроорганизмов, млн кл./мл	Биомасса, мг/л	Литературный источник
Центральный	1964–1972	0.18 (0.07–0.37)	–	[5]
Периферийный	1964–1972	0.29 (0.19–0.60)	–	Тот же
Прибрежный	1964–1972	0.35 (0.12–1.08)	–	” ”
Великая губа	1967–1968	0.54 (0.35–1.49)	0.33–0.69	[6]
Кижские шхеры	1967–1968	0.51 (0.45–0.52)	0.34–0.38	Тот же
Кондопожская губа	1967–1968	1.17 (0.52–2.0)	0.81–0.90	” ”
Петрозаводская губа	1967–1968	0.92 (0.60–1.1)	0.57–0.64	” ”
	1976–1979	1.4 (0.1–4.0)	0.2–1.03	[53]
Большое Онего	1967–1968	0.55 (0.45–0.67)	0.36	[5]
		0.58 (0.52–0.69)	0.38	
	1978	0.70 (0.16–1.8)	0.24 (0.14–0.45)	[93]
	1979	0.63 (0.25–1.8)	0.19 (0.13–0.50)	Тот же

Примечание. Приведены средние величины численности микроорганизмов, в скобках – пределы колебаний.

Таблица 39

Микробиологическая характеристика отдельных притоков Онежского озера

Реки	Общая численность микроорганизмов, млн кл./мл	Гетеротрофы, кол./мл (%)
Шуя	2.0–2.4	4000–6000 (0.2–0.25)
Лососинка, Неглинка, Деревянка, Ужесельга и др.	1.0–2.3	1600–6500 (0.16–0.65)
Кумса, Вичка и др.	0.5–1.8	100–860 (0.001–0.09)

с основным плесом залива определяет ее водный режим, идентичный озерному. Величины плотности бактерий планктона, по данным 1967 г., достигающие здесь 0.1–0.3 млн кл./мл, и число гетеротрофов менее 100 кол./мл близки к озерным показателям.

Антропогенная нагрузка на водоем проявляется в повышенном содержании микроорганизмов в прибрежной зоне (0.19–0.98 млн кл./мл). Число гетеротрофов в местах впадения малых рек Вички и Кумсы, а также в районе сброса вторичного стока г. Медвежьегорска достигает 2–5 тыс. кол./мл. Характерным для данного района является развитие стойких ценозов углеводородоразрушающих бактерий. За последние 2 десятилетия антропогенная нагрузка на залив значительно увеличилась за счет пуска ряда промышленных предприятий, стоки которых сбрасываются в губу (канифольно-экстракционный завод и др.).

Таблица 40

Общая численность микроорганизмов (млн кл./мл)
в заливе Большое Онего

Район залива	1978 г.			1979 г.		
	lim	M ± m ₉₅	V, %	lim	M ± m ₉₅	V, %
Глубоководный	0.16–1.8	0.70 ± 0.20	38	0.25–1.8	0.63 ± 0.14	27
Прибрежный	0.47–2.5	0.93 ± 0.20	66	0.36–1.7	0.72 ± 0.22	37

Примечание. Здесь и в табл. 42, 44, 45 lim – пределы; M ± m₉₅ – средняя ошибка средней; V – коэффициент вариации.

Таблица 41

Средние за вегетационный сезон
показатели развития бактериопланктона
в глубоководном и прибрежном районах

Район залива	Средняя численность бактерий, млн кл./мл	Биомасса бактерий, сырая масса, г/м ³	Продукция, г/м ³		Р/В-коэффициент	
			сутки	сезон	сутки	сезон
Глубоководный	0.66 ± 0.17	0.19–0.24	0.05–0.08	6.4–8.6	0.29	34
Прибрежный	0.83 ± 0.21	0.23–0.47	0.11	18.5	0.40	53

Залив Большое Онего является продолжением Центрального плеса озера. Сообщаемость и высокая динамическая активность водных масс определяют их сходство. В заливе могут быть выделены прибрежный и глубоководный районы. По ряду микробиологических показателей (табл. 40) прибрежная зона соответствует водоемам мезотрофного типа. Глубоководный район беднее микрофлорой, и она функционально менее активна [254]. Однако в его трофогенном (0–10 м) слое количественные характеристики бактериопланктона идентичны таковым прибрежной зоны.

По общей численности микроорганизмов, их биомассе, продукции и гетеротрофной активности глубоководный район является олиготрофной экосистемой, но по величине продукции и Р/В-коэффициенту в трофогенном слое соответствует мезотрофному типу (табл. 41).

Черты олиго- и мезотрофии характерны для глубоководного района, занимающего промежуточное положение между Центральным плесом и прибрежной зоной, обусловлены высокой динамической активностью разнородных водных масс и отражают его транзитный характер. По величине бактериальной продукции и Р/В-коэффициенту данные по заливу Большое Онего соответствуют лимитам, полученным для олиготрофных озер [73].

Сброс в Кондопожскую губу неочищенных сточных вод целлюлозно-бумажного комбината в течение нескольких десятилетий привел к стойкому изменению ее режима. Накопление отходов в районе сброса сопровождалось развитием здесь анаэробных процессов с последующим поступлением сульфидов, аммония и других веществ в водную толщу. Вовлечение трансформированных вод в процесс внутреннего водообмена способствовало распространению антропогенной составляющей поли- и мезосапробного характера на значительной площади губы.

Количественные характеристики бактериопланктона — его численность (0.4–3.9 млн кл./мл), биомасса (0.9–8.9 мг/л), Р/В-коэффициент (0.15–0.45, средний 0.31) — наряду с числом гетеротрофов 10–4000 (при среднем значении 400) кол./мл близки к показателям водоемов мезотрофного типа. При сравнении материалов, полученных в 1982 г., с результатами исследований 1970 г. обнаруживается уменьшение амплитуды колебаний общей численности микроорганизмов на фоне распространения антропогенного стока на большей части площади губы. Вовлечение трансформированных вод в процесс внутреннего водообмена определяет и гетерогенность структуры водных масс по концентрации гетеротрофов: при значениях менее 100 кол./мл они близки к природным озерным водам, при $n \cdot 100$ кол./мл¹ — характерны для вод губы и при $n \cdot 1000$ кол./мл — для трансформированного вторичного стока.

Разброс данных по распределению гетеротрофов ($V = 89–151\%$)² свидетельствует о неоднородности водных масс, обусловленной ветровым и динамическим режимами и наиболее четко проявляющейся по сезонам (табл. 42). В период весеннего прогрева влияние трансформированных вод прослеживается по всей акватории губы. Летом отмечается интенсивная биохимическая трансформация в наиболее прогретом (до 20 м) слое с последующим перераспределением трансформированных вод по акватории губы осенью. В период ледостава наиболее сильно подвержены влиянию антропогенного стока придонные горизонты, включающие глубоководный район основного плеса губы.

Наличие в составе сточных вод ЦБК лигносульфоновых кислот сопровождается развитием бактерий, разлагающих лигносульфаты. Их процент от гетеротрофов колеблется в пределах 20–40. Увеличение значений микробиологических характеристик по всей акватории губы наряду с качественными изменениями состава бактериоценозов свидетельствует о существенных изменениях природного бактериального фона.

Петрозаводская губа — объект комплексного водопользования г. Петрозаводска, его промышленной зоны. Основной приток, впадающий в северо-западную часть, — р. Шуя определенным образом влияет на ее режим. Годовой расход реки в 1.5 раза превышает объем водных масс губы [97]. В период ледостава шуйские воды занимают до 60% объема последних. Интенсивное сельскохозяйственное освоение площади

водосбора сопровождается внесением большого количества органического вещества и биогенов [53]. Влияние рек Неглинки и Лососинки, водосборы которых охватывают территорию города, ограничено прибрежной зоной.

Своеобразие гидрологического режима губы с высокой динамической активностью, развитием циклональных и антициклональных циркуляций определяет и распределение антропогенного стока, направленность микробиальных процессов в трансформации и утилизации поступающего органического вещества и биогенов.

В распределении микроорганизмов по акватории губы наряду со свойственными для каждого сезона особенностями отмечалась общая закономерность — их наибольшая концентрация была сосредоточена в районе городского побережья (табл. 43). Аккумулированные в период ледостава шуйские воды с концентрацией бактериопланктона более 1 млн кл./мл в период формирования термобара (3-я декада мая — 1-я декада июня) по мере выхода его за пределы губы заполняют всю ее котловину. Разрушение термобара сопровождается усилением водообмена трансформированных вод губы с озерными. При этом в летний период отмечается выравнивание микробиологических характеристик как по акватории, так и по вертикали. Осенью на фоне равномерного распределения бактериопланктона по акватории губы отмечается уменьшение абсолютного значения показателей. Реакция микробных ценозов на антропогенное воздействие проявляется не только в их количественном увеличении, но и в развитии стойких биоценологических группировок колиформных бактерий по всей акватории исследованного района.

Влияние трансформированных вод губы прослеживается и в прилегающем к ней периферийном районе озера (Петрозаводское Онего). Средняя плотность бактериопланктона в районе взаимодействия прибрежных водных масс с озерными достигает 0.96 млн кл./мл (табл. 44, 45). Пространственная неоднородность распределения его по акватории и вертикали обусловлена преимущественно динамикой водных масс. В период ледостава при ограниченном водообмене влияние антропогенного стока (сброс вторичного стока города) прослеживается в виде очагов колисапробного характера, локализованных в придонных горизонтах глубоководных (до 20 м) станций и прибрежной зоне. Весной трансформированные водные массы с равномерным распределением бактериопланктона прослеживаются на значительной площади исследованного района, отделенного от холодных (температура ниже 4 °С) озерных вод фронтом термобара.

Гетерогенность водных масс по распределению гетеротрофов летом является следствием усиления взаимодействия с озерными водами, а также интенсификация процессов бактериального самоочищения на фоне благоприятных летних температур. Интенсивное вертикальное перемешивание в позднелетний и осенний периоды способствует нагону озерных вод, обуславливая их преобладание (концентрация бактерий 0.3–0.5 млн кл./мл) по всей акватории Петрозаводского Онего. Высокая динамическая активность водных масс, вызванная

¹ $n = 1–9$.

² Коэффициент вариации.

Т а б л и ц а 42
Пределы колебаний, средние значения численности бактериопланктона,

Время наблюдений	Бактериопланктон		
	численность, млн кл./мл	биомасса, мг/л	V, %
Июнь-октябрь 1982 г.	0.9 (0.7-3.9)	3.0 (2.1-4.2)	34 (19-53)
	1.2 (0.4-3.4)	3.9 (2.7-4.6)	45 (27-62)
Март 1984 г.	0.8 (0.5-1.6)	2.1 (0.9-4.4)	32
	1.3 (0.5-3.0)	4.0 (1.3-8.9)	62

П р и м е ч а н и е. Над чертой – поверхность, под чертой – дно.

Т а б л и ц а 43
Пределы колебаний и средние значения общей численности и гетеротрофов (кол./мл – под чертой)

Время наблюдений	Городской берег, глубина, м		Середина губы,
	0.5-5	10-прид.	0.5-5
27 II-4 III	1.9 (1.1-3.2)	1.7 (1.1-2.0)	1.3 (0.6-1.7)
	130 (10-360)	1000 (20-8000)	20 (10-60)
29 V-9 VI	1.3 (0.2-3.3)	0.6 (0.1-1.0)	0.6 (0.06-0.8)
	430 (20-2000)	40 (10-120)	60 (20-140)
26 VII-4 VIII	1.7 (1.1-2.7)	1.1 (0.6-2.0)	1.1 (0.1-2.0)
	370 (10-1440)	330 (10-1300)	250 (110-390)
14 IX-14 X	2.2 (0.6-4.0)	-	2.6 (2.0-3.0)
	2000 (30-9000)	-	66 (20-280)

П р и м е ч а н и е. Прид. – придонный слой.

Т а б л и ц а 44
Распределение численности бактериопланктона (млн кл./мл), по акватории Петрозаводского

Время наблюдений	Бактериопланктон			lim
	lim	M ± m ₉₅	V, %	
Апрель	0.61-1.77	1.10 ± 0.11	33	10-1270
Июнь	0.88-2.99	1.30 ± 0.13	39	30-1720
Июль	0.63-1.49	0.99 ± 0.07	25	450-6000
Август	0.68-1.18	0.96 ± 0.04	16	80-1780
Сентябрь	0.32-0.56	0.45 ± 0.02	15	30-2000

гетеротрофов и лигносульфоновых бактерий в Кондопожской губе

Гетеротрофы		Лигносульфоновые, кол./мл
кол./мл	V, %	
570 (10-3600)	110 (94-151)	10-740
680 (10-2000)	109 (102-120)	10-630
540 (10-3600)	121	10-1000
1550 (10-3800)	89	-

микроорганизмов (млн кл./мл – над чертой) в Петрозаводской губе в 1986 г.

глубина, м	Противоположный берег, глубина, м		Среднее за сезон
	10-прид.	0.5-5	
1.9 (1.2-2.9)	0.6 (0.3-0.8)	1.4 (0.4-2.4)	1.4 (0.3-3.2)
380 (10-1400)	-	-	380 (10-8000)
0.7 (0.5-0.9)	-	0.8 (0.7-0.9)	0.8 (0.06-3.3)
60 (20-150)	60 (20-100)	50 (20-90)	120 (10-2000)
0.9 (0.1-2.0)	0.3 (0.2-0.4)	0.5 (0.06-4.4)	0.9 (0.1-2.7)
70 (40-120)	140 (70-420)	90 (10-200)	200 (10-1440)
-	-	-	2.4 (0.6-4.0)
180 (10-760)	15 (10-30)	30 (20-50)	460 (10-9000)

гетеротрофов в вегетационный сезон 1981 г. Онега

Гетеротрофы				
кол./мл		%		
M ± m ₉₅	V, %	lim	M ± m ₉₅	V, %
650 ± 136	66	0-0.45	0.17 ± 0.051	89
270 ± 99	146	0-0.05	0.027 ± 0.004	69
2440 ± 522	77	0.01-1.18	0.46 ± 0.098	74
800 ± 139	68	0.01-0.37	0.17 ± 0.035	79
1100 ± 209	68	0.01-0.79	0.36 ± 0.099	99

Таблица 45

Микробиологическая характеристика
прибрежного района Петрозаводской губы
и периферийного Петрозаводского Онего

Район	Общая численность микроорганизмов, млн кл./мл			Число гетеротрофов, кол./мл		
	lim	M ± m ₉₅	V, %	lim	M ± m ₉₅	V, %
Петрозаводская губа	0.06–4.0	1.3 ± 0.20	57	10–9000	290 ± 100	68
Петрозаводское Онего	0.62–1.6	0.96 ± 0.07	25	120–2550	1050 ± 220	85

сменой синоптических ситуаций, не позволяет разграничить данный район по степени влияния антропогенного стока, за исключением наибольшей концентрации микроорганизмов в районе западного побережья, прилегающего к промышленной зоне города [42].

Из вышеизложенного следует, что формирование микробных ценозов в отдельных районах Онежского озера в значительной степени определяется антропогенным стоком как с водосбора, так и с прилегающей к водоему территории, его спецификой, объемом, продолжительностью воздействия. Изменение режима проявляется не только в количественном увеличении микробиологических показателей, но и в развитии стойких биоценологических группировок как следствие нарушения естественного состояния экосистемы. Так, преобладание деструкционных процессов в условиях сброса сточных вод целлюлозно-бумажной промышленности сопровождается значительным потреблением кислорода, развитием анаэробных процессов с последующим ухудшением качества воды, насыщенной продуктами неполной биохимической трансформации (Кондопожская губа). В условиях бытового водопользования при поступлении коммунальных вод характерным является развитие колиформных бактерий, представляющих потенциальную эпидемиологическую опасность (Петрозаводская губа). Индикатором скопления нефтепродуктов служит развитие нефтеокисляющих бактерий (Большая губа Повенецкого залива).

Объем водных масс, участвующих в разбавлении антропогенного стока, их динамика определяют самоочистительный потенциал водоема. Преобладание низких температур в течение года затормаживает процесс биохимической трансформации сточных вод и способствует накоплению их стойких компонентов.

Пользуясь средними за вегетационный сезон значениями времени генерации (50–60 ч), биомассы и продукции бактерий, мы рассчитали бактериальную деструкцию для отдельных районов Онежского озера. Коэффициент усвояемости (K₂) приняли равным 0.25 [39, 49]. Сравнение полученных результатов с данными по первичной продукции [228, 230] свидетельствует о существенной роли поступающего в водоемalloхтонного вещества в развитии и направленности бактериальных

Таблица 46

Средние значения бактериальной биомассы (B),
продукции (P), P/B-коэффициента и деструкции (D)
в отдельных районах Онежского озера

Район исследований	B, г/м ³	P, г/м ³	P/B, сут	D, г C/м ³
Большое Онего				
Глубоководный	0.21	0.07	0.33	0.28
Прибрежный	0.35	0.11	0.31	0.40
Петрозаводская губа	1.3	0.55	0.41	0.57
Кондопожская губа	0.39	0.12	0.31	0.18

процессов. Наибольшая величина деструкции отмечена в Петрозаводской губе (табл. 46).

Влияние антропогенного стока в Онежском озере в настоящее время носит локальный характер и ограничено зоной его непосредственного воздействия (Петрозаводская и Кондопожская губы и др.). Сброс сточных вод через глубинные рассеивающие выпуски (горколлектор, ЦБК) привел к увеличению зоны влияния антропогенной составляющей стока (по колиформным, лигнофульфовым бактериям, гетеротрофам и др.) на фоне некоторой стабилизации режима по всей акватории вышеуказанных заливов.

Сложность гидродинамической структуры Онежского озера способствует аккумуляции антропогенного стока в губах с последующим вовлечением его в определенные гидрофизические фазы в процессе водообмена трансформированных прибрежных и вод Центрального плеса.

6.2. Фитопланктон

Фитопланктон Онежского озера изучен сравнительно хорошо. История его альгологических исследований дана в трудах Института озероведения АН СССР [63]. В 60-е гг. впервые на Онежском озере были получены достаточно полные сведения о флористическом составе фитопланктона, его биомассе, сезонной динамике и пространственном распределении [156–158]. Проведены измерения интенсивности фотосинтеза радиоуглеродным методом [215, 216], определено содержание фотосинтетических пигментов [192], что позволило получить представление об уровне продукционных возможностей различных участков озера. Позднее методом планируемых добавок изучалась потребность фитопланктона озера в биогенных элементах [139, 161].

Исследования последних лет, характеризующие состояние фитопланктона, его первичную продукцию, содержание хлорофилла в отдельных районах озера, находящихся в условиях как естественного, так и антропогенного стока (Петрозаводская губа, Кондопожский залив), позволяют отметить тенденции его изменений за прошедшее десятилетие [139, 228–230].

6.2.1. Общая характеристика

В настоящее время фитопланктон Онежского озера представлен 431 видом и разновидностями водорослей из 7 систематических групп: Суанопхита — 81 вид, Хрисопхита — 30, Вацилларифита — 155, Ругрофита — 12, Еугленопхита — 14, Хантофита — 5, Хлорофита — 30 видов. Это на 48 таксонов больше, чем было приведено ранее [156]. Более половины из них — золотистые и эвгленовые водоросли. Развитие последних ограничено участками эвтрофируемых губ, где специальных исследований в прошлые годы не проводилось. Наиболее разнообразно представлены диатомовые, зеленые, синезеленые и золотистые водоросли. В их число вошли массовые виды, создающие основной фон онежского фитопланктона. Уровень их максимального количественного развития по сравнению с предыдущими годами в целом изменился незначительно. В настоящее время в состав массовых включено 10 новых видов (табл. 47).

Природные особенности различных районов озера наряду со степенью хозяйственного освоения его водосбора оказывают влияние на формирование планктонных фитоценозов, их динамику и уровень количественного развития. В глубоководном районе озера, в состав которого входят Центральный плес и залив Большое Онего, количественные показатели фитопланктона ($0.1-0.6 \text{ г/м}^3$) соответствуют лимитам, определенным для олиготрофных водоемов. В Петрозаводской и Кондопожской губах, испытывающих значительную антропогенную нагрузку, с увеличением количественных характеристик ($0.5-2 \text{ г/м}^3$) происходят некоторые изменения структуры ценоза.

Значительный по площади открытый район Онежского озера с преобладанием глубин свыше 30 м отличается сравнительным однообразием лимнологических условий, что отражается и в характере развития планктонной альгофлоры, представленной в основном диатомово-золотистым комплексом. Особенности термического режима этого района (медленный прогрев водных масс, длительный период изолированности в пределах теплоинертной области) обуславливают некоторые важные характеристики *Melosira islandica* subsp. *helvetica* — наиболее массового представителя диатомового комплекса, определяющего продукционный потенциал водоема. Так, с началом прогрева водных масс озера и образованием термического бара развитие *Melosira* в Центральном плесе озера продолжается вплоть до конца июня, а в отдельные годы и весь июль. В течение лета в подкупольных водах образуются ее массовые скопления с сохраняющимся живым протопластом [156]. В наиболее продуктивный для озера поздневесенний период максимальные показатели фитопланктона достигают предельных для этого района величин (табл. 48).

Глубоководный залив Большое Онего имеет значительный водообмен с открытым плесом озера. В его пределах выделяются водные массы глубоководной части, идентичные водам Центрального плеса, и район мелководий. Особенности развития водорослей по акватории Большого Онего, отличающегося разнообразием экологических условий (глубоководный участок, открытая литораль, закрытая литораль),

Т а б л и ц а 47

Состав массовых видов фитопланктона Онежского озера и их максимальная численность (тыс. кл./л)

Вид	1964—1967 гг.	1976—1984 гг.
Суанопхита		
<i>Coelosphaerium kuetzingianum</i>	184000	224000
<i>Merismopedia elegans</i>	36800	50400
<i>Oscillatoria limosa</i>	160000	30000
<i>O. tenuis</i>	—	80000
<i>O. planctonica</i>	—	120000
<i>Anabaena hassalii</i>	—	332000*
<i>Lyngbia endophytica</i>	—	120000
Хрисопхита		
<i>Dinobryon divergens</i>	429000	760000
<i>D. bavaricum</i>	—	270000
<i>D. sociale</i> var. <i>sociale</i>	120800	42000
<i>Stenokalyx densata</i>	—	39000
<i>Melosira islandica</i> subsp. <i>helvetica</i>	468800 1542000*	1100000
<i>M. italica</i> subsp. <i>italica</i>	198400	480000
<i>M. distans</i> var. <i>alpigena</i>	316000	320000
<i>M. granulata</i> var. <i>granulata</i>	46400	25000
<i>Asterionella formosa</i>	447000	430000
<i>Fragilaria crotonensis</i>	198000	83000
<i>F. capucina</i> var. <i>mesolepta</i>	80000	34000
<i>Tabellaria fenestrata</i>	174400	220000
<i>Diatoma elongatum</i>	—	38400
Хлорофита		
<i>Sphaerocystis schroeteri</i>	51200	60000
<i>Coenocystis planctonica</i>	—	444000*
<i>Crucigenia triangularis</i>	25600	—
<i>Pediastrum boryanum</i>	25600	32000
<i>Ankistrodesmus pseudomirabilis</i>	—	256000
<i>Scenedesmus quadricauda</i>	—	32000

* Единственный случай такого большого развития.

дают представление о ходе сезонной динамики фитопланктона в целом по озеру. Характерное для Онежского озера состояние фитопланктона в период весеннего прогрева водных масс, отмеченное Н. А. Петровой [156], прослеживается и в заливе.

Так, к началу июня в хорошо прогреваемом участке закрытой литорали в массе развивается *Melosira islandica* (до 2 г/м^3). В то же время в центральном участке залива и районе открытой литорали биомасса ее в 5 раз меньше (0.46 г/м^3). С прогревом поверхностных вод до $13 \text{ }^\circ\text{C}$ (середина июня) активность развития *M. islandica* снижается,

Таблица 48

Количественные показатели фитопланктона
в открытом районе Онежского озера

Годы	Весна	Лето	Осень
Численность, тыс. кл./л			
1966–1967	122.7 (774.3)	40.7 (357.6)	32.8 (214.2)
1978–1979	360.0 (1075.0)	235.0 (1070.0)	148.6 (550.0)
1980–1981	580.0 (1890.0)	460.0 (800.0)	–
Биомасса, г/м ³			
1966–1967	0.27 (1.35)	0.03 (0.11)	0.01 (0.14)
1978–1979	0.72 (1.40)	0.37 (1.00)	0.24 (1.20)
1980–1981	1.30 (2.84)	0.58 (1.20)	–

Примечание. Здесь и в табл. 49 приведены средние величины, в скобках – максимальные.

возрастает роль *M. italica* и *M. distans* var. *alpigena*. В планктоне в большом количестве (до 50% численности и 20% биомассы от общей) появляются золотистые водоросли. Позже в закрытой литорали они достигают максимальных величин своего годового развития (1 млн кл./л, 0.68 г/м³). Vegetирует преимущественно *Dinobryon divergens* (760 тыс. кл./л, 0.5 г/м³). В начале июля *M. islandica* исчезает из планктона и только в небольших количествах встречается исключительно в центральной части залива.

В течение лета обильно развиваются синезеленые и зеленые водоросли. К августу ведущая роль переходит к летним диатомовым – *Asterionella formosa* и *Tabellaria fenestrata*, суммарная биомасса которых составляет 0.4 г/м³. С началом осенней циркуляции водных масс, в сентябре, имеет место второй подъем в развитии фитопланктона, который обеспечивает *Tabellaria fenestrata* (0.7 г/м³). Возрастает роль синезеленых водорослей *Coelosphaerium kuetingianum* и *Oscillatoria planctonica*. В закрытой литорали новую вспышку дают золотистые. К концу октября по всему заливу развивается фитопланктонный комплекс с преобладанием *Asterionella formosa* (до 0.3 г/м³).

Полученные нами количественные показатели фитопланктона в заливе Большое Онего и Центральном плесе озера (1978–1981 гг.) заметно увеличились в сравнении с наблюдавшимися в 60-е гг. Значительно возросла роль летнего и осеннего фитопланктона (табл. 48), что отмечает и Н. А. Петрова [160]. Все это свидетельствует о том, что процесс эвтрофирования начинает проникать и в центральную часть озера. Тем не менее средние величины численности и биомассы фитопланктона пока еще сравнимы с оценками для олиготрофных водоемов [57, 92, 136, 137].

Петрозаводская губа – один из заливов Онежского озера, испытывающих антропогенную нагрузку как водосборного бассейна р. Шуи, так и хозяйственно-бытовых стоков города. Шуя вносит в губу большое

Таблица 49

Количественные показатели фитопланктона
в Петрозаводской губе и прилегающих районах

Район	Годы	Весна	Лето
Петрозаводская губа	1966–1967	<u>0.64 (2.20)</u> 371 (1070)	<u>0.13 (0.15)</u> 40.0 (140)
	1976	<u>1.25 (1.60)</u> 700 (1500)	<u>0.86 (1.00)</u> 290.5 (700)
Петрозаводское Онего	1981	<u>2.08 (5.02)</u> 620 (2040)	<u>1.30 (6.00)</u> 990.0 (2000)
	1980–1981	<u>2.70 (5.56)</u> 940 (1700)	<u>0.77 (2.50)</u> 340.0 (1120)

Примечание. Здесь и в табл. 50, 51 над чертой – биомасса, г/м³; под чертой – численность, тыс. кл./л. Приведены средние величины, в скобках – максимальные.

количество водорослей. Это обычные виды поздневесеннего озерного планктона – *Melosira*, *Diatoma*, которые к концу мая в бассейне реки уже заканчивают свое развитие. В водных массах, поступающих через Соломенскую протоку, количественные показатели фитопланктона значительно ниже, чем в открытой части губы. Высокая динамическая активность вод района способствует распространению шуйского планктона по всей акватории губы. До конца июня в пределах теплоактивной области он прослеживается вдоль западного берега, доходя до южной части озера [156].

Основу биомассы фитопланктона Петрозаводской губы составляют типичные представители Онежского планктона – *Melosira islandica* и *M. distans* var. *alpigena*. В последних числах мая основной доминант весеннего комплекса в массе вегетирует у поверхности (до 0.6 г/м³). В начале июля количество поздневесеннего фитопланктона достигает значения более чем 1 г/м³, летом эти показатели снижаются (табл. 49). Менее интенсивно, чем весной, развивается *M. islandica*. Субдоминантами летнего планктона становятся *Tabellaria fenestrata* и *Asterionella formosa* (до 0.1 г/м³). Сезонные изменения количественных характеристик фитопланктона в Петрозаводской губе (1976 г.) имеют общие черты с другими районами озера, в частности с заливом Большое Онего, однако по уровню его развития в целом она продуктивнее последнего (табл. 48, 49), что соответствует также данным более ранних исследований [156, 157].

Значительно богаче представлен фитопланктон на выходе из губы, что несомненно связано с ее усиливающимся эвтрофированием. Весной в районе Ивановских островов и в южной части озера максимальная биомасса водорослей превзошла все ранее полученные для западного района величины и составила более 5 г/м³. Ход сезонной динамики

Таблица 50

Количественные показатели
фитопланктона Кондопожской губы

Год	Весна	Лето
1966	0.040	0.030
	58.8	16.5
1967	0.500	0.030
	186.6	65.0
1970	0.068	0.025
	40.0	30.0
1982	0.642	0.450
	370.0	235.0

в этом районе определяют диатомовые. На их фоне в летнем планктоне в отличие от Петрозаводской губы возрастает значение синезеленых и зеленых водорослей, биомасса которых достигает 0.200 г/м^3 . Обильно вегетируют золотистые (0.054 г/м^3). Количественные показатели фитопланктона летом в сравнении с весенним периодом достаточно высоки (табл. 49).

Нарушение естественного режима Кондопожской губы под влиянием сточных вод сульфатного производства целлюлозы заметно сказывается на структуре фитопланктонных сообществ, динамике их численности и биомассы в различных участках водоема. Фитопланктон губы в основном сохраняет доминирующий состав водорослей, характерный для озера в целом. Имеют место локальные вспышки хлорококковых (показателей органического загрязнения) и синезеленых водорослей. Возрастает таксономическое разнообразие эвгленовых. Уровень количественного развития фитопланктона невысок (табл. 50): колебания общей биомассы составляют весной — $0.1-1.5$, летом — $0.07-0.47 \text{ г/м}^3$. Распределение ее по акватории губы имеет тенденцию нарастания по мере удаления от вершинной части (зоны наибольшего антропогенного влияния) в район открытого плеса (табл. 51).

Весенний фитопланктон губы представлен обычным для этого периода составом руководящих видов. Повсеместно преобладает *Melosira islandica*, которая в открытом плесе губы достигает 2 г/м^3 . Сопутствуют ей *M. distans* var. *alpigena*, *M. italica* и *Asterionella formosa* (до 0.1 г/м^3). Обильно вегетируют синезеленые и хлорококковые водоросли, составляющие в сумме до 100 тыс. кл./л с биомассой 0.01 г/м^3 . В летнем планктоне ведущая роль переходит к *Tabellaria fenestrata* и *Asterionella formosa* (до 0.25 г/м^3). Количественные показатели на основной акватории губы по сравнению с весной снижаются, однако в районе влияния сточных вод численность водорослей оказалась в 3, а биомасса в 2 раза выше за счет массового развития хлорококковых (*Ankistrodesmus*) и синезеленых (*Coelosphaerium*) водорослей (до 300 тыс. кл./л). В центральной части губы

Таблица 51

Сезонная динамика численности и биомассы фитопланктона
Кондопожской губы в 1982–1984 гг.

Район	Весна	Лето	Осень	Зима
Вершина губы	0.29	0.4	0.10	0.07
	240	660	130	29
Центральный район	0.99	0.5	0.12	0.06
	360	190	50	26
Открытый плес	0.64	0.4	0.15	0.12
	290	290	70	40

и на выходе из нее возрастает роль золотистых водорослей (до 0.04 г/м^3).

С началом охлаждения водных масс осенью фитопланктон становится значительно бедней. Развивается преимущественно *Melosira islandica*, осенний максимум которой в 9 раз ниже весеннего. В вершине губы еще значительна роль хлорококковых и синезеленых (до 0.01 г/м^3). Количественные показатели зимнего планктона крайне низки. Наибольшее распространение получают обычные диатомовые онежского планктона *Melosira*, *Tabellaria*, *Asterionella*. Отмечаются единичные колонии *Coelosphaerium*. Постоянно присутствуют перофитовые (*Peridinium asculiferum*). В районе выпуска сточных вод довольно часты эвгленовые — *Euglena gracilis*, *E. proxima*, *E. obtusa*.

Анализ последних лет показывает значительное увеличение биомассы фитопланктона в этом районе в отличие от наблюдаемой в 1970 г. Если учесть, что в Онежском озере „урожайные“ по фитопланктону годы чередуются с „неурожайными“ [156, 157], то по уровню его развития 1970 г. занимает равное положение в ряду с 1966 г., а 1967 г. в этом плане приближается к 1982-му (см. табл. 50). Следовательно, за период с 60-х гг. по настоящее время биомасса фитопланктона Кондопожской губы практически не изменилась. Тем не менее значительно более высокие в сравнении с полученными в прежние годы численность и биомасса фитопланктона в летний период 1982 г., массовое развитие хлорококковых и синезеленых свидетельствуют о начальной стадии эвтрофирования губы.

Известно, что процесс эвтрофирования водоемов обусловлен повышением биогенной нагрузки. Изучение потребности фитопланктона в биогенных элементах [139] показало, что развитие водорослей в Онежском озере лимитируется недостатком последних. В период максимального развития доминанта весеннего комплекса диатомовых *Melosira islandica* обнаруживается нехватка фосфора, который в условиях озера и в настоящее время содержится в минимуме. Добавка фосфора стимулирует скорость фотосинтеза и накопления хлорофилла. Присутствие его в сочетании с азотом почти в 2.5 раза повышает выход первичной продукции [161].

На более поздней стадии развития отмечается потребность в железе, которое водоросли предпочитают в сочетании с той или иной формой азота (нитратной или аммонийной). Так, „частный эффект” железа без добавки азота для *Asterionella formosa* оказывается отрицательным, для *Melosira* он положителен, но значительно ниже, чем в сочетании с аммонийным или нитратным азотом. В период особенно острого дефицита биогенов все представители планктона положительно реагируют на добавку недостающего элемента. Особенно четко эта зависимость проявляется в условиях олиготрофного озера.

6.2.2. Содержание хлорофилла

Хлорофилл — один из показателей, характеризующих степень трофности водоемов. Его содержание в водах Онежского озера невелико (табл. 52); распределение в различных районах озера носит тот же характер, что и ранее [192]. Пределы колебаний концентрации хлорофилла на основной акватории озера составляют 0.42–2.47 мг/м³, причем минимальные величины (0.42–0.8) отмечены в самом его центре [228, 229]. Полученные в последние годы для этого района аналогичные показатели выше наблюдавшихся в 60-е гг., но не выходят за пределы величин, характерных для олиготрофных водоемов. Повышенное содержание хлорофилла (в среднем 1.9–3.5 мг/м³) наблюдалось в районах эвтрофируемых Петрозаводской и Кондопожской губ. Максимальная за весь период исследований его концентрация (6.3 мг/м³) была определена летом 1981 г. на выходе из Петрозаводской губы. Значительной была она также и в районе Южного Онего (3.6 мг/м³). Количество хлорофилла в Петрозаводской губе и прилегающем районе Петрозаводского Онего почти в 5, а в Кондопожской губе и Южном Онего в 3 раза превышает величины прежних лет, что соответствует уровню мезотрофных водоемов (табл. 52).

Т а б л и ц а 52
Содержание хлорофилла (мг/м³) в фитопланктоне
Онежского озера

Район	1967–1968 гг.	1977 г.	1978–1979 гг.	1980–1982 гг.
Центральный плес и залив Большое Онего	$\frac{0.71}{0.53-0.95}$	$\frac{1.02}{0.56-1.80}$	$\frac{1.18}{0.42-2.47}$	$\frac{1.40}{1.11-1.84}$
Петрозаводская губа и Петрозаводское Онего	$\frac{0.78}{0.74-0.82}$	$\frac{2.69}{1.56-3.83}$	Наблюдений не было	$\frac{3.50}{1.08-6.30}$
Кондопожская губа	$\frac{0.71}{0.53-0.95}$	$\frac{1.23}{1.11-1.51}$	$\frac{1.43}{0.65-2.13}$	$\frac{1.90}{1.49-2.33}$
Южное Онего	$\frac{0.70}{0.62-0.78}$	Наблюдений не было	$\frac{1.31}{0.87-2.03}$	$\frac{2.14}{1.29-3.60}$

Т а б л и ц а 53

Биомасса фитопланктона (В), интенсивность фотосинтеза (Ф), содержание хлорофилла (Chl) и суточные ассимиляционные числа (САЧ), процентное соотношение хлорофилла в сырой биомассе в различных районах Онежского озера летом (июль, август)

Район	В, мг/м ³	Ф, мг/(м ² ·сут)	Chl, мг/м ³	P/B	САЧ	Содержание хлорофилла в сырой биомассе, %
1966 г.						
Центральный плес	60	32.2	0.74	1.71	43.5	1.23
1977 г.						
Центральный плес и залив Большое Онего	130	13.6	1.30	0.33	10.4	1.00
Кондопожская губа	173	28.8	1.23	0.53	23.4	0.71
Петрозаводская губа	482	76.0	2.69	0.50	28.3	0.56
1978–1979 гг.						
Центральный плес и залив Большое Онего	370	28.0	1.20	0.24	23.3	0.32

Полученные за ряд лет значения относительного содержания хлорофилла в сырой биомассе летнего фитопланктона по районам озера изменялись в пределах 0.32–1.23%. Имела место обратная зависимость между хлорофиллом и биомассой фитопланктона при дефиците биогенных элементов в водоеме, что отмечалось многими авторами. Максимальный процент хлорофилла был получен в 1966 г. для Центрального плеса озера при низкой биомассе фитопланктона и минимальном количестве хлорофилла (табл. 53). В целом величины относительного содержания последнего в сырой биомассе фитопланктона Онежского озера близки к известным из литературы [127, 138, 147].

6.2.3. Интенсивность фотосинтеза

Уровень первичного продуцирования фитопланктона в Онежском озере, наблюдавшийся в последние годы на основной акватории озера [228–230], практически не изменился и близок к значениям, отмеченным в 60-х гг. (табл. 53). Интенсивность фотосинтеза в Центральном плесе озера, по данным 1977 г., изменялась в летний период от 9 до 24 мг С/(м²·сут) и была идентична полученной Ю. И. Сорокиным и В. К. Федоровым [215]. Минимальная величина первичного продуцирования для этого района отмечалась на ряде станций в Центральном

Онего [9–13 мг С/(м³·сут)], максимальная (24) – в заливе Большое Онего. Наиболее высокими значениями интенсивности фотосинтеза выделяется часть озера, испытывающие значительную антропогенную нагрузку – Петрозаводская и Кондопожская губы [соответственно 112 и 46 мг С/(м³·сут)], а в заливе Большое Онего в 1979 г. они были выше [23–59 мг С/(м³·сут)], чем в 1977 г., и близки к таковым в эвтрофируемых районах (табл. 53). Среднесуточная продукция фотосинтеза фитопланктона в столбе воды под 1 м² за оба года летних наблюдений составляла в среднем 47.3–120.3 мг С/(м²·сут), что не выходит за пределы величин, рассчитанных по определениям Ю. И. Сорокина и В. К. Федорова [55–526 мг С/(м²·сут)] в разных районах озера [215].

Полученные для Большого Онего суточные Р/В-коэффициенты в среднем довольно низки (0.29–0.81) по сравнению с другими олиготрофными водоемами [92, 156]. Наибольшая фотосинтетическая активность фитопланктона (1.31), была отмечена в августе 1979 г., в период значительного развития нанопланктонных (зеленых, золотистых и синезеленых) водорослей, обладающих высокой интенсивностью фотосинтеза [46, 190].

Суточные ассимиляционные числа (САЧ) в Онежском озере невелики и колеблются в пределах 7–50 мг С/(мг Chl · сут). Средняя величина САЧ в открытой части озера составляет 23 мг С/(мг Chl · сут), что сравнимо с данными того же периода 1977 г. (табл. 53). Наиболее высокие величины САЧ [10–100 мг С/(мг Chl · сут)] отмечались в начале летнего периода [230], низкие (3–19) – в конце вегетационного сезона и были близки к САЧ, известным для олиготрофных водоемов [33, 57, 191].

Результаты многолетних наблюдений за фитопланктоном в различных районах Онежского озера показывают, что с повышением биогенной нагрузки на водоем возрос уровень его количественных показателей, произошли некоторые изменения в структуре фитоценозов при сохранении в целом видового состава водорослей. В настоящее время Центральный плес и залив Большое Онего, характеризующие природные воды озера по степени развития фитопланктона, с преобладанием диатомово-золотистого комплекса, соответствует статусу олиготрофного водоема. В Петрозаводской и Кондопожской губах, испытывающих влияние антропогенного стока, наряду с ростом количественных характеристик в общей биомассе фитопланктона увеличилась роль синезеленых и хлорококковых водорослей, что приближает их к водоемам мезотрофного типа. Уровень первичной продукции онежского фитопланктона в целом невелик и соответствует величинам биомассы в различных участках озера. Минимальная интенсивность фотосинтеза и низкое содержание хлорофилла отмечаются в открытой части озера. Более высокими эти показатели были в районах эвтрофируемых губ.

6.3. Протозойный плактон

Простейшие – один из обязательных компонентов водных сообществ. Наряду с бактериями и водорослями они относятся к группе организмов с коротким жизненным циклом и интенсивным метаболизмом,

которым принадлежит основная роль в круговороте веществ и энергии в природных водоемах.

Сведения о протозойном планктоне Онежского озера немногочисленны. Первые значительные исследования были выполнены лишь в 1966–1968 гг. С. И. Мажейкайте. На основании материала, собранного в нескольких районах по всему озеру (около 1000 проб), ею приводятся список видов (96), характеристика массовых форм, их численность и распределение. К сожалению, автор уделила мало внимания динамике численности и биомассы протозойного планктона в целом [113–115].

С 1976 г. нами с целью подхода к оценке роли планктонных простейших в экосистеме Онежского озера проводились наблюдения в годовом цикле на заливе Большое Онего (1977–1979 гг.), в Петрозаводской губе (1976 г.) и прилегающем к ней районе открытого озера (1987 г.), Кондопожской губе (1982, 1984 гг.) и эпизодические – в южной (июнь, август 1980 г.; июль 1981 г.; июнь 1982 г.; май 1983 г.) и центральной (июнь 1980 г.; август 1984 г.; июнь, август 1985 г.) частях озера. Были обследованы устьевые участки притоков и исток р. Свири (1986–1987 гг.). Исходный материал составил 1600 проб.

Пробы протозойного планктона отбирали по стандартной сетке станций однолитровым батометром Рутнера с поверхностного и придонного горизонтов или дробно по вертикали (чаще всего 0.5, 5, 10, 20, 40, 60 м и т. д.). Материал обрабатывали не позднее 6 ч после отбора. Подсчет, определение и измерение простейших проводили на живом материале [114, 119]. Пробы воды концентрировали без вакуума (мембранный фильтр № 6). Ядра подкрашивали ацетокармином. Видовую принадлежность устанавливали по определителю Каля [283], Н. С. Гаевской [48], С. И. Мажейкайте [116]. Индивидуальные массы частично находили расчетным методом, частично заимствовали из литературы [17, 119, 260, 268, 276].

Список простейших, выявленных в Онежском озере к настоящему времени, включает 130 наименований. Он пополнился в основном за счет малочисленных, присутствующих в планктоне кратковременно и развивающихся на локальных участках форм. Так, в виде единичных экземпляров были встречены *Campanella umbellaria*, *Carchesium polytipum*, *Cyclidium* sp., *Epistylis plicatilis*, *E. pyriformis*, *Halteria grandinella*, *Holosticha* sp., *Hamalozoon verniculare*, *Lacrymaria* sp., *Litonotus fasciola*, *Opercularia* sp., *Plagiopila* sp., *Prorodon* sp., *Saprodinium* sp., *Vorticella campannulla*, *V. convallaria*.

Развитие *Spathidium* (latum?) наблюдалось повсеместно с июня по сентябрь, но в небольшом количестве (2–16 экз./л) преимущественно в слое 0–5 м. В Кондопожской губе при обследовании в июне 1982 г. и марте, июне 1984 г. была обнаружена редкая для озера крупная инфузория *Bursaria truncatella* с численностью 2–4, иногда до 20 экз./л. Отмечена она и в сетных пробах зоопланктона (80–390 тыс. экз./м³), собранных в марте 1984 г. в основном в вершинной части губы. Кроме того, в планктоне Кондопожской губы с марта по октябрь присутствовала ранее не указанная для озера *Vorticella natans*, наибольшая численность которой (до 400 тыс. экз./м³) зафиксирована

в июне 1982 г. при средней 90 в вершине и 140 — в центральной части губы. В районах, испытывающих значительное антропогенное воздействие, на локальных участках наблюдалось развитие *Colpidium colpoda* — до 60–90 экз./л (март–апрель) и *Colpoda steini* — до 100–250 экз./л (июнь–сентябрь).

Планктонные простейшие, обитающие в Онежском озере, могут быть подразделены на 3 группы: круглогодичные (эвритермные), весенне-осенние (холодноводно-стенотермные) и летние (тепловодно-стенотермные) виды. Первые присутствуют в планктоне с ранней весны до глубокой осени, а многие из них отмечены и зимой. Наиболее интенсивно развиваются в летне-осенний период. К ним относятся *Tintinnopsis cratera*, *Tintinnidium fluviatile*, *T. fluviatile f. cylindrica*, *T. pusillum*, *Urotricha pelagica*, *Strombidium viride*, *S. mirabile*, *Strobilidium velox*, *Mesodinium acarus*, *Ascensia faurei*.

Весенне-осенние (холодноводно-стенотермные) виды появляются в водоеме в марте–апреле, максимальной численности достигают в июне при температуре 10–13 °С. Затем они исчезают (в холодные годы могут единично встречаться на протяжении всего лета) и вновь небольшой численностью появляются осенью. Эту группу составляют преимущественно крупные инфузории, такие как *Amphileptus trachelioides*, *Teuthophrys trisulca*, *Marituja pelagica*, *Stokesia vernalis*, *Cyclotrichium viride*, *Didinium nasutum*, имеющие весной ярко-зеленую окраску, а также *Bursaridium pseudobursaria* и *Stentor roeseli*.

Развитие летних (тепловодно-стенотермных) видов начинается лишь с повышением температуры воды выше 10 °С, и чем теплее лето, тем большей плотности они достигают. В эту группу входят почти все сувойки: *Vorticella anabaena*, *V. sphaerica*, *V. fasciculata*, *Vorticella sp.*₁ (на *Anabaena*), *Vorticella sp.*₂ (на *Aphanisomenon*), *Veoricella sp.*₃ (на *Dinobryon*), *Epistylis rotans*, кроме них *Spathidium (latum?)*, *Enchelius (pupa?)*, *Strongylidium lanceolatum*.

Основные закономерности изменения видового состава, численности, биомассы и пространственного распределения простейших в годовом цикле определяются лимнологической спецификой Онежского озера. Наиболее полно они были изучены на примере залива Большое Онего — глубоководного, имеющего широкую связь с Центральным плесом, испытывающего влияние преимущественно естественного стока со слабо освоенной в хозяйственном отношении территории.

Прослеживая сезонное развитие протозойного планктона, следует отметить, что наиболее благоприятным для этого периодом является весна. С одной стороны, в это время появляется достаточное количество необходимой для протистов пищи — бактерий и мелкоразмерных водорослей, с другой — количество метазойного планктона (основного потребителя простейших и их пищевого конкурента) невелико. Постепенный рост численности протозойного планктона и появление видов, характерных для весеннего сезона, наступает еще в период ледостава. Так, в середине апреля 1978 г. при температуре воды 0.5–0.6 °С подо льдом и 0.6–1.1 у дна и отсутствии сплошного снежного покрова в планктоне была явно выражена вегетация водорослей, в особенности

Peridinium aciculiferum. Среди простейших доминировали *Strombidium viride* — до 26 тыс. экз./м³, *S. mirabile* — до 47 тыс., *Strobilidium velox* — до 30 тыс., *Lembadion lucens* — до 36 тыс. экз./м³. Численность *Tintinnidium fluviatile*, *T. pusillum* и *Tintinnopsis cratera* не превышала 10 тыс. экз./м³. В виде единичных экземпляров встречались *Amphileptus trachelioides*, *Cyclotrichium viride*, *Marituja pelagica* и *Bursaridium pseudobursaria*. Общая численность колебалась от 6 до 112 (средняя 33) тыс. экз./м³ в поверхностном горизонте и от 1 до 37 тыс. (средняя 6) у дна.

После вскрытия водоема протозойный планктон по его акватории развивается неравномерно. Быстрый рост видового разнообразия, численности и биомассы происходит прежде всего в прибрежной зоне, особенно в мелководных закрытых губах, в то время как на остальной, большей, части озера на протяжении длительного времени сохраняется низкий уровень развития простейших (табл. 54). Это связано с появлением термобара и образованием термоактивной и термоинертной зон, между которыми отсутствует водообмен. В первой из них происходит накопление речных и склоновых стоков, стимулирующих развитие бактерий и водорослей — основных пищевых объектов простейших. Фронт термобара постепенно удаляется от берегов и окончательно исчезает в среднем 25 июня [225].

Таким образом, весь июнь, а часто и 1-я декада июля по показателям температуры и уровню развития планктонных организмов (на большей части акватории озера) относятся к поздневесеннему биологическому сезону. В это время для протозойного планктона характерны значительное видовое разнообразие (30), равномерность в распределении численности по вертикали, массовое развитие крупноразмерных форм (многие из которых имеют ярко-зеленую окраску, что связано с развитием в них зоохлорелл) и достижение максимальной в году биомассы. К вышеупомянутым видам присоединяются *Stokesia vernalis*, *Bursella spumosa*, *Stentor roeseli*, *Didinium nasutum*, *Teuthophrys trisulca*, *Strongylidium lanceolatum*, *Staurophrya elegans*, *Vorticella pelagica*. Представители холодноводно-стенотермной, а иногда и отдельные виды эвритермной групп (последние в закрытой литорали) достигают наивысшей плотности: *Stokesia vernalis* — до 45 тыс. экз./м³, *Amphileptus trachelioides* — до 30 тыс., *Lembadion lucens* — до 75 тыс., *Strombidium mirabile* — до 50 тыс., *S. viride* — до 120 тыс., *Urotricha pelagica* — до 140 тыс. экз./м³. Изменения численности и биомассы протозойного планктона в целом приведены в табл. 54 и на рис. 42.

Летом (июль–август) с подъемом температуры воды выше 13 °С и увеличением численности метазойного планктона происходит существенная перестройка в структуре протозойного комплекса. Полностью выпадают или значительно сокращаются в численности холодноводно-стенотермные виды. На смену им приходят тепловодно-стенотермные, среди которых наиболее массовой является *Vorticella anabaena* (до 0.3 млн экз./м³ в открытой и до 1 млн в закрытой части литорали). В отдельные годы отмечена повышенная численность *Epistylis rotans* — до 40 тыс. экз./м³, *Vorticella sphaerica* — до 100 тыс., *Spathidium (latum?)* — до 60 тыс., *Strongylidium lanceolatum* — до 35 тыс. экз./м³. В июле–августе

Таблица 54

Динамика численности (тыс. экз./м³ — над чертой) и биомассы (г/м³ — под чертой) протозойного планктона в разнотипных биотопах залива Большое Онего в период открытой воды, 1987 г.

Дата	Закрытая лито- раль, 0–4 м	Открытая лито- раль, 0–6 м	„Банка“, 0–8 м	Глубоководная зона, 0–5 м
Июнь				
2	$\frac{110}{0.046}$	$\frac{62}{0.005}$	$\frac{24}{0.002}$	$\frac{16}{0.001}$
12	$\frac{249}{0.061}$	$\frac{44}{0.061}$	$\frac{38}{0.003}$	$\frac{76}{0.007}$
17	$\frac{395}{0.237}$	—	—	—
23	$\frac{236}{0.033}$	$\frac{224}{0.200}$	$\frac{40}{0.027}$	$\frac{100}{0.040}$
Июль				
2	$\frac{96}{0.012}$	$\frac{56}{0.003}$	$\frac{168}{0.028}$	$\frac{118}{0.056}$
10	$\frac{338}{0.015}$	$\frac{40}{0.035}$	$\frac{118}{0.008}$	$\frac{105}{0.007}$
24	$\frac{1144}{0.048}$	$\frac{662}{0.025}$	$\frac{436}{0.015}$	$\frac{410}{0.017}$
Август				
3	—	$\frac{660}{0.025}$	$\frac{80}{0.004}$	$\frac{434}{0.018}$
10	$\frac{1160}{0.043}$	—	—	$\frac{26}{0.001}$
23	$\frac{84}{0.003}$	$\frac{32}{0.002}$	$\frac{20}{0.001}$	$\frac{52}{0.001}$
Сентябрь				
4	$\frac{88}{0.003}$	$\frac{30}{0.001}$	$\frac{28}{0.001}$	$\frac{84}{0.003}$
20	$\frac{260}{0.008}$	$\frac{48}{0.003}$	$\frac{62}{0.002}$	$\frac{158}{0.008}$
Октябрь				
4	$\frac{478}{0.130}$	$\frac{24}{0.002}$	$\frac{34}{0.018}$	$\frac{86}{0.005}$
19	$\frac{150}{0.004}$	$\frac{42}{0.003}$	$\frac{32}{0.002}$	$\frac{42}{0.003}$

Таблица 55

Динамика распределения протозойного планктона по вертикали (в % от общей численности под 1 м²)

Слой, м	24 VI	4 VII	14 VII	24 VII	3 VIII	13 VIII	24 VIII	4 IX	4 X
0–6	24.5	48.5	41.5	55.4	51.0	37.8	35.3	29.0	25.4
6–10	18.9	16.5	10.5	16.6	14.0	13.8	23.1	16.6	12.6
Σ0–10	43.4	65.0	52.0	72.0	65.0	51.6	58.4	45.6	38.0
10–20	34.6	18.0	30.5	17.0	24.5	26.5	28.5	27.8	32.0
20–30	22.0	17.0	17.5	11.0	9.5	22.0	13.1	26.6	30.0

максимально высокой плотности достигают многие эвритермные виды: *Tintinnidium pusillum* — до 180 тыс. экз./м³, *T. fluviatile* — до 75 тыс., *Tintinnopsis cratera* — до 750 тыс. экз./м³.

С установлением устойчивой прямой стратификации температуры воды нарушается равномерность вертикального распределения численности простейших. Наблюдения на одной станции (июнь–октябрь 1977 г.) по горизонтам 0.5, 2, 4, 6, 8, 10, 15, 20 и 30 м показали, что в период летнего прогрева увеличивается не только общая численность планктонных простейших, но и их относительное содержание в верхних горизонтах, особенно в слое 0–6 м (табл. 55). В то же время для поверхностного горизонта (0.5 м) характерны кратковременные колебания численности в значительных пределах, что связано с постоянными ветровым и волновым воздействиями. Например, на одной и той же станции 13 июля у поверхности насчитывалось 14 тыс. экз./м³, 14-го — 94 тыс., 15-го — 32 тыс., 17-го — 126 тыс. экз./м³. Существенные изменения в пространственное распределение простейших вносят апвеллинги и даунвеллинги.

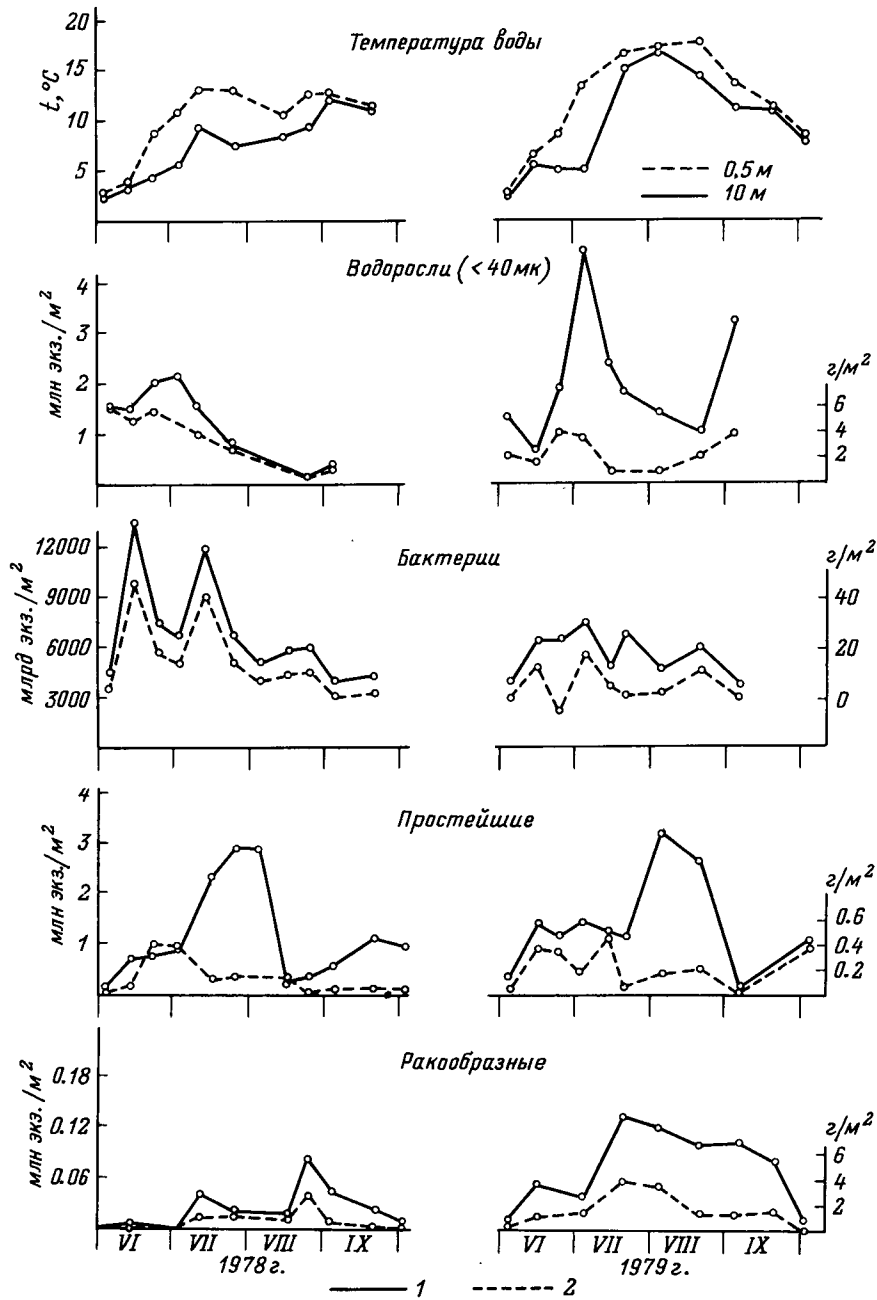
Осенью с падением температуры воды ниже 10 °С начинают исчезать тепловодно-стенотермные виды и в их числе *Vorticella anabaena*, составляющая в летнем протозойном планктоне 50–90% от общей численности. Кратковременно и в небольшом количестве вновь появляются отдельные представители холодноводно-стенотермной группы — *Amphileptus*, *Stokesia*, *Cyclotrichium*. В планктоне постепенно остаются только эвритермные виды, численность которых тоже снижается. Общая плотность протозойного планктона к концу октября не превышает в среднем 100 тыс. экз./м³ в открытой части залива и 200 тыс. — в закрытой литорали (см. табл. 54, рис. 42). Выравнивается численность простейших по вертикали (табл. 55).

Динамика развития отдельных массовых видов и целых экологических групп определяет общую картину количественных изменений протозойного планктона в течение года. В его годовом цикле наблюдаются один пик численности летом (июль–август) и один пик биомассы в поздневесенний период (июнь). Первый из них обуславливается массовым развитием эвритермных и тепловодно-стенотермных видов, а его высота — в основном численностью *Vorticella anabaena*. Второй пик связан с развитием в весенний период крупноразмерных инфузорий,

Таблица 56

Численность (тыс. экз./м³) и биомасса (г/м³)
протозойного планктона в Центральном и Южном Онего
в разные сроки наблюдений

Дата	Глубоководная зона (0–5 м)			Прибрежная зона		
	t _{0.5 м} , °C	тыс. экз./м ³	г/м ³	t _{0.5 м} , °C	тыс. экз./м ³	г/м ³
Центральное Онего						
5–7 VI 1985 г.	2.5	35	0.001	5–6	386	0.024
16 VI 1980 г.	4	42	0.005	–	–	–
8 VII 1987 г.	7	37	0.006	–	–	–
15–27 VIII 1985 г.	17–18	970	0.030	15–16	672	0.016
28–30 VIII 1984 г.	14–15	210	0.006	11.4–12	236	0.017
25–30 X 1985 г.	6–7	40	0.001	–	–	–
Южное Онего						
19–26 VI 1983 г.	3	67	0.006	9–10	284	0.041
7–8 VI 1982 г.	4.8–7.4	140	0.012	9	344	0.016
12–14 VI 1980 г.	5–8	124	0.026	7–13	190	0.033
21–22 VII 1981 г.	15–16	261	0.330	–	254	0.107
8–13 VIII 1980 г.	13–16	348	0.013	16–17	604	0.027



таких как *Amphileptus*, *Stokesia*, *Bursella*, *Cyclotrichium*, *Teuthophrys* и, особенно, *Stentor*.

В разных биотопах при качественной однородности количественные изменения протозойного планктона отличаются по времени и амплитуде, причем эти различия менее заметны между биотопами открытой части залива (открытая литораль, „банка”, глубоководная зона – слой 0–10 м), но более существенны у них и закрытой литорали. В последней из-за мелководности и слабого водообмена с глубоководной частью залива создаются особые условия: быстрый прогрев водной массы, ускоренная регенерация биогенных веществ (вследствие более высокой температуры воды и грунта), повышенная концентрация биогенных элементов, поступающих с водосборной площади. Все это способствует раннему началу роста численности и достижению более высокой по сравнению с открытой частью залива продуктивности протозойного планктона (табл. 56).

Отмечены межгодовые колебания в развитии планктонных простейших, вызванные различиями в термическом режиме 3 лет наблюдений (1977–1979 гг.). Так, пик численности в глубоководной части в 1978 г. приходился на конец июля, в 1979 г. – на середину августа. В закрытой

Рис. 42. Динамика численности и биомассы протозойного планктона на фоне изменения температуры воды, количества кормовых объектов (бактерии, водоросли), конкурентов и потребителей простейших – ракообразных в слое 0–10 м глубоководной зоны залива Большое Онего.

1 – численность, 2 – биомасса.

литорали ход численности в эти 2 года был почти параллельным, но показатели 1979 г. превышали таковые в соответствующие сроки 1978 г. в 1.5–7 раз. Почти у всех эвритермных и тепловодно-стенотермных видов наибольшая численность наблюдалась в 1979 г., а у холодно-водно-стенотермных – в 1977 г.

Закономерности развития и уровень продуктивности протозойного планктона, выявленные в заливе Большое Онего, особенно в его открытой части, имеющей широкую связь с Центральным плесом озера, характерны также для Центрального и Южного Онего. О наличии сходства между этими 3 районами свидетельствуют как литературные данные [114], так и наши наблюдения за качественным и количественным составами протозойного планктона (см. табл. 54, 56).

Районы, подверженные интенсивному антропогенному воздействию (Петрозаводская и Кондопожская губы), по уровню продуктивности протозойного планктона значительно отличаются от вышеуказанных районов озера.

Петрозаводская губа, глубоководная, широко общающаяся с Центральным плесом, принимает воды рек Шуи, Неглинки, Лососинки, а также стоки с территории г. Петрозаводска. Для нее характерны устойчивые циклонические и антициклонические циркуляции [104]. Все это приводит к формированию в пределах губы нескольких водных масс с разной степенью продуктивности планктонных сообществ [69]. Так, в период открытой воды холодного 1976 г. центральная глубоководная часть губы была занята озерной водной массой. Численность простейших здесь, постепенно нарастая, достигла в первой половине августа 300 тыс. экз./м³ в верхнем слое 0–5 м (430 тыс. экз. на 0.5 м). В планктоне доминировали обычные, широко распространенные по озеру воды. Водная масса, поступающая с бассейна р. Шуи, также не отличалась высокими показателями развития простейших (100–300 тыс. экз./м³ и 0.01–0.06 г/м³).

Вдоль городского берега при общей более высокой, чем у противоположного берега губы, продуктивности наблюдались ее значительные колебания по участкам. Минимальной численностью простейших отличался район устья р. Лососинки. Многие, широко распространенные по акватории губы виды здесь отсутствовали или встречались единично. В планктоне было отмечено всего лишь 7–8 видов с общей численностью 52–225 тыс. экз./м³. Максимальной численностью выделялись участки, принимающие стоки рыбокомбината, горколлектора, р. Неглинки и ручья Каменного – до 1–5 млн экз./м³.

Эвтрофированные воды Петрозаводской губы в периоды устойчивых циклонических циркуляций, усиливающих шуйское вдольбереговое течение, выносятся в открытое озеро на значительные расстояния [69] и влияют на формирование фауны прилегающего к губе района. В Петрозаводском Онего протозойный планктон в качественном (60 видов) и количественном отношении намного богаче, чем в Южном Онего и заливе Большое Онего, и приближается по уровню показателей к самой Петрозаводской губе.

Таблица 57
Численность (тыс. экз./м³ – над чертой) и биомасса (г/м³ – под чертой) протозойного планктона в Петрозаводской губе и Петрозаводском Онего

Месяц	Зона	Горизонт, м	Петрозаводская губа		Петрозаводское Онего
			1976 г.	1981 г.	
Июнь	Глубоководная	0.5	<u>36</u> 0.011	–	<u>478</u> 0.085
		0–5	<u>42</u> 0.007	–	–
	Юго-западный берег	0.5	<u>265</u> 0.095	–	<u>500</u> 0.030
Июль	Глубоководная	0.5	<u>218</u> 0.030	<u>1155</u> 0.410	<u>744</u> 0.323
		0–5	<u>120</u> 0.017	<u>1504</u> 0.583	<u>716</u> 0.340
	Юго-западный берег	0.5	<u>1105</u> 0.112	–	<u>705</u> 0.270
Август	Глубоководная	0.5	<u>430</u> 0.015	<u>752</u> 0.033	<u>553</u> 0.016
		0–5	<u>302</u> 0.010	<u>650</u> 0.024	<u>530</u> 0.014
	Юго-западный берег	0.5	<u>990</u> 0.083	–	<u>256</u> 0.014
Октябрь	Глубоководная	0.5	<u>178</u> 0.015	–	<u>170</u> 0.028
		0–5	<u>195</u> 0.011	–	<u>171</u> 0.027
	Юго-западный берег	0.5	<u>132</u> 0.009	–	<u>197</u> 0.016

Следует отметить, что по продуктивности 1976 г. уступал 1981-му, который был более теплым и самым многоводным за последнее 30-летие (табл. 57). Некоторое снижение средней численности простейших в прибрежной части Петрозаводского Онего в августе 1981 г. явилось следствием апвеллинга, длившегося несколько дней. Так, 17 августа температура воды у берега составляла 17.6 °С, численность простейших – 590 тыс. экз./м³, 18-го – 15.4 и 520 тыс., 19-го – 13.6 и 196 тыс., 20-го – 7.6 и 170 тыс., 21-го – 6.7 °С и 160 тыс. экз./м³. Даже в районе сброса стоков горколлектора, обычно во все сезоны года выделяющемся максимально высокой численностью, в это время она снизилась

до 250 тыс. экз./м³, что наглядно свидетельствует об определенной роли динамики вод во внутрисезонных колебаниях численности протозойного планктона.

Кондопожская губа в отличие от Петрозаводской глубоко врезается в сушу и сравнительно изолирована от Центрального плеса озера. Стоки г. Кондопоги и ЦБК поступают в верхинную часть губы и, подтягиваемые течением р. Суны, распространяются вдоль юго-западного побережья. В связи с этим протозойный планктон развивается по акватории губы весьма неравномерно, что наиболее ярко проявляется в период ледостава. В это время четко вырисовываются 3 зоны: мертвая, повышенного развития и с обычным для сезона уровнем развития. При исследовании в марте 1984 г. первая из них занимала пространство радиусом около 0.5 км от места выпуска стоков. Здесь простейшие отсутствовали по всей вертикали. Кроме того, их не было и на более удаленных станциях в придонном слое, где зимой происходит накопление сточных вод.

Вторая зона, примыкающая к первой, занимала остальную часть вершины губы и район вдоль юго-западного побережья вплоть до о-ва Соколье. При температуре воды 0.1–0.2 °C подо льдом и 0.6–2.6 у дна в планктоне обитало 30 видов простейших общей численностью 0.13–1 млн экз./м³ (средняя 0.4) в поверхностном и 0.1–0.8 млн (средняя 0.34) в придонном слое. Биомасса составляла по горизонтали соответственно 0.12–0.54 (0.23) и 0.02–0.24 (0.1) г/м³. Протозойный планктон поражал в это время своей крупноразмерностью. В нем присутствовали *Stentor goeseli* – до 16 тыс. экз./м³, *Bursaria truncatella* – до 0.5 тыс., *Bursella spumosa* – до 8 тыс., *Marituja pelagica* – до 180 тыс., *Bursaridium pseudobursaria* – до 200 тыс., *Paramecium caudatum* – до 270 тыс., *Holophrya nigricans* – до 40 тыс., *Colpidium colpoda* – до 85 тыс. экз./м³. При этом все они были гораздо крупнее, чем в другие сезоны года и в других районах озера. Среди мелких форм по численности выделялись *Vorticella natans* – до 280 тыс. и *V. mayeri* – до 140 тыс. экз./м³. На остальной части губы количество видов варьировало от 4 до 13, общая численность была ниже 100 тыс. экз./м³, а биомасса – менее 0.01 г/м³.

Весной развитие протозойного планктона в такой губе, как Кондопожская, в значительной степени зависит от длительности существования термического бара, способствующего накоплению сточных вод. Например, в 1982 г. фронт термобара еще в середине июня находился во внешней части губы и препятствовал водообмену с Центральным плесом озера. В это время в планктоне было обнаружено максимальное количество видов простейших – 50 из 62, выявленных в течение года. Общая численность колебалась по акватории от 0.076 до 1.17 млн экз./м³ (средняя 0.565) в поверхностном и от 0.01 до 1.02 млн (средняя 0.4) в придонном слое с минимальными величинами в районе сброса стоков ЦБК и повышенными – вдоль всего юго-западного побережья. Даже в центральной глубоководной части губы (75 м) численность простейших была высокой (300–600 тыс. экз./м³) по всей вертикали и достигала 28 млн. экз. под 1 м². Биомасса протозойного планктона

Таблица 58

Среднемесячная биомасса (г/м³) протозойного планктона в озерах разной трофности

Месяц	Глубокое ¹ (мезотрофное)	Байкал ² (олиготрофное)	Онежское ³ 1978–1979 гг.
Июнь	0.31	0.09	0.05–0.09
Июль	0.14	0.03	0.02–0.04
Август	0.11	0.03	0.01–0.02
Сентябрь	0.16	0.04	0.01–0.01
Октябрь	0.14	0.04	0.02–

Примечание. 1 – эпилимнион (3 станции с глубинами 8–30 м) [276]; 2 – слой 0–5 м, Селенгинский район (4 станции с глубинами 5–50 м) [278]; 3 – слой 0–5 м, в заливе Большое Онего (4 станции с глубинами 4–80 м).

в пределах губы составляла 0.01–0.75 г/м³ (средняя 0.2) у поверхности (горизонт 0.5 м) и 0.01–0.2 (средняя 0.03) у дна. В отдельные годы в июне наблюдалось массовое развитие *Stentor goeseli* (136–352 тыс. экз./м³), и тогда биомасса возрастала до 1.9–5 г/м³ (горизонт 0.5 м).

Летом сточные воды распространяются в поверхностном слое и на их распределение по губе оказывают влияние течения, возникающие под действием ветров. Эти течения либо усиливают вынос речных и сточных вод, либо запирают их в вершине губы. В связи с тем что течения подвержены сильной пространственно-временной изменчивости, границы зон разной степени воздействия сточных вод (которые четко прослеживаются в период ледостава) оконтурить не представляется возможным. Однако и в период летней съемки в месте непосредственного сброса стоков протозойный планктон по-прежнему отличался крайней бедностью – 2–6 видов общей численностью около 300 тыс. экз./м³, из которых 90% приходилось на долю полисапроба *Colpoda steini*. На расстоянии 4–5 км от места сброса стоков численность простейших резко возрастала и достигала максимальной для губы величины – 1–1.7 млн. экз./м³, а затем в центральной части вновь снижалась до 0.5–0.9 млн. В прилегающей к губе открытой части озера она составляла 0.2–0.6 млн. экз./м³, но в отдельные сроки повышалась до 0.9–1.3 млн, и при этом доминировала вышеупомянутая *Colpoda steini* (60% численности), что свидетельствует о проникновении сюда загрязненных вод.

Таким образом, продуктивность протозойного планктона по акватории Онежского озера неравномерна. В заливе Большое Онего, Центральном и Южном Онего показатели его количественного развития соответствуют уровню олиготрофного водоема (табл. 58). В Петрозаводском Онего они выше, чем в заливе Большое Онего, в среднем за период открытой воды в 2.7 раза по численности и в 3 раза по биомассе, а в Кондопожской губе соответственно в 4 и 5 раз.

Таблица 59

Суммарная за июнь–сентябрь продукция (ккал/м²)
ракообразных (P_p), простейших (P_n) и их процентное соотношение
в разных биотопах залива Большое Онего

Биотоп	P _p	P _n	$\frac{P_n}{P_p} \cdot 100, \%$
1978 г.			
Глубоководная зона (0–70 м)	5.17	6.51–13.02	126–252
„Банка” (0–8 м)	0.83	1.65–3.30	198–396
Открытая литораль (0–6 м)	2.73	3.28–6.56	120–240
Закрытая литораль (0–4 м)	6.89	3.75–7.50	54.5–109
1979 г.			
Глубоководная зона (0–70 м)	7.83	13.62–27.24	174–348
Зона средней глубины (0–30 м)	7.48	13.08–26.17	175–350
Открытая литораль (0–6 м)	3.94	1.18–1.37	30–60
Закрытая литораль (0–4 м)	9.40	8.13–16.26	86.5–173

Планктонные простейшие в экосистеме озера играют немаловажную роль, которая определяется их участием в продуцировании органического вещества в процессе самоочищения водоема (потребление и деструкция органического вещества), и, кроме этого, они являются хорошими индикаторами качества воды.

Относительная доля простейших в общей биомассе зоопланктона, как показали наблюдения в заливе Большое Онего, — величина изменчивая во времени и пространстве. По данным 1979 г., соотношение между среднемесячными величинами биомасс этих групп в июне колебалось от 93% в закрытой литорали до 26 в глубоководной зоне. К августу, с развитием летних форм ракообразных и доминированием среди простейших мелких форм, этот показатель снизился до 75%. В сентябре в закрытой литорали доля простейших продолжала снижаться, а в глубоководной зоне вновь повысилась до 19.7%. Средние за июнь–сентябрь величины составляли 22.4% в закрытой литорали, 11.2 — в глубоководной зоне и 13.5% — в районе средней глубины.

Соотношение величин продукции было несколько иным. Продукцию протозойного планктона рассчитывали по формуле

$$K_1 = \frac{P}{C},$$

где K₁ — коэффициент использования на рост потребленной пищи (по литературным данным, 0.35 [261]); P — продукция; C — рацион (принят равным 100–200% от биомассы простейших). Оказалось, что в закрытой мелководной литорали суммарная за июнь–сентябрь продукция простейших была ниже или приближалась к таковой ракообразных, а в открытой части залива („банка”, открытая литораль, средние и большие глубины) превышала последнюю иногда в 2–4 раза (табл. 59).

Таблица 60

Суммарная биомасса (г/м³) бактерий и мелких водорослей (B_к),
суточный рацион протозойного планктона (C)
и процент потребления

Дата	Глубоководная зона (0–10 м)			Закрытая литораль (0–4 м)		
	B _к	C	$\frac{C}{B_k}, \%$	B _к	C	$\frac{C}{B_k}, \%$
Июнь						
4	12.37	0.045–0.09	0.4–0.8	—	—	—
15	17.54	0.35–0.70	2.0–4.0	8.82	1.35–2.70	15.3–30.6
24	11.57	0.34–0.68	3.0–6.0	5.20	1.12–2.24	21.6–43.2
Июль						
4	22.25	0.18–0.36	0.8–1.6	11.12	0.81–1.62	7.3–14.6
14	13.40	0.46–0.92	3.4–6.8	7.56	0.13–0.26	1.7–3.4
20	11.50	0.06–0.12	0.5–1.0	8.80	0.20–0.40	2.3–4.6
Август						
4	11.93	0.17–0.34	1.4–2.8	9.80	0.31–0.62	3.2–6.4
20	17.60	0.22–0.44	1.25–2.5	4.36	0.17–0.34	3.9–7.8
Сентябрь						
5	14.30	0.01–0.02	0.07–0.14	5.24	0.025–0.05	0.5–1.0

Это объясняется прежде всего доминированием в первой зоне Cladocera с P/V_{мес} — 0.5–8.5, а во второй Copepoda с P/V_{мес} — 0.2–0.5 [84].

Простейшие, используя в качестве пищи мелкие водоросли, бактерии, жгутиконосцев, частички детрита, тем самым наряду с другими организмами осветляют воду водоема. Работами ряда авторов [261] установлено, что масса пищи, потребляемой одной инфузурой за сутки, составляет 150–400% от ее собственной массы. Для ориентировочных расчетов суточный рацион простейших принят равным 100–200% от их биомассы. Сопоставив его с концентрацией кормовых объектов в водоеме (биомассой бактерий и мелких водорослей — до 40 мкм), определили, какая их часть потребляется планктонными простейшими за сутки.

По материалам, полученным в заливе Большое Онего, наибольший процент потребления был в закрытой литорали и достигал максимума в поздневесенний период (табл. 60). Часть потребленного органического вещества в процессе дыхания подвергается деструкции. Как правило, скорость последней пропорциональна скорости потребления кислорода, которую рассчитывали по формуле, предложенной Т. В. Хлебович [262],

$$Q = 0.6 W^{0.75},$$

где Q — скорость потребления кислорода, в мкл O/(особь · ч) при 20 °C; W — масса, в кг сырой массы. При определении количества органического вещества, подверженного деструкции, использовали кислородный эквивалент, равный 1.47 мг O (или 1.03 мл O) на 1 мг сухого органического вещества, исходя из того, что калорийность протозойного

Таблица 61

Средние (июнь–август 1976 г.) численность (Ч), биомасса (Б), потребление кислорода (Q) и деструкция органического вещества (D) в Петрозаводской губе Онежского озера

Участок	Ч, экз./м ³	Б, г/м ³	Q, мл O/(м ³ • сут)	D, сух. вещество, мг/(м ³ • сут)
Глубоководная зона	225	0.022	1.36	1.32
Северо-восточный берег, пристани:	353	0.026	1.86	1.80
„Зимник“	353	0.026	1.86	1.80
„Чертов стул“	763	0.048	3.80	3.70
Юго-западный берег:				
Соломенская протока	185	0.033	1.36	1.32
ДСК	512	0.085	3.67	1.56
городская набережная	574	0.142	13.14	12.76
городской парк	427	0.030	2.00	1.94
рыбокомбинат	1950	0.200	12.70	12.33
Приустьевой участок:				
р. Неглинки	863	0.060	5.56	5.40
р. Лососинки	140	0.042	1.10	1.07
ручья Каменного	1482	0.303	10.15	9.85

планктона составляет в среднем 5 кал/мг сух массы [79], а оксикалорийный коэффициент равен 3.4 кал/мг O [9].

Максимальные величины потребления кислорода и деструкции органического вещества получены для участков с повышенной продуктивностью протозойного планктона. Например, в Петрозаводской губе — это литоральная зона у юго-западного берега, особенно в местах поступления стоков рыбокомбината, р. Неглинки и ручья Каменного (табл. 61). Суммарно за 3 мес планктонными простейшими в слое 0–10 м глубоководной зоны подвержено деструкции около 80 и в прибрежной зоне около 9 т сухого органического вещества, или соответственно 400 и 45 т сырого органического вещества, что свидетельствует о существенном вкладе этой группы организмов в процесс самоочищения водоема.

Простейшие, кроме того, являются хорошими индикаторами качества воды, так как быстро реагируют на изменение условий среды существенным колебанием численности и появлением не свойственных чистому водоему видов. Как уже указывалось, по уровню развития протозойного планктона (видовому разнообразию, численности, биомассе) в пределах Кондопожской губы были выделены 3 зоны: мертвая, повышенного развития и с обычным уровнем развития. Наиболее четко они прослеживаются во время ледостава. В период открытой воды из-за активной динамики водных масс границы зон неустойчивы, однако всегда наименьшими показателями отличался участок, непосредственно принимающий стоки ЦБК, а максимально высокими — район в 1.5–4 км от места сброса стоков и юго-западный

берег, вдоль которого распространяются сточные воды. В вершине губы высокую по сравнению с центральной частью численность имели α -мезо- и полисапробы, такие как *Paramecium caudatum*, *Colpoda steini*, *Colpidium colpoda*, *Spirostomum* sp., *Glaucoma* sp.

С помощью метода Пантле и Букка в модификации Дзюбана [64] для каждой пробы рассчитан индекс сапробности. В июне он колебался от 2 до 2.4, что характеризовало всю водную массу в пределах губы как β -мезосапробную. В августе наблюдался более широкий разброс — 1.5–3.7. Значения индекса, соответствующие поли- и α -мезосапробным условиям среды, отмечены в районе, испытывающем интенсивное влияние стоков ЦБК, в придонном слое глубоководной впадины в центре губы, а в отдельные сроки — даже в примыкающей к губе открытой части озера. В марте подобные условия характерны для всей вершинной части губы и района, расположенного вдоль юго-западного берега до о-ва Сокольево.

6.4. Зоопланктон

История исследования зоопланктона Онежского озера насчитывает более 100 лет. Опубликованные данные свидетельствуют о большом объеме выполненных работ и дают представление о видовом составе, экологии, численности и биомассе, пространственном распределении отдельных видов, сезонных изменениях в составе и обилии планктона, его кормовой ценности для рыб — планктофагов и продукционных возможностях, а также влиянии различного рода загрязнений [50, 84, 85, 132, 147, 163, 181–183, 208–210, 232, 233, 243–246].

Исследования на всей акватории озера, включая и крупные заливы, основывались главным образом на материалах рейсовых сезонных комплексах съемок, что не позволило составить детальной характеристики сезонной динамики планктонных ракообразных и коловраток и оценить годовой ход биопродуктивности. Этот пробел в определенной степени был восполнен ежегодными стационарными исследованиями (1977–1979 гг.) в одном из самых глубоководных районов озера — заливе Большое Онего в нескольких точках, характеризующих различные озерные биотопы [84]. Данные, полученные на этом заливе, могут быть с известным приближением распространены и на центральную часть Онежского озера.

Несмотря на сравнительно высокую степень изученности, в силу сложности лимнологической структуры и гетерогенности экосистемы озера ряд вопросов остается все еще слабо разработанным. Это относится к функциональным связям между отдельными элементами экосистемы, зависимости продукционных процессов от абиотических факторов, проблеме качества воды, их самоочищающей способности и т. д. Укажем, однако, что для оценки процесса эвтрофикации в связи с возрастающим воздействием антропогенных факторов сравнительных количественных показателей продуктивности зоопланктона с длительным рядом наблюдений (подобно тем, какие существуют для белорусских озер, а также Красного, Байкала и Севана) явно недостаточно.

В исследованиях вплоть до 50-х гг. не было единой методики, разной была степень детализации в определении видового состава, отсутствовали количественные показатели. Все это создает определенные трудности при сопоставлении результатов исследований разных лет.

Зоопланктон Онежского озера представлен обычными для Северо-Запада европейской части СССР озерными видами, широко распространенными в водоемах умеренной зоны Северного полушария. К настоящему времени в его составе насчитывается 202 таксона, в том числе 112 — коловратки, 90 — ракообразные (62 — кладоцеры, 28 — копеподы).

Ведущими формами рачкового планктона являются: из копепоид — *Limnocalanus grimaldi*, *Heterocope appendiculata*, *Eudiaptomus gracilis*, *Eurytemora lacustris*, *Cyclops abissorum*, *Mesocyclops oithonoides*, *M. lauckarti*; из кладоцер — *Daphnia cristata*, *Bosmina obtusirostris lacustris*, *Holopedium gibberum*, *Leptodora kindtii*. Среди коловраток преобладают *Kellicottia longispina*, *Keratella cochlearis*, *Asplanchna priodonta*, *Conochilus unicornis*.

По видовому составу зоопланктон довольно однороден, за исключением участков зарастающей литорали, районов, подверженных влиянию стока, характеризующегося высокой цветностью и низкой минерализацией, или участков, испытывающих воздействие загрязнений. Здесь наблюдается обогащение комплекса руководящих видов за счет форм, характерных для более эвтрофных водоемов.

Как уже неоднократно указывалось, Онежское озеро характеризуется лимнической гетерогенностью. Большая изрезанность береговой линии в северной части способствует созданию и большого разнообразия условий (термических, динамических и др.), обеспечивающих своеобразие распределения зоопланктона по акватории озера. Результаты исследований показывают, что отдельные участки Онежского озера настолько отличаются друг от друга, что могут быть представлены как типологически разные водоемы (со всеми переходами от олиготрофных до эвтрофных). Зоопланктон в них различается главным образом комплексами руководящих видов, соотношением его главных систематических групп, уровнем продуктивности, характером сезонной динамики. Эти участки в целом совпадают с районами, выделенными по морфометрическим характеристикам и связанными с ними термическими и динамическими условиями.

В самом общем плане в Онежском озере выделяются основной плес и район губ. Основной плес озера, согласно исследованиям ряда авторов [208, 209, 233], можно разделить на 2 района — восточный и юго-восточный, занимающие более мелководную часть вдоль восточного и южного берегов, и западный, глубоководный, примыкающий к западному берегу и включающий залив Большое Онего. От губ их можно условно отделить по 30–40-метровой изобате согласно расположению фронта термического бара.

Глубоководный район основного плеса озера носит олиготрофный характер. Зоопланктон его представлен комплексом форм ультрапелагиали и пелагиали [50] со сравнительно низкими показателями

продукции и темпа продуцирования. На протяжении почти всего года в нем преобладают (до 70% от общей биомассы) копепоиды, главным образом 2 вида — *Limnocalanus macrurus* и *Eudiaptomus gracilis* (меньше — *Cyclops abissorum* и *Mesocyclops oithonoides*). Они составляют в среднем (1978–1979 гг.) 52–62% от общей продукции зоопланктона (в июне — до 94%). В сентябре, когда развитие у части копепоид заканчивается, популяции состоят в основном из половозрелых особей и темп их продуцирования снижается, увеличивается численность кладоцер (до 60–70%). На долю последних (*Daphnia cristata*, *Bosmina obtusirostris lacustris*, *B. coregoni coregoni*) приходится в среднем менее чем 30% общей численности и биомассы планктона. Коловратки (*Kellicottia longispina*, *Asplanchna priodonta*) в центральной части озера составляют лишь 3% от биомассы всего зоопланктона, и только в июле их доля возрастает до 12% [84].

Средняя биомасса зоопланктона за безледный период в открытом плесе в 1964–1966 гг. была равна 4 г/м² (в том числе 70% — копепоиды), в летний период она колебалась от 6 до 12.5 г/м². Средневзвешенная величина биомассы летнего зоопланктона составляла лишь 0.2 г/м³, а общая продукция за сезон — около 10 ккал/м² (9.3 — мирного и 0.7 — хищного). На продольном разрезе через Центральный плес озера максимальная численность зоопланктона (как и биомасса) наблюдалась в августе и составляла 4.4 тыс. экз./м³, или 240 тыс. экз./м² [233]. Согласно исследованиям 1953 г., общее количество рачков в Центральном Онего варьировало в пределах 6.5–9.4 тыс. экз./м³ [181]. Близкие к этим по значению цифры для летнего периода 1949 г. — 4.8 тыс. экз./м³ (в том числе 62.4% копепоид) — приводит М. Ф. Поливанная [181].

Величины средней за сезон биомассы, полученные в глубоководной зоне (70–80 м) залива Большое Онего в 1978–1979 гг., были также низкими (3.1–4.8 г/м²), с максимумом в июле–августе (5.3–7.1). Невысокой была и общая величина продукции зоопланктона — 5.2–7.8 ккал/м² (в том числе 4.6–6.9 — мирного и 0.3–0.9 — хищного). Общая численность зоопланктона в заливе колебалась от 0.02 в июне до 1.8 тыс. экз./м³ в августе, составляя в среднем 0.4 (1978 г.)—1.4 тыс. экз./м³ (1979 г.), или 28–113.4 тыс. экз./м² [84]. Колебания плотности планктона в этом районе от 2 до 5 тыс. экз./м³, зависящие главным образом от стонно-нагонных явлений, отмечает (исследования 1953 г.) и В. В. Урбан [233].

Район восточного побережья Онежского озера отличается сравнительно мелководностью (глубины менее 40 м). Для него характерны более раннее развитие зоопланктона весной, связанное с ранним прогревом водных масс, и более высокий в сравнении с глубоководной частью основного плеса уровень его обилия. Максимум в развитии зоопланктона достигается в июле. Так, на северо-восточном участке Центрального Онего общая численность рачков в июле–августе 1953 г. колебалась от 27.2 до 32.6 тыс. экз./м³ с преобладанием копепоид (*Mesocyclops oithonoides*), а затем — босмин и дафний. При этом в слое 0–2 м биомасса составляла 0.42–0.85 г/м³ [233].

В юго-восточном районе, имеющем сравнительно пологий склон, отчетливо прослеживается постоянное влияние стока рек Андомы и Вытегры на повышение продуктивности планктона. Согласно нашим исследованиям в 1986–1987 гг., в августе в устьевой части этих притоков общее число планктеров было соответственно 30.5 и 44 тыс. экз./м³, а биомасса – 0.9 и 2 г/м³ (на долю кладоцер приходилось до 80%). Биомасса зоопланктона в районе влияния р. Андомы достигала 11–17 г/м² [209]. Еще более высокие показатели – до 23–26 г/м² (биомасса кладоцер вдвое выше биомассы копепоид), по данным того же автора, наблюдались в зоне, пограничной с глубоководным районом (30–40-метровая изобата) и являющейся самой продуктивной частью основного плеса.

У западного побережья, имеющего крутой подводный склон, сильнее сказывается влияние ветрового гона. Вдоль него проходит фронт холодных вод, поступающих из глубоких участков Центрального Онего. Продуктивность зоопланктона здесь значительно ниже, чем у восточного побережья: численность падает от 12.2–9.4 тыс. экз./м³, а биомасса – до 0.27 г/м³ [233]. Качественный состав фауны при этом сохраняется, но в составе основного комплекса доминируют босмины. Особенно бедна как в качественном, так и в количественном отношении планктонная фауна открытой валунно-галечной литорали. В 1978–1979 гг. в районе каменистого побережья (западный берег залива Большое Онего с глубиной 5–6 м) численность зоопланктона составляла лишь 5–7 тыс. экз./м³, а биомасса – 0.07–0.12 г/м³ [84]. Аналогичные результаты, согласно которым численность и биомасса зоопланктона вдоль западного берега составляли 3.4 тыс. экз./м³ и 0.3 г/м³, а у юго-восточного в то же время увеличивались до 20 и 0.6 соответственно, были получены в 1975 г.*

Сопоставление результатов исследований, проведенных в 1975 г. в южной части озера, с данными предыдущих лет (1952–1954, 1964–1966 гг.) не обнаруживает заметных изменений в видовом составе зоопланктона и его распределении по акватории. Межгодовые колебания уровня обилия и биомассы вполне закономерны и объяснимы межгодовыми различиями в теплозапасе, распределении его в толще воды и т. д.

Влияние берега на зоопланктон в основном плесе озера прослеживается лишь в узкой прибрежной полосе, наиболее четко ограниченной термическим баром в период весеннего нагревания [210]. Более заметно это влияние вблизи устьев рек. Следует отметить, что степень зарастания берегов низкая и составляет всего 0.1% от площади всей литорали [193].

Большие губы и заливы озера испытывают интенсивное антропогенное воздействие. С одной стороны, они находятся под влиянием притоков, несущих богатую органикой, биогенными и другими веществами воду, с другой – сброса повышенных объемов промышленных, бытовых, сельскохозяйственных стоков, содержащих загрязняющие и эвтрофирующие вещества.

В пределах Повенецкого залива можно выделить несколько районов, неоднородных по условиям жизни для гидробионтов. Глубоководный район обнаруживает сходство с открытым плесом озера. В нем ведущая роль в планктоне принадлежит тем же копеподам, что и в Центральном плесе озера. Средняя биомасса за сезон (с максимумом в августе) составляет 8 г/м², летняя в различные годы колеблется от 6.5 до 12.6. В прибрежной, сравнительно неглубокой зоне (район г. Медвежьегорска) эти колебания (с максимумом в июле–начале августа) более значительны – от 0.5–1 до 20.5 г/м². Высокие показатели (25 г/м²) отмечены в зоне влияния сброса хозяйственно-бытовых вод города. Они характеризуются массовым развитием кладоцер (70% от общих численности и массы), главным образом *Daphnia cristata* и *V. obtusirostris lacustris*. Изолированные мелководные губы залива (Лумбуши, Кумса-губа, отдельные участки Повенецкого залива), отличающиеся высокой степенью зарастания макрофитами и принимающие сток (реки Сапеница, Повенчанка), богатый органическим веществом, имеют повышенную трофность. Количественные показатели в них достигают 220 тыс. экз./м³ и 1.7 г/м³ [147, 209].

На количественное развитие планктона в Заонежском заливе благоприятное влияние оказывают сравнительно небольшие глубины, хорошая прогреваемость вод и их высокая динамичность, а также приток вод ряда рек, впадающих в озеро вдоль восточного побережья. Этот район относится к наиболее продуктивным: в его восточной части отмечена максимальная для озера летняя биомасса. В 1953 г. плотность рачков в верхнем слое воды (0–2 м) составила 96 тыс. экз./м³ при биомассе 1.48 г/м³ (западные и центральные участки пролива были беднее) [233]. В 1966–1967 гг. максимальная биомасса летом достигала 32.8 г/м² (2 г/м³). В других участках биомасса зоопланктона летом была также высока и колебалась от 8 до 18 г/м² (в среднем 0.8 г/м³) [208].

Повышенный уровень трофии Петрозаводской и Кондопожской губ связан с интенсивным антропогенным воздействием. Основной причиной эвтрофикации Петрозаводской губы является постоянное поступление органики, главным образом из р. Шуи (95% притока), а также со сточными водами г. Петрозаводска. В связи с особенностями динамики водных масс, температурного режима вод, величины расходов р. Шуи и обеспеченности зоопланктона пищей уровень его обилия различается по годам. Сопоставление результатов исследований разных лет показывает, что межгодовые колебания численности и биомассы могут быть значительными.

Как указывает М. Ф. Поливанная [183], в июле 1948 г. в пелагиали внешней части губы количество зоопланктона в 1 м³ составило 13 тыс. экз. (температура воды в поверхностных слоях изменялась от 16 до 19 °С), а в июле 1949 г. этот показатель был вдвое меньше – 6.4 тыс. экз. (температура верхнего слоя не превышала 16 °С). По данным Т. С. Смирновой [209], летняя биомасса зоопланктона в том же районе колебалась от 4 г/м² в холодном 1964 г. до 14 в более теплом 1965-м (или примерно 0.12–0.56 г/м³). Подводя итоги исследований

* По неопубликованным данным А. М. Гуляевой (СеврыбНИИпроект).

1952–1954 гг. и сравнивая биомассу зоопланктона отдельных районов озера с другими озерами Карелии, В. В. Урбан [232] отнесла Петрозаводскую губу к группе „β” — мезотрофных водоемов (22 тыс. экз./м³ и 0.666 г/м³ в слое 0–2 м).

В работах последующих лет (1968–1969 гг.) показано, что в Петрозаводской губе по-прежнему сохраняется заметное видовое разнообразие (140 видов) и высокие количественные показатели, свидетельствующие о повышении уровня трофии губы [244]. Так, в июле 1968 г. численность организмов в слое 0–2 м в средней части губы достигала 120 тыс. экз./м³, а биомасса — 4.14 г/м³. Рачков — компонентов основного планктического комплекса — по сравнению с 1953 г. в слое 0–2 м насчитывалось у городского берега в 3 (от 8.3 до 24.4 тыс. экз./м³), а на середине губы — в 8 раз (от 16.8 до 130.3 тыс.) больше. Высокой численностью, помимо коловраток (виды родов *Synchaeta*, *Polyarthra*, *Keratella*), в значительных количествах представленных на участках с повышенной концентрацией органических веществ, отличались и планктеры — фильтраторы *Daphnia cristata* (49.5 тыс. экз./м³), *Bosmina obtusirostris lacustris* (22), *B. longirostris* (10.3), из копепоид — *Diaptomus gracilis* (47.4 тыс. экз./м³), что обусловлено наличием богатого бактериопланктона — от 200 тыс. до 1, а местами и до 3 млн кл./мл (см. раздел 6.1). Роль ветвистоусых в планктоне губы в 60–70-е гг. более значительна, чем веслоногих (60–80% биомассы). В июле возрастает количество коловраток, особенно у городского побережья (30–42% от общей биомассы и 85% от численности).

Результаты исследований губы в 1976 г. резко отличаются от предыдущих [86]. Они свидетельствуют о невысоком (самом низком из известных) уровне ее продуктивности. Численность зоопланктона в течение сезона (июнь–октябрь) в центральной части губы колебалась в пределах 1–3 тыс. экз./м³ при биомассе 0.02–0.17 г/м³, а в среднем они составляли всего соответственно 1.5 тыс. экз./м³ и 0.1 г/м³ (36.4 тыс. экз./м² и 1.8 г/м²). Это объясняется различием гидрологических, и в первую очередь термических, условий (1976 г. отличался от среднемноголетнего по многим гидрометеорологическим показателям).

Кроме того, следует отметить, что в литоральной зоне губы, особенно в районе городского побережья, продуктивность зоопланктона значительно отличается от таковой ее центральной и северо-восточной частей, что обусловлено влиянием трансформированных шуйских вод и стоков города. Здесь участки с достаточно высокими на общем фоне (во все сезоны года) количественными показателями зоопланктона (летняя биомасса достигает 4 г/м³) чередуются с очень бедными.

Таким образом, в Петрозаводской губе на общем фоне понижения продуктивности зоопланктона можно выделить несколько участков: 1) центральный, ограниченный изобатой 10 м, — зона повышенной продуктивности сообществ; 2) северо-восточный мелководный — зона пониженной продуктивности; 3) юго-западный (городское побережье) — с явно выраженной очаговостью резкого обеднения и обогащения фауны; 4) внешняя зона — олиготрофный участок, близкий

по продуктивности к Центральному плесу озера. Уровень обилия планктонной фауны и ее видовое разнообразие свидетельствуют о значительном влиянии эвтрофированных вод Петрозаводской губы на прилегающий к ней район открытого озера вдоль его западного побережья [163, 209, 247].

Формирование планктонной фауны Кондопожской губы происходит в условиях постоянного (с 1929 г.) поступления в нее со сточными водами ЦБК и хозяйственно-бытовыми стоками города большого количества органических веществ, обусловивших и значительное развитие микрофлоры — важного звена пищевых цепей гидробионтов. Следует отметить, что численность бактериопланктона возросла с 90–320 тыс. кл./мл в 1964–1965 гг. до 730–1600 тыс. в 1982 (см. раздел 6.1). Определенное влияние на развитие зоопланктона, особенно в литоральной зоне губы (юго-восточный берег), оказывает и сток р. Суны.

Результаты исследований 1964–1967 гг. показали, что в глубоководном районе губы летняя масса зоопланктона колебалась в пределах 0.3–1.9 г/м³ (до 17 г/м²) и в среднем составляла 0.4 г/м³, а в северной ее части эти колебания происходили в пределах 0.8–1 г/м³ [208, 243]. В 80-е гг. биомасса планктона выросла (средние показатели) с 0.46 г/м³ (1971 г.) до 0.66 (1982 г.). В целом в последнее десятилетие она была выше и так же, как и раньше, колебалась в значительных пределах (август 1982 г.) — от 0.14 до 1 г/м³ (2.1–28 г/м²) при среднем значении (27 станций) 0.87 ± 0.17 (10.5 \pm 1.6). Численность организмов в тот же период варьировала от 6.3 до 50 тыс. экз./м³ (средняя 35.5 \pm 6.2) [85].

Обращает на себя внимание очень высокая плотность планктона в верхнем слое воды (0–2 м), что связано с распространением трансформированных и сточных вод в летний период в поверхностном горизонте. Так, в июле 1970 г. численность планктона в этом слое менялась по участкам губы от 93 до 157 тыс. экз./м³, а максимум — 267 тыс. экз./м³ и 4 г/м³ — приходился на ее вершинную часть. Даже в ее открытой центральной зоне численность и биомасса достигали значительных величин — 82–112 тыс. экз./м³ и 2.8–3.5 г/м³, а в августе 1982 г. насчитывалось до 330 тыс. и 6.6 г/м³.

Тенденция увеличения продуктивности зоопланктона в глубоководной (80 м) части губы за последние десятилетия прослеживается при анализе данных, представленных в табл. 62.

Понятно, что колебание уровня развития зоопланктона по годам в значительной мере определяет температурный режим, т. е. количество тепла, получаемое водоемом за год, а также характер его распределения в водной толще. Так, значительные различия в состоянии планктонной фауны в период летних наблюдений 1970–1972 гг. (как 1964–1966 гг.) определяются в основном температурными условиями. Что касается 1982 г., то он был в целом исключительно многоводным и отличался сравнительно низкими температурами воды.

С учетом указанных различий общая тенденция в развитии зоопланктона в Кондопожской губе, где так сильно воздействие антропогенных факторов, выражается в повышении уровня трофии не только на акватории всей губы, но и за ее пределами.

Таблица 62

Изменение численности, биомассы
в центральной части

Месяц	Численность, тыс. экз./м ³	Соотношение групп по численности, %			
		каланой- ды	цикло- поиды	кладо- церы	коло- вратки
Июль 1964 г.	3.47	9	23	34	34
Август 1965 г.	1.01	18	7	38	37
Июль: 1970 г.	9.6	4	8	51	37
1971 г.	7.8	2	6	6	75
1972 г.	14.4	12	30	16	40
Август: 1972 г.	41.4	1	17	16	64
1982 г.	13.5	20	21	30	29

Для фауны планктона Кондопожской губы (как и Петрозаводской) характерно обилие ветвистоусых. В июле 1970 г. это были босмины — *Bosmina longirostris*, *B. obtusirostris* (до 87% от общей численности). В 1982 г. по частоте встречаемости и количественному развитию первенствовали *Daphnia cristata* (иногда до 120 тыс. экз./м³, или 41% от общей численности) и *B. obtusirostris lacustris* (до 73 тыс., или 25%). Последние 2 вида на некоторых участках составляли более половины биомассы планктона (более 3 г/м³). Меньше приходилось на долю *B. longirostris* (до 10 тыс. экз./м³). Местами (северная часть губы, район выпуска как сточных вод ЦБК, так и хозяйственно-бытовых стоков) сравнительно высокой плотности (до 21 тыс. экз./м³ в 1971-м и 12.8 в августе 1982 г.) достигал *Chydorus sphaericus* — вид, который часто используют в качестве индикатора эвтрофных условий [82].

В последние годы наблюдается и угнетение некоторых видов ветвистоусых, к примеру *Bosmina longispina* (до 4% от общей численности и биомассы), роль которой в прежние годы (1964—1965) в планктоне Кондопожской губы была более значительной (до 14%). В планктоне Петрозаводской губы также отмечается уменьшение численности ряда видов пелагических ветвистоусых (*Loptodora*, *Limnosedea*), а некоторые из них (*Bythotrephes*) в период последних исследований вообще не были обнаружены. Среди коловраток преобладают виды *Polyarthra*, *Keratella*, *Kellicottia*, *Asplanchna*, *Synchaeta*.

Признаком антропогенного эвтрофирования служит и увеличение плодовитости рачков. В частности, у *Diatomus gracilis* средняя плодовитость составляет 20 яиц (такую же цифру приводит и З. И. Филимонова для Петрозаводской губы [244]), тогда как в олиготрофном Большом Онего она равна 9—13. У *Daphnia cristata*, *Bosmina obtusirostris lacustris* и *B. coregoni lilljeborgii* насчитывается в среднем 5—6 яиц (до 8), в то время как в заливе Большое Онего — лишь 3 (от 2 до 5) [84].

Таким образом, значительный объем исследований, проведенных на Онежском озере, в том числе и зоопланктона, подтверждает выраженную гетерогенность этого водоема.

и структуры зоопланктона
Кондопожской губы

Биомасса, г/м ³	Соотношение групп по биомассе, %				Литературный источник
	каланой- ды	цикло- поиды	кладо- церы	коло- вратки	
0.138	17	8	6	10	[243]
0.038	39	9	49	3	Тот же
0.22	15	4	77	4	[245]
0.07	20	10	21	48	Тот же
0.23	42	14	37	8	„ „
0.36	11	12	64	13	„ „
0.31	26	12	58	4	[85]

По видовому составу зоопланктон почти во всех районах озера однороден (за исключением литоральной зоны, небольших заливов и предустьевых участков рек). За прошедшие десятилетия он обнаружил достаточную стабильность, основные его доминанты сохранили свое количественное превосходство.

По уровню трофии в Онежском озере представлены все типы озерных экосистем (от олиготрофных до эвтрофных). Глубоководный район основного плеса озера, а также залив Большое Онего и Большая губа Повенецкого залива сохраняют олиготрофный характер (табл. 63).

По величине биомассы Центральный плес озера соответствует олиготрофным озерам. Его губы по этому показателю близки к мезотрофным озерам Северо-Запада, а отдельные их участки и мелкие заливы приближаются к эвтрофным. Отклонение трофности обусловлено главным образом интенсивным воздействием антропогенных факторов, и прежде всего сбросом в водоем промышленных, бытовых и сельскохозяйственных стоков. Наиболее существенные изменения произошли в зоопланктоне Кондопожской губы и менее выраженные — в Петрозаводской, т. е. в районах озера, по природе своей олиготрофных.

Повышение трофности сопряжено и со структурными изменениями в планктоценозе. При этом наблюдается перераспределение относительного значения главных систематических групп. Так, происходит снижение доли копепоидов, в первую очередь каланидов, доминирующих в Центральном плесе, и увеличение доли кладоцер и коловраток. Подобные явления сопровождают процесс эвтрофирования и в других водоемах и хорошо изучены [11].

Как известно, в последние годы отмечается ускоренное эвтрофирование водоемов. Темп его по сравнению с природным возрос на 2—3 порядка. Даже такие крупные водоемы, как Балтийское море и Ладожское озеро, перешли из одного трофического класса в другой всего лишь за последние 20—30 лет [133].

Сопоставление количественных показателей зоопланктона Онежского и Ладожского (относимого в настоящее время к мезотрофному

Таблица 63

Летняя биомасса (г/м²) и численность (тыс. экз./м²) зоопланктона Центрального плеса озера (среднее по продольному разрезу) [209, 210]

Год	Биомасса	Численность
1964	5.3	—
1965	12.5	—
1966	7.5	220.0
1967	7.2	—
1970	5.6	250.0
1976	8.4	303.6

типу) озер показывает, что его биомасса в глубоководной части Онежского озера пока примерно вдвое ниже той же величины в Ладожском озере. Так, в августе 1970 г. средневзвешенная биомасса для слоя 0–50 м составляла в Онежском озере 124, Ладожском — 282 мг/м³, а в 1976 г. — 155 и 317 соответственно. В Ладожском озере значительная доля биомассы приходится на кладоцер, более заметную роль в общей биомассе играют коловратки. В Онежском озере, особенно в его центральной части сохраняется ведущая роль копепод — 83% от общей биомассы в 1970 г. и 50% — в 1976 г. (в Ладожском 35 и 46% соответственно) [211].

В крупных заливах Онежского озера зоопланктон, однако, претерпевает значительные изменения (качественные и количественные), которые позволяют предположить, что процесс эвтрофикации здесь развивается тем же путем, что и в Ладожском озере. Поэтому осуществление водоохранных мероприятий по снижению эвтрофирующего влияния сточных вод для Онежского озера представляется весьма актуальной задачей.

6.5. Донная фауна

Донная фауна Онежского озера изучена сравнительно полно. Первые наиболее серьезные и обобщающие работы были опубликованы С. В. Гердом [50, 52] и Б. М. Александровым [3, 4 и др.]. В последнее время в связи с систематическими комплексными работами по изучению Онежского озера были проведены многолетние сезонные исследования донной фауны почти по всей акватории [10, 42, 53, 73, 93–96, 147, 162, 163, 188].

Донное население озера представлено 530 видами и формами, что составляет 45% от бентофауны озер Карелии и на 145 видов больше, чем в Ладожском озере [219]. Наибольшее количество таксонов приходится на хирономид (101 вид) и жуков (86), олигохет (69), гидракарин и ручейников (42 вида) [187]. Средняя по озеру биомасса 1.1–1.5 г/м². Ее большая часть представлена олигохетами (60%), амфиподами (20%), хирономидами (10%), моллюсками (4%), остальные группы составляют всего 6%.

Лимническая гетерогенность озера в значительной степени обусловила и распределение его донного населения по акватории. Согласно качественным и количественным характеристикам бентофауны, озеро можно разделить на несколько условных районов: профундаль открытой части, шхерные районы, район крупных губ, подверженных сильному антропогенному влиянию, и литораль с зоофитомом.

Профундаль занимает значительную часть озера. Ее площадь равна приблизительно 905 тыс. га, что составляет 94% от всей акватории. Этот район включает Центральное Онего, открытые части Повенецкого и Заонежского заливов, а также Малое, Большое Онего и некоторые другие районы со значительными глубинами.

Профундаль характеризуется минимальным антропогенным воздействием, незначительным влиянием речного стока, большими глубинами, круглогодичной низкой температурой и сезонным перепадом всего в несколько градусов, высокой насыщенностью кислородом. В донных осадках преобладают глинистые илы с рудной коркой, бедные органическими веществами. Количество видов, способных существовать в таких экстремальных условиях, невелико, и представлены они эврибионтными, экологически пластичными формами.

На глубинах начиная с 30 м и до максимальных донное население состоит почти из одного и того же набора видов. В основном это 4 вида олигохет (*Lamprodrilus isoporus*, *Stylodrilus heringianus*, *Spirosperma ferox* и *Alexandrovia onegensis*), 6 — хирономид (*Procladius Skuze*, *Protanypus Kieff*, *Prodiamesa bathyphila*, *Limnophyes karelicus*), 3 — реликтовых ракообразных (*Pontoporeia affinis*, *Mysis oculata* v. *relicta*, *Gammaracanthus lacustris*) и 1 — моллюсков (*Neopisidium conventus*). Кроме видовой монотонности, население дна этого района характеризуется и крайне низкими количественными показателями: средняя численность — 90–250 экз./м², а биомасса — 0.3–0.8 г/м². Основную часть составляют олигохеты — 70%, на амфипод приходится 15, моллюсков — 8 и хирономид — 7%.

Среди особенностей профундального комплекса следует отметить летнее увеличение общей численности, что связано с небольшим удельным весом хирономид. Вылет их имаго почти не сказывается на плотности бентофауны. Размножение всех остальных групп компенсирует это незначительное снижение численности. Постоянное отсутствие освещенности делает затруднительным контроль за фотопериодичностью и другими важными функциями жизнедеятельности хирономид, в частности вылетом. В этом случае превращение в имаго контролируется, видимо, главным образом температурным фактором. Аналогичная ситуация сложилась и в высоких широтах, где фотопериодический сигнал к вылету сильно ослаблен и его функцию выполняет температура [280]. Интересно, что профундальный комплекс Ладожского озера представлен только мирными формами хирономид, в то время как в Онежском встречаются и хищные.

Крупные губы, особенно их вершинные районы, испытывают наибольшие антропогенные нагрузки, что определяет характер их донных сообществ. В Кондопожской губе основным загрязняющим фактором являются сточные воды ЦБК, содержащие большое количество органических

и минеральных токсических веществ. Среднегодовая плотность донного населения губы составляет 1300 экз./м², биомасса — 1.3 г/м². Во все сезоны года доминируют олигохеты. В районе, расположенном вблизи выпусков, кроме различных высокотоксичных химических соединений, сточные воды содержат и значительные количества взвешенных веществ, древесных остатков и древесной ваты, оседающих на дно толстым слоем и способствующих созданию здесь мертвой зоны.

На некотором удалении от этого района в силу разбавления сточных вод озерными и продолжающегося поступления значительных количеств органической взвеси наблюдается заметное увеличение донного населения, представленного, однако, исключительно червями. На окисление поступивших сюда органических веществ уходит значительная часть растворенного в воде кислорода. В создавшихся своеобразных условиях способны существовать лишь немногие эврибионтные (эвриоксифильные) формы, такие как *Potamothrix hammoniensis* и *Tubifex tubifex*. В отсутствие конкуренции и хищников их численность достигает больших для Онежского озера величин — 8600 экз./м² при биомассе 4.5 г/м². Такие крупные скопления несомненно способствуют минерализации и переработке определенных количеств органического вещества, выполняя при этом барьерную функцию, задерживая проникновение его в открытую часть озера. Подобные ситуации отмечаются и в других водоемах, подверженных сильному органическому загрязнению, например в Невской губе [255].

По мере все большего удаления от места выпусков сточных вод увеличивается насыщение придонных слоев кислородом (до 60–80%), но поступление аллохтонного органического вещества все еще остается высоким, что способствует развитию бентофауны, увеличению ее видового разнообразия. Общая численность достигает 2000–3000 экз./м² при биомассе 1.8–4.5 г/м². При этом олигохеты свою доминирующую роль уступают хирономидам (42%). Отмечаются и агрегации двусторчатых моллюсков (470 экз./м², осень). Тем не менее ближе к открытой части озера процесс седиментации аллохтонного органического вещества ослабевает, увеличивается приток озерных вод. Все это постепенно формирует характер бентофауны, аналогичный таковому плесовой части озера. Сходное распределение донного населения наблюдается и в других районах, подверженных сильному антропогенному влиянию — в Петрозаводской и Большой губах.

В состав бентоса Петрозаводской губы и ее внешней части (Петрозаводское Онего) входит 89 видов и форм животных, из которых олигохет в губе отмечено 27, а во внешней части — 43, хирономид — 39 и 24 соответственно. Средняя численность донного населения в губе составляет 1200 экз./м² при биомассе 1.8 г/м², а в Петрозаводском Онего — 1300 и 1.13 соответственно.

Район губы, согласно лимнологическим условиям и степени антропогенной нагрузки, может быть также разделен на несколько условных зон: 1) юго-западное (городское) побережье; 2) северо-восточное малозаселенное побережье с пониженными показателями продуктивности донного сообщества; 3) центральная глубоководная зона повышенной продуктивности сообществ.

Стоки предприятий с территории города обуславливают ярко выраженную очаговость в распределении донной фауны городского побережья. Наряду с общим качественным и количественным оскудением отмечаются вспышки развития наиболее выносливых форм, как правило, олигохет и нематод. Так, в устье р. Лососинки численность первых в зимнее время достигала 10 тыс. экз./м². Вторая зона отличается более равномерным распределением бентоса, бедностью олигохетофауны, отсутствием видов, характерных для загрязненных вод городского побережья. Среди хирономид преобладают *Orthocladinae*, отмечены и реликтовые ракообразные.

Зоной повышенной продуктивности является центральная котловина губы, где кумулируются питательные вещества, поступающие с мелководья. Зообентос этого района представлен 14 видами хирономид, 9 — олигохет, а также моллюсками и амфиподами (до 3660 экз./м²). Обычно богатая литоральная зона в губе с песчаными пляжами отличается сравнительной бедностью, что вызвано подверженностью ее сильному волновому воздействию. Снижение продуктивности бентофауны, как и в других крупных губах, происходит в направлении к ее внешней части. В целом губа по специфике зообентоса приближается к мезотрофным водоемам. В связи с возрастающим антропогенным воздействием следует ожидать последующего развития процесса ее эвтрофирования.

Бентофауна Повенецкого залива в целом разнообразна как по качественным, так и по количественным показателям, что обусловлено, с одной стороны, лимнической гетерогенностью и значительным антропогенным воздействием — с другой. По структуре донного населения этот залив может быть разделен на районы Медвежьегорского побережья, мелких губ и открытой части. Последняя характеризуется всеми особенностями профундаля, в том числе и низкими показателями продуктивности зообентоса (360 тыс./м² и 1.5 г/м²).

Медвежьегорское побережье и мелкие губы (Челмужская, Оровгуба и Пергуба) отмечены наличием локального промышленно-бытового загрязнения. Мелководье, хорошая прогреваемость, близость берегов и обилие микрофитов способствуют развитию здесь богатой и разнообразной фауны. В Челмужской губе численность донного населения достигает сравнительно больших величин — 1800 экз./м² при биомассе 8 г/м² (весна), а в Оровгубе — 1500 и 3.1 соответственно. Доминируют хирономиды (54% численности и 70% биомассы). Интересно отметить, что в Пергубе, расположенной на севере Повенецкого залива, в 60-х гг. происходили дноуглубительные работы, уничтожившие все донные биоценозы. Исследования последних лет показали, что они полностью не восстановились, несмотря на продолжительное время. Это свидетельствует о чрезвычайно медленном восстановлении нарушенных биоценозов в Онежском озере и подтверждает чрезвычайную длительность регенерационных процессов, вообще характерную для высоких широт.

Береговая линия северной части озера сильно изрезана множеством закрытых мелководных губ и заливов (шхерный район). Характер их биоценозов явно мезотрофный. Однако в крупных и глубоковод-

ных Уницкой и Лижемской губах количественные показатели зообентоса приближаются к таковым открытой олиготрофной части озера (400 экз./м² и 1.1 г/м²).

Следует указать и на специфику бентофауны макрофитов, которые служат для нее не только субстратом, но и пищей. Эту зону в Онежском озере населяет 190 видов и форм животных [96]. Их качественные и количественные характеристики зависят от типа зарослей и характера грунтов. В смешанных ассоциациях фауна значительно богаче. Так, в чистых ассоциациях хвоща в районе южной части Пергубы плотность животных достигает 750 экз./м² при биомассе 4.1 г/м², в то время как в смешанных зарослях этого района — 1600 и 24.5 соответственно. Следует отметить, что эта зона для озера в целом не играет скольконнибудь существенной роли, поскольку ее площадь составляет всего 1.3% от всей литоральной части.

Основные продукционные процессы в озере связаны с литоралью, особенно с зоной обрастания прибрежных камней. Так, в Горской губе плотность зоофитона камней достигала 40–51 тыс. экз./м² при биомассе 21 г/м², а в Петрозаводской, в районах, подверженных волновому воздействию, эти цифры хотя и снижаются, но все же остаются достаточно высокими для условий Онежского озера — 15 тыс. экз./м² при 2.1 г/м². Продукция биоценозов прибрежных камней примерно в 50 раз, а траты на обмен — в 70 раз выше, чем в глубоководных районах.

Огромная протяженность скалисто-глибовой и каменистой литорали, занимающей почти 50% всей литоральной зоны озера, а также колоссальная площадь обрастания делают вклад этих биоценозов в общую продуктивность озера чрезвычайно высоким. Зона обрастания выполняет и определенную барьерную функцию, поглощая часть аллохтонного органического вещества, поступающего с берегов, и задерживая его проникновение в центральную часть озера. Расчеты показали, что макробентос камней в районе Петрозаводского Онего за период открытой воды (май–октябрь) тратит на обменные процессы от 3.6 до 18 ккал/м², что эквивалентно деструкции 0.7–3.6 г органического вещества.

В литорали сосредоточено почти 80% всех форм донного населения. По мере увеличения глубины и одновременном снижении температуры видовое разнообразие и общая численность их резко снижаются. Так, в литорали Горской губы отмечено 199 видов, относящихся к 20 систематическим группам, т. е. 95% всего видового состава района. Однако начиная с глубины 25–30 м их число сокращается в 5 раз, а общая численность снижается до 370 экз./м² (0.94 г/м²).

Рассматривая основные группы донного населения, можно видеть, что доминирующей являются олигохеты. В целом по озеру их среднегодовая численность равна 630–800 экз./м² (52–55%), а биомасса — 0.8–1.3 г/м² (52–53%). В очагах повышенной загрязненности скопления червей могут достигать значительных для озера величин — 8–14 тыс. экз./м². В профундали основного плеса они составляют 90% численности. Примерно такой же процент червей отмечен и в профундали Ладожского озера [207].

В Большом Онего средняя численность олигохет составляет

160 экз./м² при биомассе 0.4 г/м². Как уже указывалось, их видовой состав обеднен и представлен в основном 4 видами. Развитию олигохет в этом районе, кроме обычных условий профундали, препятствуют и наличие рудной корки, и небольшое содержание органического вещества в донных отложениях (углерод — 2.2, азот — 0.2%)*.

В Петрозаводском Онего максимальное количество видов олигохет приходится на наидид — 56%, а на тубифицид — только 28%. Однако наиболее встречаемые — это представители люмбрикулид и тубифицид (40–80%). Районы сброса сточных вод характеризуются высокой плотностью олигохет — 3000 экз./м² при биомассе 3 г/м². В основном это *Tubifex tubifex* (160 экз./м²), в литорали к нему присоединяется *Nais variabilis* (1400 экз./м²). В последней обнаружено 33 вида червей, из них наидид — 51, тубифицид — 33%. Наиболее распространены *Lamprodrilus isoporus* и *Spirosperma ferox*, которые доминируют и в профундали озера.

Максимальное количество видов (9) обнаружено на тростнике, наименьшее — на нимфейных (4), минимальная численность — на камыше (50 экз./м² при биомассе 0.02 г/м²), наибольшая — на рдесте (1500 и 0.04). На подвижных песках в зоне прибоя черви отсутствуют, но на каменисто-галечных грунтах они составляют 25% численности и 30% биомассы фауны [206]. В смывах с прибрежных камней доминируют *Naididae* с руководящими формами *Nais barbata* и *Chaetogaster diaphanus*, образующими скопления до 3000 экз./м². Средняя плотность олигохет — 1000 экз./м², максимальная — 8700, что объясняется специфическими условиями обитания в литорали [88].

Основными абиотическими факторами, определяющими степень развития олигохет, являются придонная температура и обилие пищи. При этом в эвтрофных озерах, где количество пищи почти не лимитировано, на первый план выступает температурный фактор. В олиготрофных условиях, при дефиците пищи, температурный фактор свою определяющую роль уступает пищевому. Это хорошо прослеживается в открытых районах Онежского озера, где плотность червей не обнаруживает четкой связи с глубиной (а значит, и с температурой), но где наблюдается корреляция между степенью развития олигохет и содержанием органического вещества в донных отложениях (табл. 64). Так, максимальная для района исследований численность олигохет составляла 2460 экз./м² и приходилась на глубину 7 м, где донные отложения содержали 3% органических веществ. На такой же глубине, но при содержании органических веществ в иле, равном 0.81%, их численность была почти в 8 раз меньше (300 экз./м²).

Наиболее распространенным в озере видом является *Lamprodrilus isoporus*. Он обнаружен в 72% проб. Его встречаемость, например в Петрозаводском Онего, в 6 раз, а индекс доминантности — в 4 раза выше, чем у *Tubifex tubifex*, — убиквиста, широко распространенного в Карелии эврибионтного вида. *Lamprodrilus isoporus* — исключительно озерный вид, реликт доледниковой пресноводной фауны, холодолюбивая оксифильная

* Данные Е. П. Васильевой.

Таблица 64

Связь численности олигохет (экз./м²) с глубиной и наличием органического вещества в донных отложениях Петрозаводского Онего

Численность	Глубина, м	Органики в донных отложениях, %*
2460	7	2.99
2207	20	1.88
1667	22	3.58
1028	28	4.47
311	6	0.81
306	12	0.14
166	17	0.60

* Данные Е. П. Васильевой.

форма, в основном населяющая профундаль древних глубоководных водоемов Фенноскандии. Давно заселив Онежское озеро, он, видимо, оказался лучше приспособленным к специфике его условий и легче выдерживает конкуренцию с более поздними вселенцами. Его численность иногда достигает 2000–3000 экз./м².

Распространенным видом является и *Spirosperma ferox* — один из наиболее массовых видов в Карелии. В озере он заселяет как литораль, так и профундаль. В Петрозаводском Онего его средняя численность невелика — 60 экз./м², встречаемость — 44%, а в Кондопожской губе и в Свирском Онего — 250 экз./м². Максимальная численность этого вида — 1800 экз./м² — наблюдалась зимой в северо-западной части Петрозаводской губы.

Из тубифицид также следует отметить *Tubifex tubifex* и *Potamothenis hammoniensis*. В районах с экстремальным кислородным режимом и обилием аллохтонного органического вещества они способны образовывать сравнительно крупные скопления в несколько тысяч экземпляров на 1 м². Из эндемичных форм можно упомянуть *Lamprodrilus achaeus*, *Tubifex kessleri kessleri*, *Peipsidrilus pussilus* и *Rhynchelminis granuensis onegensis* [187, 221], а из редко встречаемых в озере видов — *Arcteonais lomondi*, *Piguetiella blanci*, *Limnodrilus helveticus* и *Lumbriculus lineatus*.

Олигохеты, в особенности тубифициды, будучи грунтоедомы, способствуют не только разрыхлению грунта и улучшению его кислородного режима, но и выносу его из редуцированного слоя на поверхность, в результате чего органические вещества, содержащиеся в нем, подвергаются окислению, обеспечивая в определенной степени самоочищение донных отложений. При этом тубифициды способны пропустить за сутки через кишечник количество грунта, в 4–9 раз превышающее их собственную массу [178, 179, 265]. В районах с максимальной биомассой червей — 4.5 г/м² (Кондопожская губа) они выносят на поверхность 36 г/м², или 1 кг/м², ила за месяц активной деятельности. По сравнению с результатами деятельности олигохет в других водоемах это

Таблица 65

Распределение хирономид по разным районам озера

Подсемейство	Петрозаводское Онего	Петрозаводская губа	Кондопожская губа	Большая губа	Центральное Онего	Свирское Онего
Chironominae	12	16	23	20	1	—
	50	41	63	59	17	—
Orthoclaadiinae	9	21	11	12	4	—
	37	54	29	35	66	—
Tanytopodinae	3	2	3	2	1	—
	13	5	8	6	7	—
Всего видов	24	39	37	34	6	15

Примечание. Над чертой — число видов, под чертой — % от общего числа таксонов.

максимальное для озера количество вынесенного грунта представляется ничтожно малым. Так, например, в верховьях р. Сухоны тубифициды за один месяц выносят на поверхность 86 кг/м² грунта [7].

Весьма распространенной группой донного населения озера являются личинки хирономид. Они представлены почти во всех биоценозах озера. Всего обнаружено 103 таксона, что составляет 74% форм, известных для Карелии. Средняя численность по озеру равна 300–480 экз./м² (42%), а биомасса — 0.1 г/м² (28%). В районах, наиболее сильно затронутых антропогенной эвтрофикацией (Кондопожская, Петрозаводская, Большая губы), преобладают личинки подсемейства *Chironominae*, в олиготрофных — *Orthoclaadiinae* (см. табл. 65).

Значительное развитие хирономид наблюдается в закрытых, мелководных, хорошо прогреваемых губах и небольших заливах, например в Челмужской, Оровгубе и в вершинной части Горской. Здесь донные осадки богаты органическим веществом. Количество личинок хирономид в таких районах может быть сравнительно высоким и достигать 1300 экз./м² при биомассе 6 г/м².

Профундальные формы хирономид — хищники, кроме *Trissocladius parataticus* — пелофила, предпочитающего тонкозернистый серо-зеленый ил с примесью руды. Все они эврибатные и эвритермные виды. Основная масса хирономид озера — убиквисты, широко распространенные в Карелии палеарктические формы (*Cryptochironomus gr. defectus*, *Chironomus f. l. bathophilus* и др.). Для Петрозаводского Онего наиболее массовыми видами являются *Trissocladius potamophilus*, *Procladius ferrugineus*, *Micropectra gr. praesox*, *Tanytarsus gr. gregarius*, *Polypedium breviantennatum*. В Кондопожской губе среднегодовой индекс доминантности у *T. potamophilus* в 5 раз ниже такового в Петрозаводском Онего. В Свирском Онего наибольшая плотность — 400 экз./м² — обнаружена у *Trissocladius parataticus*. В истоке р. Свири найдено 17 видов, из них 6 встречается в озере.

Таблица 66

Сезонная динамика численности (экз./м²)
и биомассы (г/м²) хирономид в Петрозаводской губе
(средние данные, 1976 г.)

Сезон	Численность	Биомасса
Зима (март)	344 (11.5)	0.28 (7.8)
Весна (июнь)	170 (29.0)	0.17 (16.0)
Лето (август)	253 (29.0)	0.31 (18.5)
Осень (октябрь)	40 (9.0)	0.07 (6.7)

Примечание. В скобках — %.

Поскольку хирономиды представляют собой гетерогенную группу, сезонная динамика их биомассы и численности особенно резко выражена (табл. 66).

Как уже указывалось, многие бентосные организмы принимают активное участие в перераспределении и трансформации веществ в донных отложениях, разрыхляя и выедавая содержащиеся в них органические соединения, а также перемешивая их и таким образом влияя на процесс обмена веществ между ними и водой. Проникая в глубь осадков, организмы способствуют окислению их органических веществ. Определенная роль в этом принадлежит и хирономидам.

Как известно [8, 10], количество потребляемой личинками хирономид пищи в течение вегетационного сезона превышает их среднюю биомассу примерно в 23 раза. Исходя из того что в Онежском озере средняя биомасса хирономид равна 0.1 г/м², их рацион должен составлять 2.3 г/м². В закрытых губах и в зоофитоне эта величина может значительно возрасти. Например, в небольшой закрытой Челмужской губе она равна 133 г/м², т. е. приблизительно такое же количество грунта подлежит ферментативной обработке и изъятию из него ряда органических компонентов.

Хирономиды, будучи амфибиотическими формами, вместе с вылетом имаго выносят из водоема и вещества, накопившиеся в теле личинок в результате жизнедеятельности. В частности, это могут быть биогенные элементы донных отложений. Располагая сведениями о биомассе личинок в разных районах озера, а также о количестве накопленных в их теле биогенных элементов (органического углерода, азота и фосфора) [281] и о степени концентрации их в донных отложениях, можно рассчитать среднее количество органических веществ, удаляемое из озера с вылетом имаго. Расчеты показали, что все эти величины в Онежском озере ничтожно малы (табл. 67). Если учесть, что с каждым вылетом численность хирономид сокращается на 5% [15], а комары выносят из донных отложений около 50% органических веществ, заключенных в личинках [281], то эти и так чрезвычайно низкие показатели уменьшатся еще на порядок. Понятно, что такая крайне незначительная величина биогенов, удаляемых из озера, обусловлена сравнительно небольшой биомассой и численностью хирономид, что характерно для основной

части озера, а также некоторыми гидрологическими особенностями последнего, такими как большие глубины и ярко выраженная холодноводность — в основной части озера зона температурного скачка лежит выше средней глубины и летом вся профундаль покрывается мощным слоем гипolimниона; отношение эпилимниона к гипolimниону становится меньше 1.

Одна из особенностей донного населения озера — это сравнительно слабое развитие его малакофауны, что, видимо, связано как с низкой минерализацией воды и невысоким содержанием в ней кальция (раковины онежских моллюсков обычно очень тонкие и хрупкие), так и с большой протяженностью побережий с высокой прибойностью. Всего в озере брюхоногие моллюски представлены 28 видами, что составляет 82% от числа видов гастропод, описанных для Карелии.

Гастроподы приурочены в основном к небольшим глубинам литоральной зоны. В Онежском озере большим их развитием характеризуются его северные шхерные районы с множеством мелких губ с затишными зарослевыми или скалистыми литоральями. Южная часть озера с ровной береговой линией, песчаными берегами, открытыми прибою, менее пригодна для их существования.

Одним из наиболее распространенных в озере родом является *Limnaea*. Так, *L. stagnalis* — очень часто встречающийся вид — способна переносить значительные температурные колебания и существовать даже в слабокислой воде. Ее онежская популяция характеризуется меньшими средними размерами раковины по сравнению с таковыми средневропейских популяций. Кладки появляются в начале июня. На обломочно-каменистой литорали Петрозаводской губы отмечены *L. stagnalis* var. *subulata* Weet., а в зоне прибоя — *L. lagotis*. Интересно, что многие экземпляры этого вида на последнем обороте раковины имеют горбообразное утолщение, рассматриваемое как деформация; полученная в результате действия прибойных волн [213]. *Limnaea peregra* приурочена в основном к скалистой литорали; *L. truncatula*, указанная для Петрозаводской губы Лютером [284], при более поздних исследованиях обнаружена не была.

Из других родов встречается *Anisus*: на каменистой затишной литорали — *A. vortex*, а на скалистой — в значительных количествах *A. contortus* и *A. albus*. В зарослевой литорали отмечены *Valvata cristata* и *V. piscinalis*, *Bithynia tentaculata* и *V. leachi*. В устье р. Андомы обнаружен *Viviparus contectus*, однако в озеро этот вид, видимо, не проник.

Что касается двусторчатых моллюсков, то они отмечены почти во всех биотопах, особенно на илистых и илисто-песчаных грунтах, от литорали и до максимальных глубин. Тем не менее моллюски явно тяготеют к небольшим, хорошо прогреваемым участкам. Так, в районе Петрозаводского Онега на глубине 6–9 м их численность превышает 150 экз./м², на уровне 10–20 м она снижается до одного–нескольких десятков, а на больших глубинах наблюдаются лишь единичные экземпляры. Для Онежского озера характерны мелкие формы, в основном представители *Pisidiidae*, из беззубок встречается лишь один вид — *Anodonta minima* (в Ладожском озере найдены 4 их вида). Средняя

Таблица 67

Накопление личинками хирономид органического углерода ($C_{\text{орг}}$), в различных районах Онежского озера

Район	Биомасса, г/м ²		Содержание в 5-сантиметровом слое, г/м ² *		
	сырая	сухая	$C_{\text{орг}}$	N	P
Профундаль Большого Онего	0.002	0.0003	414.5	60.2	1.78
Петрозаводская губа	0.2	0.03	21.88	24.62	7.05
Петрозаводское Онего	0.14	0.02	176.4	32.83	4.1
Кондопожская губа	0.5	0.08	647.0	46.5	12.9
Челмужская губа	5.8	0.9	495.2	34.2	21.4

* Данные Е. П. Васильевой.

плотность моллюсков по озеру — 60 экз./м² (7%), а биомасса — 0.06 г/м², в Петрозаводской и Кондопожской губах — 90 и 0.18, а в профундали Центрального Онего — всего 20–40 и 0.04 соответственно.

В Кондопожской губе по отношению к другим компонентам донного населения моллюски составляют 5%, а частота их встречаемости достигает 51%. Наибольшее видовое разнообразие (6 видов) наблюдается в районе южнее о-ва Суйсарь. Значительной численностью характеризуются *Euglesa lilljeborgi* (200 экз./м²) и *E. casertana* (270). Весной средняя по губе численность составляет 60 экз./м², в летне-осенний период она увеличивается до 90, а зимой снижается в 3 раза.

В Петрозаводском Онего отмечено 9 видов. Их численность и биомасса составляют по 12% от общих, частота встречаемости — 80%. Максимальной среднегодовой плотностью отличаются *Neopisidium conventus* (160 экз./м²) и *E. casertana* (140), наименьшей — *Sphaerium nitidum* (22 экз./м²).

Пространственное распределение моллюсков в сублиторали характеризуется четко выраженной пятнистостью. Так, на некоторых участках Петрозаводского Онего встречаются агрегации, насчитывающие до 1500 экз./м², в то время как на других станциях этого же района наблюдаются единичные экземпляры или моллюски вообще отсутствуют.

Как уже упоминалось, к обитанию в условиях профундали вплоть до максимальных глубин (120 м) приспособился лишь один вид — *Neopisidium conventus*. Проникновение в районы озера, характеризующиеся рядом морфофизиологических особенностей этого вида. Так, будучи выраженным криофилом, он оказался способным осуществлять фильтрацию при температурах 2–5 °С, т. е. при таких низких, при которых у других моллюсков процесс фильтрации прекращается.

азота (N) и фосфора (P) из донных осадков (сух. масса, усредненные данные)

Содержание в личинках					
$C_{\text{орг}}$		N		P	
г/м ²	доля от накопления на дне, %	г/м ²	доля от накопления на дне, %	г/м ²	доля от накопления на дне, %
$2 \cdot 10^{-4}$	$5 \cdot 10^{-8}$	$2 \cdot 10^{-5}$	$3 \cdot 10^{-5}$	$2 \cdot 10^{-6}$	$1 \cdot 10^{-4}$
0.015	0.07	0.002	0.008	0.0002	0.009
0.01	0.006	0.001	0.003	0.00015	0.004
0.04	0.006	0.006	0.01	0.0006	0.004
0.45	0.09	0.07	0.2	0.007	0.003

Придонные слои на больших глубинах содержат небольшое количество взвешенного органического вещества, и получение в этих условиях достаточного количества пищи возможно лишь за счет более высокого, чем у других родов, коэффициента фильтрации [8]. Для нормального существования вида важно обеспечить эффективность процесса его размножения и различные адаптации, связанные с ним. Так, все *Pisidiidae* — гермафродиты, развитие оплодотворенных яиц происходит в марзупиях. В условиях седентарного или полуседентарного образа жизни и сравнительно невысокой плотности эти приспособления несомненно способствуют успешному размножению. На больших глубинах предельно низкая плотность популяции и невысокая плодовитость сильно снижают вероятность встречи разнополых гамет и осуществление процесса оплодотворения. Избежать этого удастся не только наличием гермафродитизма, но и самооплодотворением, что характерно именно для *N. conventus*. Кроме того, у всего рода *Neopisidium* наблюдается неотения, т. е. очень раннее созревание гонад. Гонады созревают раньше, чем сформируются сифоны [218]. Другая важная адаптация, делающая возможным существование моллюсков на больших глубинах, — это способность переносить огромное давление — 12 атм [218]. Все эти приспособления помогают *N. conventus* существовать в столь необычных для пресноводных моллюсков условиях.

Двустворчатые моллюски являются фильтраторами, утилизирующими взвешенное органическое вещество и таким образом участвующими в процессе биологической очистки воды. Известно [8], что интенсивность фильтрации моллюсков является функцией их массы. Используя эту зависимость и внося соответствующие температурные поправки и коэффициенты [8, 40, 71], рассчитали средние величины взвешенного органического вещества, которое моллюски способны удалить из придонных горизонтов сублиторали. Поскольку их фильтрационная активность в Онежском озере длится в основном с июня

по сентябрь, то учитывался лишь этот период. Расчеты показали, что за это время двустворчатые моллюски района Петрозаводского Онего осадили из воды всего около 12 кг/км^2 взвешенного органического вещества. Почти такая же величина — 12.3 кг/км^2 — характерна и для Кондопожской губы. Для сравнения укажем, что в некоторых прудах Средней России (Калининская обл.) популяция *Sphaerium corneum* лишь за 1 сут удаляет из воды 168 кг/км^2 органического вещества [8]. Это с очевидностью свидетельствует о предельно низкой самоочистительной способности моллюсков в условиях холодноводного олиготрофного Онежского озера.

Высшие ракообразные представлены небольшим количеством видов из отрядов: равноногих — *Asellus aquaticus* L., амфипод — *Gammarus lacustris* Sars, *Pontoporeia affinis* Lindstr., *Gammaracanthus lacustris* Sars, *Pallasea quadrispinosa* Sars и мизид — *Mysis oculata* var. *relicta* Loven.

Asellus aquaticus обитает в основном в литорали мелких затишных губ, заросших макрофитами. Обычно он не опускается ниже 2–5 м, однако встречается и на глубине 25 м. Интересно, что такие глубоководные формы приобретают и некоторые специфические морфологические признаки. Так, у них удлинняются конечности и антенны, а в покровах снижается количество пигментов [52]. Поздней осенью литоральные формы совершают миграции в более глубоководные участки, чтобы избежать промерзания. Второй представитель пресноводных равноногих — *Mesidothea entomon*, обитающий в Ладожском озере, в Онежском отсутствует.

Гаммаруса, как и водяного ослика, в озере немного. Он также заселяет затишные мелководные губы с обильной водной растительностью и иловым или песчаным дном. Являясь солоноватоводной эвригалинной формой в маломинерализованной воде Онежского озера он ощущает недостаток кальция, так необходимого ему для затвердения хитиновых покровов и, особенно, ротовых частей, главным образом после линьки. Будучи оксифилом, гаммарус зимует в верхних слоях на остатках высшей водной растительности, где вода больше насыщена кислородом, или опускается в сублитораль.

Все остальное амфиподы и мизиды представляют собой реликты иольдиевого времени. Наиболее крупным из них является гаммарокантус. Это стенотермно-холодолюбивая и стенооксифильная форма. Обитает только в профундали крупных олиготрофных озер. В Онежском начинает встречаться с глубины 30 м. В работе Б. М. Александрова [3] указано, что основными местообитаниями гаммарокантуса являются профундаль Центрального, Малого и Большого Онего, глубоководные районы Повенецкого залива, Кондопожской, Петрозаводской и Большой губ. С глубиной плотность рачка увеличивается, но значительных скоплений в озере он не образует. Наибольшая численность приходится на глубокие впадины и может достигать 2.3 экз./м^2 , средняя в Большом Онего составляет 0.5 экз./м^2 (0.001 г/м^2). Наибольшая биомасса не превышает 0.014 г/м^2 . Тем не менее в наших многолетних сборах гаммарокантус встречался крайне редко и лишь в профундали Лижемской губы.

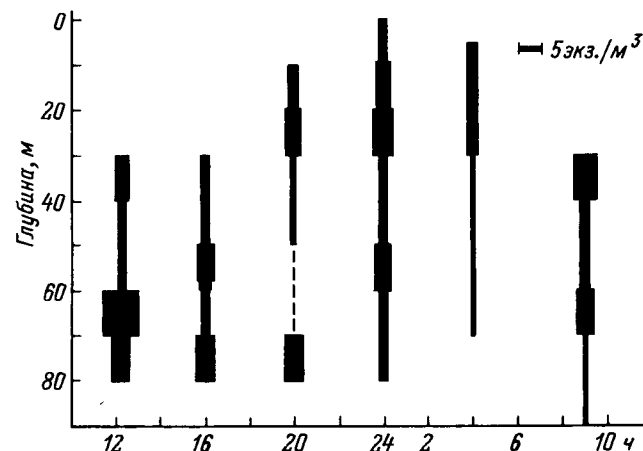


Рис. 43. Суточная миграция мизид в заливе Большое Онего (октябрь 1978 г.).

Понтопорей — типичный, широко распространенный представитель реликтового комплекса озера. Отмечена во всех его районах с илистыми грунтами. Это окси- и криофильная форма, способная, однако, переносить и сравнительно высокие температуры. Размножается зимой. В губах образует скопления. По нашим данным, в Кондопожской губе этот рачок обнаружен лишь в районе, граничащем с открытым плесом; среднегодовая численность здесь составляет 70 экз./м^2 (5%) при биомассе 0.19 г/м^2 (10%). В глубоких впадинах губы летом иногда встречаются скопления до 2000 экз./м^2 при биомассе 2 г/м^2 . В Петрозаводском Онего среднегодовая численность в 2.5 раза меньше — 27 экз./м^2 (2%), биомасса — 0.2 г/м^2 (17%). Максимальная численность, наблюдавшаяся нами в Петрозаводском Онего, составляла 3600 экз./м^2 . Средняя для озера равна 90 экз./м^2 при биомассе 0.23 г/м^2 [58, 59].

Боклопав Палласа встречается во всех районах, независимо от глубин и качества грунта. В наших сборах максимальная численность этих рачков достигала 133 экз./м^2 (Заонежский залив, глубина 24 м). В губе Чеболакша на глубине 6 м его численность составила 66, а в Лижемской — 90 экз./м^2 (глубина 25 м).

Из мизид в озере, как и в других водоемах Карелии, известен лишь один вид — мизида реликтовая. Это оксифильная форма. Распространена от литорали до максимальных глубин, но встречается преимущественно в придонных горизонтах. Наблюдаются суточные вертикальные миграции (рис. 43). На отдельных участках Центрального Онего численность доходит до 74 экз./м^2 при биомассе 0.3 г/м^2 , однако средняя по озеру плотность не превышает 30 экз./м^2 . В районах с повышенной трофностью, подверженных заилению и зарастанию, мизиды отсутствуют. Они не обнаружены в полуизолированных губах Повенецкого, Толвуйского и Пялемского Онего, в Челмужской, Горской, губе Святуха и Кефтенгубе. Они встречаются на мелководье южной части озера, в устье р. Вытегры (глубина 6 м). Размножение происходит в осенне-зимнее время.

Фауна нематод Онежского озера изучена слабо. В Большом Онего обнаружено 15 родов. Из них наиболее часто встречающиеся – *Igonus* и *Mononchus*. Интересно, что первый доминирует и в водоемах Кольского полуострова. Господство этого рода в районе Фенноскандии считается редким явлением [263]. Наибольшей численностью отличается *I. tenuicaudatus* – 16 000 экз./м² и 57 мг/м² и *Tobrillus medius* – 9000 и 105 соответственно. В некоторых районах Центрального Онего количество нематод может достигать до 16 000 экз./м² при биомассе 1 г/м² [187].

Таким образом, бентофауна Онежского озера представляют в основном широко распространенные в Карелии палеарктические виды, среди которых заметное место занимают холодолюбивые северные формы. Имеется сравнительно большое количество реликтовых организмов.

Донное население озера, будучи разнообразным, представляет собой ценную кормовую базу для многих видов рыб – бентофагов. Его сравнительно невысокая биомасса компенсируется огромными площадями озера.

Анализ многолетних исследований показал, что на большой акватории озера, главным образом в его открытой части, характер донной фауны, ее продуктивность за последние 20 лет не претерпели существенных изменений и остались на прежнем олиготрофном уровне. Процессы эвтрофирования, которые несомненно уже затронули Онежское озеро, проявляются главным образом в его периферических и наиболее подверженных антропогенному влиянию районах. При этом структура биоценозов изменяется, увеличивается продукция и снижается видовое разнообразие. Важно отметить, что районы, на которые воздействует загрязнение, расширяются в сторону открытой части озера. Так, если в 60–70-е гг. загрязнение Кондопожской губы доходило примерно до района о-ва Сокольего, то в настоящее время в результате поступления в губу огромных объемов сточных вод, несовершенства очистных сооружений, а также низкой самоочистительной способности водоема почти вся территория губы в той или иной мере подвержена влиянию загрязнения, которое постепенно выходит за ее пределы.

Оценка возможных изменений донной фауны, естественно, связана с изменением качества воды, увеличением антропогенной нагрузки на озеро, а также введением в строй запланированной мощности очистных сооружений. При неблагоприятных прогнозах качества воды Онежского озера можно ожидать постепенного снижения в нем численности стенобионтов, оксифилов и реликтовых форм, повышения удельного веса олигохет. Виды, доминирующие в олиготрофных водах водоема (*Lamprodrilus isoporus*, *Spirosperma ferox*, некоторые *Orthocladia* и др.), будут вынуждены уступить свое лидирующее положение видам-убиквистам.

7. ВЛИЯНИЕ БИОГЕННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ НА РАЗВИТИЕ ТОКСИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА У ГИДРОБИОНТОВ

Эвтрофирование водоемов, основной причиной которого является антропогенное поступление в них биогенных веществ, повсеместно ухудшает качество воды. Второй стороной, отражающей аспект проблемы „чистой” воды, является токсикация водоемов, т. е. изменение качества воды под воздействием химических факторов антропогенного происхождения. Эти 2 явления изучаются, как правило, самостоятельно, хотя методические подходы часто и совпадают. Если не касаться подробностей развития процессов токсикации и эвтрофикации водоемов, то при всем многообразии форм их взаимного влияния (комплексирование, подавление или стимуляция развития отдельных компонентов и др.) можно утверждать, что количественной и качественной сторонам этих процессов уделяется мало внимания.

В развитие вопроса были предприняты исследования по экспериментальному моделированию процесса взаимодействия элементов, вызывающих эвтрофирование (минеральный фосфор, нитратный азот), и токсических факторов различной химической природы (пестициды, детергенты, тяжелые металлы). При выборе диапазона концентраций учитывались содержание веществ в воде водоемов и предположительная нагрузка в местах сброса или стока, а также при аварийных ситуациях.

В настоящее время осознается мысль о том, что при выполнении работ по эколого-токсикологическому скринингу и определению предельно допустимых концентраций необходимо учитывать экологический тип водоемов. В этой связи уместно предположить, что поведение токсических компонентов может быть различным в зависимости от трофического статуса водоема.

Многие водоемы Карелии, в том числе и Онежское озеро, олиготрофного типа, но в связи со значительным влиянием антропогенных факторов наблюдается заметная тенденция их к эвтрофированию при одновременном химическом загрязнении.

В силу сложившихся обстоятельств уместно привести результаты изучения процесса сопряженного действия на организм биогенных элементов и токсических веществ. В качестве основного модельного тест-объекта использовали лабораторную культуру *Daphnia magna* Str. В водной токсикологии резистентность дафний в эксперименте продолжительностью 30 сут („дафниевая единица”) принята за единицу измерения токсичности [91]. В качестве контроля и для приготовления

опытных сред брали воду Онежского озера (водопроводная, хлорированная). Она низкоминерализована, малоокрашена, бедна биогенными элементами, особенно минеральными формами азота и фосфора (см. раздел 4).*

Тестовыми реакциями для дафний служили такие показатели, как смертность, плодовитость (реальная и потенциальная), физиологическое состояние (окраска тела, накопление жира, степень наполнения кишечника, его состояние и окраска). Для оценки использовали стандартные шкалы Л. А. Лесникова [91]. Для других видов организмов регистрировали процент их смертности и этологические характеристики (в острых опытах). Фиксировали время гибели 50% организмов (LT_{50}) и 100%-ную смертность. Острые (96 ч), подострые (10 сут) и хронические эксперименты (30 сут с каждым поколением организмов) проводили методом планируемых добавок. Математическую обработку данных производили методом двухфакторного дисперсионного анализа.

Изучались воздействие на организмы биогенных добавок как самостоятельных факторов и их влияние на развитие токсического процесса при действии на гидробионты пестицидов (далапон, семерон, цинеб), тяжелых металлов (никель) и детергентов („Лотос”). В воду вносили биогенные добавки в виде минерального фосфора (KH_2PO_4) и нитратного азота (KNO_3).

7.1. Влияние биогенных элементов на токсичность пестицидов

Водоемы с различной степенью трофности обладают неодинаковыми устойчивостью к токсикантам и скоростью перехода в состояние нарушенного равновесия. Теоретически эвтрофные водоемы должны быть более устойчивыми к действию токсикантов, чем олиготрофные и дистрофные. При определении уровня устойчивости гидробионтов к токсическим агентам важное значение имеют различные абиотические факторы. Они могут оказать существенное влияние на динамику интоксикации организма, порог его устойчивости, латентный период и т. д. Это влияние может быть прямым (непосредственно на живой организм) или косвенным, предполагающим изменение токсичности путем снижения истинной концентрации в результате физико-химических превращений.

При изучении влияния на организм дафний биогенных элементов как самостоятельных факторов в воду вносили минеральный фосфор в концентрациях 0.005–1–10 мг P/л или нитратный азот — 0.5–1–10 мг N/л. Эксперименты (хронические) выполнялись на 2–4 поколениях.

Дополнительное внесение в воду фосфора в указанных концентрациях не оказало значительного влияния на выживаемость и плодовитость исходного поколения. Первое дочернее поколение выживало

лишь при 1 и 0.005 мг P/л. Плодовитость контактных особей близка к норме или несколько ниже. Наблюдения за жизнедеятельностью 2 последующих поколений свидетельствуют о том, что при высокой выживаемости их плодовитость претерпевает значительные флуктуации, что является показателем ухудшения условий обитания.

При дополнительном внесении нитратного азота в концентрациях 0.5–1–10 мг N/л обнаружена незначительная стимуляция выживаемости организмов или ее отсутствие для 1-х поколений, а также угнетение реальной и потенциальной плодовитости организмов 1-го дочернего и исходного поколений. Четвертое поколение дафний погибает в среде 10 мг N/л. Более отчетливое нарушение реальной плодовитости наступает в 3-м поколении, но в одних случаях это угнетение, в других — стимуляция.

Далее рассмотрим степень и характер влияния пестицидов семерона, цинеба и далапона как самостоятельных факторов и изменение их токсичности при увеличении в воде минеральных форм азота и фосфора.

Семерон (десметрин) — 6-изопропиламино-4-метиламино-2-метилтисосимтриазин — плохо растворим в воде, хорошо — в органических растворителях.

Сведения о токсичности этого препарата чрезвычайно противоречивы. Для теплокровных он малотоксичен. Способность к накоплению в организме выражена слабо. Тем не менее его предельно допустимая концентрация для воды рыбохозяйственных водоемов — всего 0.0005 мг/л, для водоемов санитарно-бытового использования — 0.01 [81]. По данным этих же авторов [81], семерон является умеренно токсичным для рыб и практически не влияет на пчел. В почве сохраняет свою активность до 14 мес и, постепенно мигрируя в ее более глубокие слои, поступает в водные системы. Второй путь поступления — смыв с полей.

Наши наблюдения показали, что в эксперименте в воде олиготрофного водоема без дополнительного внесения биогенов семерон оказал влияние на организмы в концентрации 10 мг/л и выше. Так, в среде, содержащей 50 мг/л препарата, LT_{50} равно 11 сут. Все организмы погибли к концу 3-й недели интоксикации уже в исходном поколении. Развития субитанных яиц не происходило. Аналогичное явление наблюдалось и при содержании 10 мг/л препарата в воде. При его концентрации 1 мг/л и высоком показателе выживания материнских особей развитие молоди угнетено, плодовитость резко понижена. С уменьшением содержания семерона в воде до 0.1 мг/л наблюдается стимуляция развития молоди, что также свидетельствует о неблагоприятных условиях обитания. Дафнии первого дочернего поколения появились лишь при концентрации 0.1 мг/л, 50% их погибло в течение 20 сут (LT_{50}). У сохранившихся организмов отмечено явление стимуляции развития молоди. В потомстве увеличилось количество самцов. Активность появившейся молоди угнетена. В первую очередь погибли самцы. Время гибели дафний второго дочернего поколения сократилось ($LT_{50} = 13$ сут).

* Данные Г. П. Пирожковой.

Наблюдается изменение поведенческих реакций, характер которых определяется концентрацией препарата. В диапазоне 10–50 мг/л отмечается стойкое понижение активности дафний, регулярное опускание на дно, у отдельных особей – вертячка; окраска тела бледная, мутная. При концентрации семерона 10 мг/л активность их восстанавливается, а при 0.1 мг/л повышена реакция на механическое раздражение. Здесь же через 3 нед появляется абортинированная молодь с явной патологией развития: хвостовой шип искривлен, антенны без верхних члеников. У летальных особей кишечник пуст или заполнен едва заметным содержимым, у некоторых тело сильно выдвинуто из-под щитка.

При внесении добавок минерального фосфора (0.005–110 мг Р/л) в среду с содержанием семерона 1 мг/л выяснилось, что с увеличением его количества токсические свойства последнего усиливаются, характер жизнедеятельности организмов изменяется. В среде с 1 мг/л семерона без дополнительного внесения фосфора выживаемость организмов остается высокой в течение всего месячного срока наблюдений, но размножение прекращается. Добавление фосфора, особенно в концентрации 10 мг/л, значительно сокращает продолжительность жизни дафний ($LT_{50} = 14$ сут). Резкое увеличение их смертности отмечено на 15-е сутки (до 85%), остальные погибли на 20-е. При использовании фосфора в более низких концентрациях (1 и 0.005 мг Р/л) смертность организмов также была значительна (60 и 40% соответственно).

Семерон в сочетании с самой высокой концентрацией фосфора уже на 1-е сутки контакта действует на организмы угнетающе. Они почти постоянно находятся в поверхностной пленке. На 2-е сутки окраска их кишечника становится охристой. У отдельных экземпляров наблюдается нарушение рефлекса равновесия, затем „вертячка” с последующим угнетением жизнедеятельности, предшествующим гибели. Для иммобилизованных особей характерно отсутствие жировых капель, прекращение питания, резкие судорожные движения антеннами и конечностями, постабдомен подтянут. Время появления первых субитанных яиц соизмеримо с контролем, но молодь появляется только при добавке 0.005 мг Р/л, т. е., если в других опытных средах развитие яиц прекращается от таковой в контроле. Тем не менее ситуацию нельзя считать благоприятной, поскольку в потомстве отмечены только самцы. Их выживаемость была на уровне контрольной группы.

В серии экспериментов с фосфорными добавками (в той же дозировке), но с более низким содержанием гербицида (0.1 мг/л) также обнаружены значимые различия в характере действия последнего. По тесту „выживаемость” особенно отчетливая картина наблюдалась при добавлении в среду 10 мг Р/л. Здесь LT_{50} равно 13 сут, летальный исход у всех подопытных организмов отмечен на 22-е сутки.

На время появления яиц в выводковой камере фосфорные добавки не оказали влияния, но плодовитость в среде с 10 мг Р/л была ниже контрольной, в вариантах с более низким содержанием фосфора либо происходила ее незначительная стимуляция, либо она сохранялась на уровне контроля. Молодь первого дочернего поколения в среде

с добавкой 10 мг Р/л (семерон 0.1 мг/л) нежизнеспособна. При сочетании семерона 0.1 мг/л с 1 мг Р/л фосфора наблюдалось образование только эфиппиумов, а с добавкой 0.005 мг Р/л молодь была нежизнеспособной или мертворожденной.

В среде семерона (1 мг/л) с нитратным азотом (0.5–1–10 мг N/л) длительное время сохраняется довольно высокая выживаемость организмов, лишь на 27-е сутки в растворе с добавкой азота в количестве 10 мг N/л она снижается до 35%. Скорость развития яиц в выводковых камерах не изменилась, но наблюдается значительная стимуляция плодовитости. Количество молодежи на одну самку становится в 11 раз выше, чем в контроле. При меньшем содержании азота плодовитость рачков также повышается (в 1.5–2 раза). Первые симптомы интоксикации в среде с добавкой 10 мг N/л появляются у дафний на 5-е сутки (резкое повышение активности, „вертячка”, изменение окраски). В конце опыта по линейным размерам рачки оказываются значительно крупнее контрольных (в 1.5 раза).

Выживаемость организмов 1-го поколения была высокой в течение всего периода наблюдений (30 сут), но происходила стимуляция плодовитости, что можно рассматривать как защитную реакцию популяции или как прямое раздражающее воздействие химических реагентов на гонады. Особенно отчетливо это проявляется в среде с добавкой 10 мг N/л. Организмы здесь также значительно крупнее. Ускорен и процесс появления первых яиц в выводковой камере. Говорить о безразличном отношении к сопряженному действию азота и семерона нельзя также и по той причине, что во 2-м дочернем поколении отрицательное влияние проявилось и по тесту „выживаемость”. В среде с семероном и с дополнительным внесением азота (10 мг/л) смертность организмов составила 65%, с 1 мг N/л – 40%.

Семерон в концентрации 0.1 мг/л (без добавок азота) не оказал видимого влияния на организмы по тесту „выживаемость”. При внесении 10 мг N/л нитратного азота увеличение смертности особей началось на 21-е сутки, на 28-е их погибло 60%. Плодовитость стала в 30 раз выше контрольной величины. В 1-м дочернем поколении также наблюдалась стимуляция плодовитости, но менее значительная.

Таким образом, токсичность пестицида семерон меняется в зависимости от содержания в воде нитратного азота и минерального фосфора. Этот препарат без биогенных добавок оказывает летальное действие на дафний исходного поколения, начиная с концентрации 10 мг/л и выше. Внесение 0.005–10 мг/л минерального фосфора в воду без гербицида не оказывает влияния на выживаемость организмов, но угнетает воспроизводительную функцию, вызывает появление эфиппиумов. Нитратный азот в концентрациях 0.5–1–10 мг/л не меняет показатель выживаемости, но стимулирует плодовитость. Появившаяся молодь нежизнеспособна.

Семерон в сочетании с минеральным фосфором в количестве 10 мг/л вызывает гибель организмов и в концентрациях 0.1–1 мг/л. В среде с более низкими добавками фосфора (0.05–1 мг Р/л) наблюдается понижение количественных характеристик выживаемости

организмов и отклонение от нормы деятельности воспроизводительной функции — частичное прекращение овогенеза и, как следствие, понижение плодовитости, появление самцов, эфипшиумов, нежизнеспособной молодежи. При совместном действии с нитратным азотом (10 мг N/л) также наблюдается понижение жизнеспособности организмов.

Ц и н е б — N, N'-этиленбис (дитиокарбамат) цинка. Нелетуч, почти нерастворим в воде, растворим в пиридине. Разрушается под воздействием света, тепла, влаги. Сведения по токсичности разноречивы. Малотоксичен для теплокровных. В организме накапливается слабо. Умеренно токсичен для рыб. В то же время предельно допустимая концентрация в воде рыбохозяйственных водоемов — 0.0004 мг/л. Рекомендован для опрыскивания растений в период вегетации, для внесения в почву и обработки посадочного материала [8].

В наших исследованиях действие этого препарата на дафний изучалось в диапазоне его концентраций 0.005–0.5 мг/л. Организмы исходного поколения при содержании в воде 0.05–0.1–0.5 мг/л цинеба (несмотря на его слабую растворимость) погибали в течение первых 2 нед (рис. 44, с. 238–239). Три следующих поколения смогли существовать лишь в среде с концентрацией токсиканта 0.02–0.005 мг/л.

Внесение фосфорных добавок в опытные емкости повлияло на общую картину развития токсического процесса. При самой высокой нагрузке (10 мг P/л) заметных изменений в динамике выживаемости организмов до 2-го поколения не наблюдалось, но организмы 3-го поколения погибли при содержании в воде 0.02 мг/л цинеба. Здесь и при его концентрации 0.005 мг/л наблюдается увеличение плодовитости дафний исходного поколения, а при более высоких оогенез прекращается.

При добавке фосфора в количестве 0.1 и 1 мг/л продолжительность жизни организмов при всех концентрациях токсиканта увеличивается — в первом случае у исходного и 1-го поколений, во втором — у трех.

Внесение нитратного азота в опытные емкости с цинебом показало, что при сочетании 10 мг N/л с 0.5 мг/л цинеба острая токсичность препарата сохраняется, погибают все организмы исходного поколения. При сопряженном действии азота в той же дозе и цинеба в количествах 0.05–0.1 мг/л продолжительность жизни дафний увеличивается. Сочетание азота с цинебом в концентрации 0.005–0.02 мг/л влияния на динамику выживаемости подопытных объектов не оказало.

Создается впечатление, что внесение добавок азота в концентрациях 1–10 мг N/л в среду с препаратом цинеб в какой-то степени способствует увеличению продолжительности жизни дафний при высоких концентрациях гербицида (0.05–0.1–0.05 мг/л), но в конечном счете они погибают даже в самых низких. При уменьшении азотной добавки до 0.5 мг N/л примерно такая же картина наблюдается у 3 поколений. Организмы 4-го поколения, вероятно, несколько адаптируются к среде, и в концентрации 0.005 мг/л препарата выживаемость находится в тех же пределах, что и без внесения азота (рис. 45, с. 240–241).

Д а л а п о н (пропинат) — *α, α*-дихлорпропина натрия. Хорошо растворяется в воде. В почве сохраняется активность до 120 сут. Является гербицидом системного действия. Для теплокровных малотоксичен. Способность накапливаться в организме выражена слабо. Предельно допустимая концентрация для рыбохозяйственных водоемов — 3 мг/л, для водоемов санитарно-бытового использования — 2. Рекомендован для опрыскивания вегетирующих однолетних и многолетних сорняков (необходимо избегать попадания раствора на культурные растения) [81]. Его действие на дафний изучалось в диапазоне концентраций 0.5–50 мг/л.

Высокий показатель по тесту „выживаемость” сохраняется в этих средах у 2 1-х поколений. Жизнедеятельность особей на этом по существу и прекращается. Организмы 2-го дочернего поколения выживают лишь в среде с самой низкой концентрацией препарата (0.5 мг/л), у дафний 3-го дочернего поколения при этом выживаемость также резко падает и к концу эксперимента сохраняется лишь 20% особей. Определенные флюктуации испытывает и плодовитость. У исходного поколения этот показатель во всех опытных средах ниже контрольного. Для следующего поколения условия также были неблагоприятными, поскольку в культуре преобладали самцы. У 2-го поколения дафний с концентрациями 2 мг/л и выше молодежь не развивалась. Потомство было получено только при содержании далапона в количестве 0.5 мг/л, при котором была отмечена стимуляция процесса размножения, но в следующем поколении снова наступило угнетение.

При тех же концентрациях далапона (за исключением 0.5 мг/л), но с добавкой 10 мг P/л высокая выживаемость сохраняется у организмов 3 поколений. У 4-го поколения не было отклонений показателя выживаемости в среде с 2 и 20 мг/л препарата. При концентрации 50 мг/л организмы прекратили свое существование на 3-м поколении, а при 5 мг/л через 2 нед сохранилось лишь 20% подопытных организмов. Нет четкой корреляции и по изменению плодовитости. В одних случаях это стимуляция, в других — угнетение процесса, вплоть до полного прекращения гаметогенеза.

Внесение в среду с далапоном 1 мг P/л показало, что и здесь картина влияния на организмы сложная. В данном случае более заметен концентрационный эффект действия гербицида. В растворе 50 мг/л уже в 1-й декаде эксперимента смертность дафний составила 80%. Организмы 1-го и 2-го дочерних поколений погибают во всех концентрациях, за исключением 20 мг/л, где выжило 30% дафний 2-го поколения. В 3-м дочернем поколении выживаемость организмов была высокой.

При самой небольшой добавке минерального фосфора (0.005 мг P/л) угнетение жизнедеятельности организмов по тесту „выживаемость” отмечено лишь в среде с 50 мг/л гербицида (исходное поколение). Организмы же 1-го поколения погибали при более низких концентрациях. При высоких (20–50 мг/л) содержаниях выживаемость первоначально была близка к норме, но 2-е и 3-е поколения не были получены.

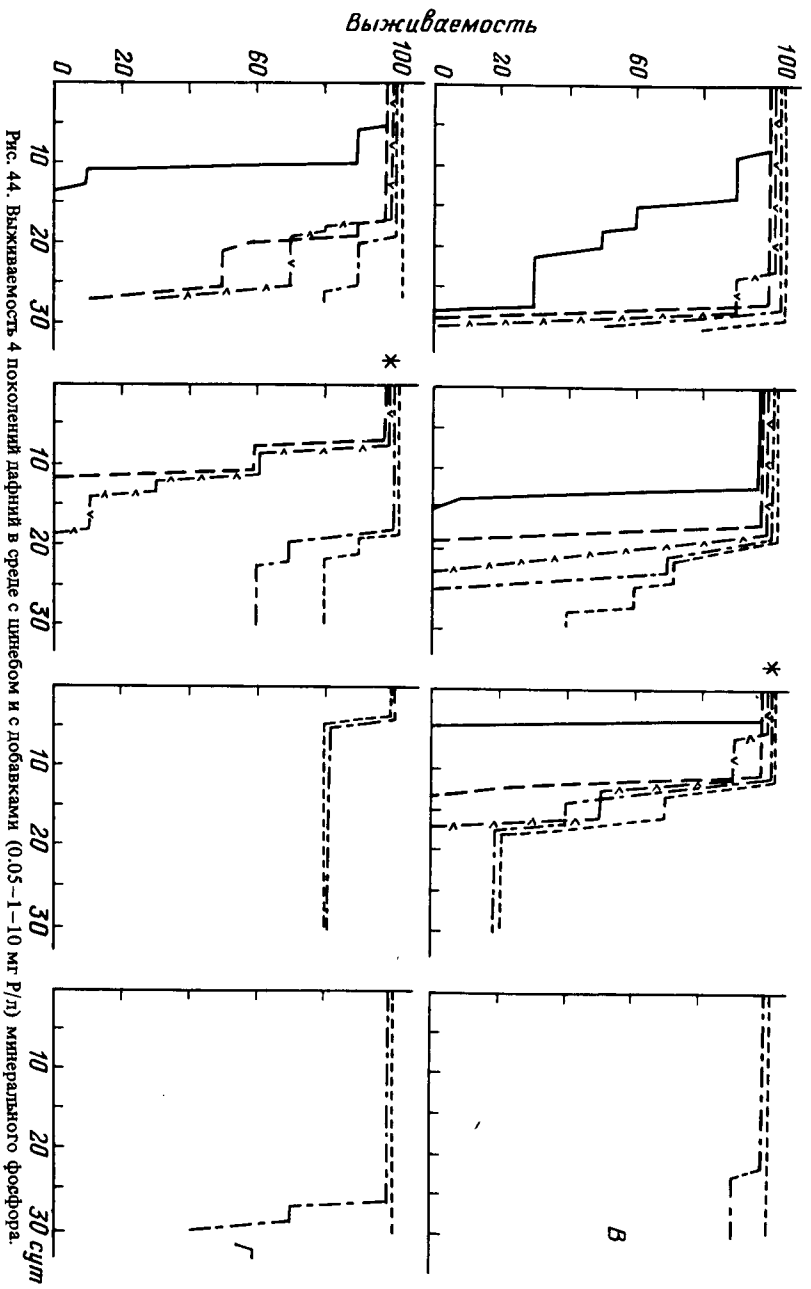
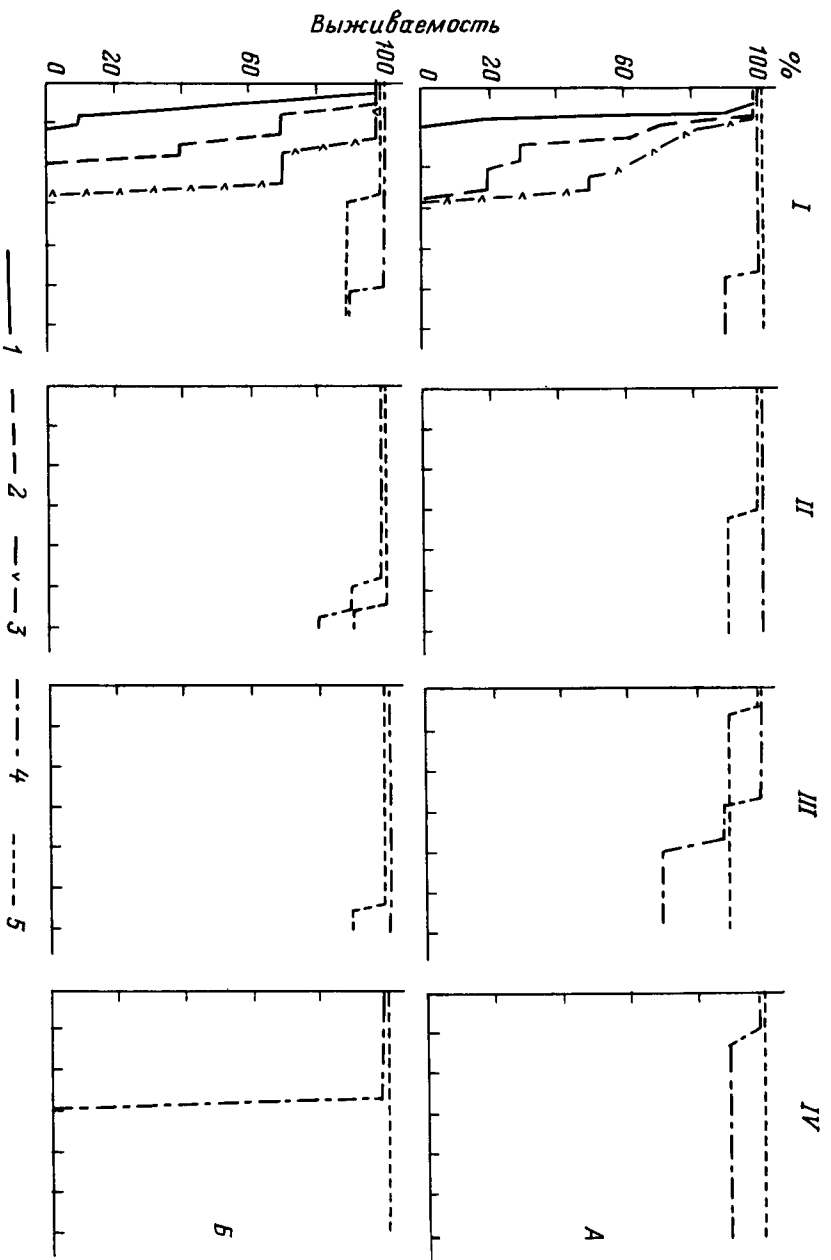


Рис. 44. Выживаемость 4 поколений дафний в среде с кадмием и с добавками (0,05–1–10 мг P/l) минерального фосфора. Контроль 90–100%. А – цинк (II); Б – II + 10, В – II + 1, Г – II + 0,05. Цинк (мг/л): 1 – 0,5, 2 – 0,1, 3 – 0,05, 4 – 0,02, 5 – 0,005. В контроле – 80%. Поколения: I – исходное, II – первое, III – второе, IV – третье.

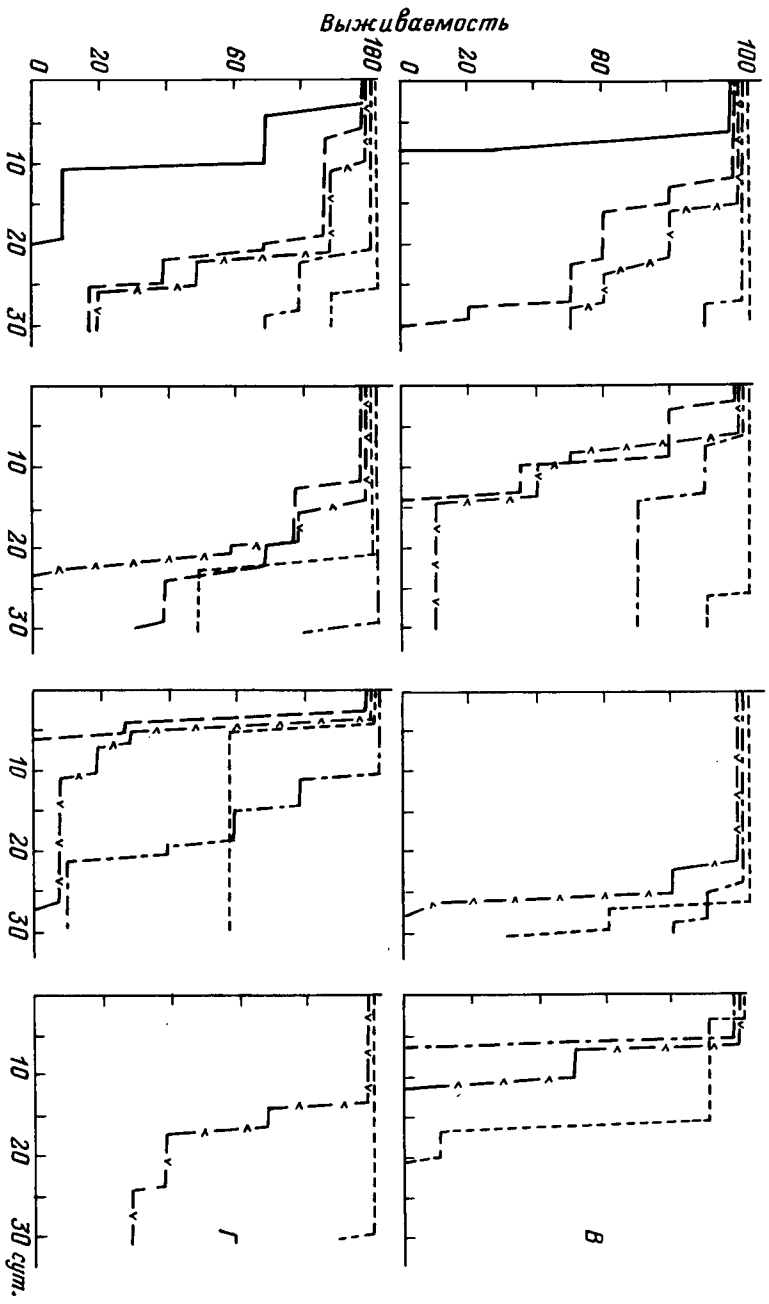
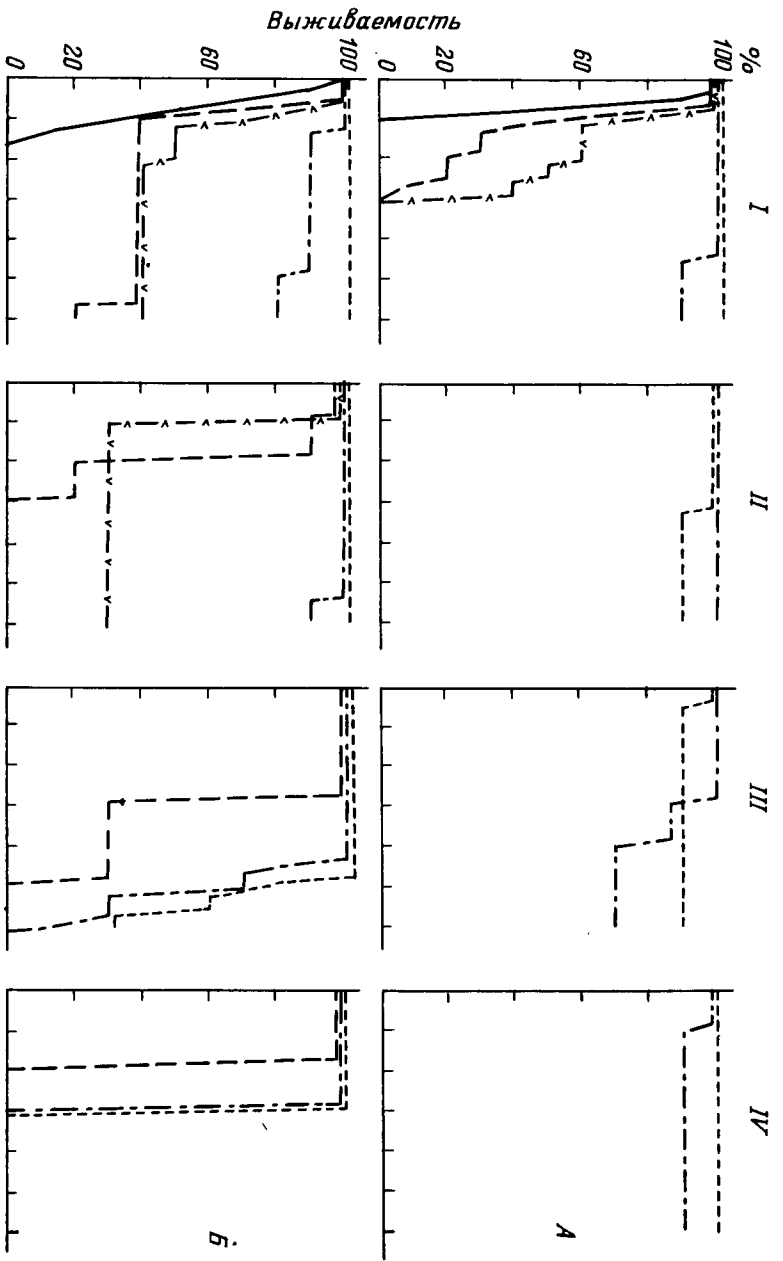


Рис. 45. Выживаемость 4 поколений дафний в среде с кадмием и добавками нитратного азота (0,5-1-10 мг/л).
 Контроль 90-100%. А - инбсб (II); Б - II + 10, В - II + 1, Г - II + 0,5. Остальные обозначения те же, что на рис. 44.

Эксперименты с добавками азота в растворы далапона также показали сложную картину взаимодействия. Все вносимые добавки нитратного азота оказали влияние на динамику смертности организмов.

Методом дисперсионного анализа получены усредненные данные, характеризующие степень влияния добавок азота и фосфора на токсичность гербицидов. Они свидетельствуют о том, что биогенные добавки оказывают значимое влияние на развитие токсического процесса при действии на организм ветвистоусых ракообразных пестицидов семерона, далапона и цинеба. Влияние это не однозначное и зависит от концентрации биогенных элементов, концентрации и химической структуры токсиканта, времени действия. Влияние оказывает и то, какой биогенный элемент формирует эвтрофикацию. То, что при различных сочетаниях биогенов и токсикантов характер действия и глубина поражения меняются, несомненно. Это необходимо учитывать при разработке их предельно допустимых концентраций и использовании их в отдельных регионах страны.

7.2. Влияние биогенных элементов на токсичность детергентов

Степень экологической опасности детергентов изучена недостаточно полно. Известно, что основной компонент синтетических моющих средств (СМС) триполифосфат, имея в своем составе фосфор, способствует увеличению эвтрофикации. Токсическое начало находится в сложных композициях поверхностно-активных веществ (ПАВ), которые, как правило, хорошо растворяются, но плохо разлагаются [32, 77, 80, 277]. Интересующий нас процесс рассматривался на примере детергента „Лотос”, относящегося к анионактивной группе СМС.

СМС „Лотос” в концентрациях 100–300 мг/л вызывает 100%-ную смертность организмов на 2–3-и сутки эксперимента. В средах с 0.1–1–10 мг/л детергента гибели организмов исходного и 1-го поколений не наблюдалось. При концентрации 10 мг/л отмечена резкая стимуляция плодовитости [185].

Дополнительное внесение минерального фосфора в концентрациях 0.005–1–10 мг Р/л в среду с детергентом „Лотос” оказало заметное влияние уже на исходное поколение дафний, что выразилось в значительной стимуляции плодовитости (2–2.5 раза) и увеличении разрыва между реальной и потенциальной плодовитостью. В 1-м дочернем поколении после 2-недельного выдерживания организмов в среде, с содержанием „Лотоса” 10 мг/л и фосфора 10 мг Р/л, наметилось отчетливое снижение количества выживших организмов (рис. 46).

Внесение добавок нитратного азота (концентрации 0.05–0.1–10 мг N/л) в среду с детергентом (10 мг/л) усилило его токсическое действие. Смертность организмов исходного поколения составила 20–60%, 1-го – увеличилась до 80, все организмы 2-го дочернего поколения погибли на 15-е сутки. Перед гибелью у организмов появляется „стеклянная” окраска тела.

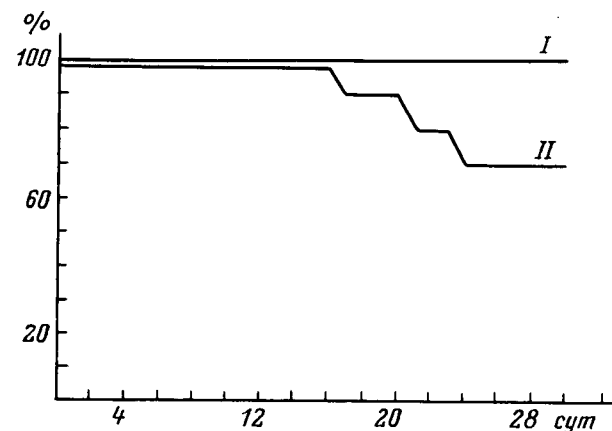


Рис. 46. Выживаемость 2 поколений дафний в среде с СМС „Лотос” (10 мг/л) с фосфорной добавкой (10 мг Р/л).

Поколения: I – исходное, II – первое.

Влияние добавок азота на плодовитость выразилось в ее первоначальной стимуляции (исходное поколение) с последующим значительным угнетением во 2-м дочернем поколении. Наши результаты по влиянию „Лотоса” на дафний не совпадают с литературными. По данным Э. П. Щербань [277], этот детергент более токсичен, чем в наших опытах, что и понятно, поскольку опытные среды нами готовились на воде из олиготрофного водоема. На основании полученных и литературных данных можно считать, что присутствие биогенных элементов – азота и фосфора – увеличивает токсичность „Лотоса”.

7.3. Влияние биогенных элементов на токсичность тяжелых металлов

В данном случае в качестве действующего начала использовали хлорид никеля (NiCl_2) в сочетании с минеральным фосфором и нитратным азотом.

Хронические эксперименты с никелем (0.001–0.005–0.02–0.1 мг Ni^{2+} /л) показали, что он вызывает высокую (от 40 до 100%) смертность дафний исходного и 1-го дочернего поколений. Третье поколение рачков получено только при концентрации 0.005 мг Ni^{2+} /л.

Влияние фосфорных добавок на токсичность никеля выразилось в снижении токсического действия металла на дафний 4 поколений. Степень влияния фосфора на токсичность никеля, рассчитанная методом двухфакторного дисперсионного анализа, изменялась от 23 до 78%.

Противоположное действие обнаружило присутствие в воде азота. Во всех концентрациях (опыты на 3 поколениях) токсичность никеля увеличилась. Наблюдения за физиологическим состоянием дафний позволили сделать вывод о патологических изменениях в пищеварительной системе под действием никеля.

Нарушение естественного режима водных объектов, обусловленное воздействием антропогенных факторов (загрязнение, эвтрофикация), вызывает большую озабоченность. Иногда сравнительно малые влияния внешних воздействий приводят к неожиданно сильным последствиям, которые начинают проявляться лишь через довольно продолжительное время. В этой связи необходимо достоверно оценить ситуацию, образовавшуюся при самых различных масштабах и вариантах влияния.

К сожалению, исторически сложилось так, что процессы эвтрофикации и токсикации решаются порознь, хотя в общем плане известно, что водоемы в зависимости от степени трофии обладают различной устойчивостью к токсикантам. Тем не менее вопросам взаимодействия этих 2 процессов уделяется мало внимания.

Результаты экспериментального моделирования этих процессов, выполненные в основном на пестицидах и в меньшей степени — на детергентах и тяжелых металлах, показали сложность и неоднозначность их взаимовлияния. Хронические эксперименты на 3–4-м поколениях *Daphnia magna* с последующей обработкой данных методом дисперсионного анализа показали, что биогенные добавки (минеральные формы фосфора и азота) оказывают влияние на развитие токсического процесса при действии на организм пестицидов (семерон, далапон, цинеб). При этом его характер зависит от концентрации биогенных элементов и токсикантов, их химической структуры и времени контакта.

Повышение количества фосфора в среде оказывает влияние и на токсичность детергента „Лотос”. Здесь, вероятно, в какой-то степени можно говорить о суммирующем эффекте. При сопряженном действии никеля и фосфора токсическое действие металла снижается, при сочетании с азотом, наоборот, увеличивается. Иными словами, биогенные элементы влияют на степень токсичности и характер действия различных соединений, что необходимо учитывать при разработке предельно допустимых концентраций.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Онежское озеро, как и другие большие озера, характеризуется хорошо выраженной лимнологической гетерогенностью, обусловленной его крупными размерами, неоднородным геологическим строением котловины, различным распределением проточности, неравномерностью прогрева водной толщи и разной степенью антропогенной нагрузки.

Современное состояние экосистемы озера сложилось в результате длительного взаимодействия естественных и антропогенных факторов. Важнейшими природными факторами, определившими ее характер, в первую очередь следует считать особенности термического режима озера. Оно относится к холодноводным водоемам. Его профундаль покрыта мощным слоем холодного гипolimниона. Термика озера — типичного димиктического водоема — наряду с известными повторяющимися сезонными гидрологическими явлениями обнаруживает и существенную изменчивость в мезо- и синоптическом масштабах. Важной гидрологической особенностью является существенная изменчивость полей течений и температуры воды, связанная с прибрежными апвеллингами, внутренними и береговыми захваченными волнами, амплитуда вертикальных колебаний которых достигает нескольких метров за период от нескольких часов до нескольких суток. Все эти гидрофизические явления, обнаруженные в Онежском озере, особенно детально исследовались в последние годы.

Выраженная холодноводность озера обуславливает характер многих внутриводоемных процессов, таких, например, как направленность ряда химических и биохимических реакций в толще воды и в донных отложениях, определяет низкую степень интенсивности продукционно-деструкционных процессов, особенности структур сообществ гидробионтов, их горизонтальное и вертикальное распределение и т. д.

Другим фактором, играющим важнейшую роль в формировании характера экосистемы озера, несомненно является специфика химического состава его вод. Поскольку бассейн сложен труднорастворимыми кристаллическими породами, минерализация воды притоков и самого озера отличается крайне низкими значениями — 33–36 мг/л, что в 1.5 раза ниже таковой воды Ладожского озера, в 3 раза — Байкала и в 5–7 раз меньше средней минерализации пресноводных озер умеренной зоны.

Вода озера относится к гидрокарбонатному классу кальциевой группы. Содержание кальция низкое, вода мягкая, общая жесткость равна 0,4 мг · экз./л. Это сильно сказывается на развитии малакофауны, очень чувствительной к недостатку кальция. Моллюски в Онежском озере малочисленны, мелкие, с тонкой и слабой раковинкой. Низкая минерализация воды обуславливает и слабое развитие реликтовых ракообразных, имеющих морское происхождение. Недостаток солености сужает температурную зону их обитания. Бедна вода биогенными и растворенными органическими веществами. Прозрачность по белому диску равна 5–7 м. Однако значительна ее насыщенность кислородом, относительное содержание которого равно 95–110%.

Все эти характеристики относятся в основном к открытой глубоководной зоне озера, занимающей большую часть его площади. К этому следует добавить, что химический состав воды этого района отличается сравнительным постоянством и небольшой амплитудой внутригодовых и межгодовых колебаний.

Дефицит лабильного органического вещества обуславливает малочисленность бактериоценозов, а низкие температуры — функциональную малоактивность.

Альгоценоз открытой части озера представлен в основном комплексом диатомовых и золотистых водорослей. Их биомасса невелика, а уровень фотосинтетической активности низок. Острый недостаток биогенных элементов (фосфора, азота, железа) ограничивает развитие фитопланктона. В приустьевых участках крупных рек, несущих в озеро воду, богатую гуминовыми веществами, часть фосфора озерных вод образует с гумусом комплексные соединения, недоступные растениям. Кроме того, фосфор вступает с железом в нерастворимое соединение, что не только снижает его количество, необходимое водорослям, но и переводит дефицитное для водорослей (главным образом диатомовых) железо в неактивную форму.

Развитию диатомовых в определенной степени способствует холодноводность озера. Кроме того, низкие температуры воды в определенной степени повышают физиологическую активность железа, к недостатку которого они особенно чувствительны. К этому добавим, что характерная для открытой части озера повышенная динамика водных масс способствует доставке водорослям биогенных элементов из более обогащенных ими районов. Но в зонах с усиленной антропогенной нагрузкой увеличивается роль синезеленых, хлорококковых и пиррофитовых водорослей.

Степень развития бактерий и водорослей в свою очередь сказывается на развитии последующих звеньев трофической цепи — простейших, макрозоопланктона и других консументов, которые соответственно также слабо развиты.

Весьма специфичны условия существования бентофауны профундали — большие глубины, постоянное отсутствие освещенности, круглогодичные низкие температуры, донные отложения с рудной коркой. К существованию в таких экстремальных условиях смогло

приспособиться лишь небольшое количество видов, численность и биомасса которых крайне мала.

Все лимнологические показатели свидетельствуют о явной олиготрофии этой большей части озера. Однако в районах, подверженных сильному антропогенному влиянию, химический состав воды, а следовательно, и особенности биоты, существенно изменяются.

Антропогенными стоками в губу вносится огромное количество химических соединений, не характерных для природных вод озера. Значительная их часть содержит большое количество различных растворенных и взвешенных органических веществ нередко токсической природы и других соединений. Действием токсинов в районах, непосредственно прилегающих к выпускам сточных вод, создаются мертвые зоны, лишённые гидробионтов. Однако по мере удаления от выпусков и разбавления стоков чистой озерной водой токсичность снижается, но сохраняется обилие аллохтонного органического вещества. В силу низких температур воды и слабой микробиальной активности минерализация органических веществ происходит чрезвычайно медленно. Это ведет к его накоплению, особенно в период ледостава. На окисление органических веществ из воды извлекается значительное количество кислорода (иногда полностью), в результате чего возникают анаэробные очаги, что способствует накоплению железа и фосфора, а также образованию сульфидов и сероводорода. Все это создает весьма своеобразные условия, существовать в которых способны лишь 1–2 вида малощетинковых червей. Обилие органического вещества в донных отложениях, отсутствие конкуренции и хищников способствуют усилению размножению последних. В этих районах количество червей достигает значительных для Онежского озера величин — 8 тыс. экз./м². Такая ситуация характерна, например, для Кондопожской губы.

Притоки, особенно крупные, вносят в озеро более 60% всего органического и биогенного стока. Особенно существенно влияет в этом плане на Петрозаводскую губу сток р. Шуи. Шуйские воды отличаются высокой цветностью, обилием гуминовых веществ, низкой минерализацией, на водосборе они испытывают сильное антропогенное воздействие. Поэтому в воде губы увеличивается цветность, содержание органических и взвешенных веществ. Общая минерализация вод губы ниже, чем в центральной части, что обусловлено разбавляющим влиянием речных вод, особенно сказывающимся весной, когда шуйские воды заполняют почти всю котловину губы, а также во время образования в последней термического бара, препятствующего смешиванию прибрежных шуйских вод с водами остальной части губы. В термоактивной зоне увеличивается не только концентрация органических и других веществ, приносимых рекой, но и численность планктеров. Летом влияние р. Шуи на губу несколько ослабевает.

Значительна роль в экосистеме озера зоофитона прибрежных камней. Его численность и биомасса превышают средние для озера величины зообентоса на 2 порядка, а продукция в 50 раз выше

таковой глубоководного бентоса. Огромная протяженность скалисто-глыбовой и каменистой литоралей, занимающих почти половину протяженности всей литоральной зоны озера, а также колоссальная общая площадь обрастания делают вклад прибрежного зоофитона в общую продуктивность озера значительным.

Обрастания, которые располагаются вдоль всей литоральной зоны, подвергают минерализации большое количество органического вещества, поступающего в озеро со склоновым и другими стоками, задерживая его проникновение в озеро. Такую же барьерную функцию выполняют и большие скопления олигохет в Кондопожской губе.

В целом самоочистительная способность озера находится на предельно низком уровне. Система обрастания прибрежных камней малоэффективна для таких огромных объемов воды, кроме того, она серьезно нарушается припайным льдом и каждую весну вынуждена восстанавливаться. В других, более глубоководных районах минерализующая деятельность гидробионтов крайне низка, что обусловлено как небольшой плотностью, так и низкими температурами воды, снижающими степень их активности. Основным фактором, уменьшающим концентрацию загрязнителей в озере, является разбавление их чистыми озерными водами.

Экосистема Онежского озера, как и другие в высоких широтах, исключительно ранима. Ее регенерационная способность очень низка. Нарушенные биоценозы восстанавливаются крайне долго или вообще не восстанавливаются. Эту важную особенность необходимо учитывать при планировании допустимых антропогенных нагрузок на озеро.

Таким образом, большая акватория озера, особенно в ее открытой глубоководной части, представленной чистыми водами, все еще продолжает сохранять олиготрофный характер. По биологической продуктивности Онежское озеро в 2–4 раза ниже Ладожского и на порядок ниже Псковско-Чудского.

Процесс загрязнения и эвтрофирования затронул лишь районы, наиболее подверженные антропогенному влиянию. При этом важно отметить, что зоны, затронутые эвтрофированием, заметно расширяются и их границы смещаются в сторону основной открытой части озера. Аналогичным путем происходило эвтрофирование Ладожского и других крупных озер.

В последнее десятилетие появились симптомы, свидетельствующие о начальных этапах эвтрофирования и открытой части Онежского озера. Так, в районе Большого Онега, примыкающем к Кондопожской губе, отмечались эпизодические вспышки численности простейших и бактерий. Вспышки численности бактерий имели место и в районе Центрального Онега. За период 1964–1972 гг. средняя численность фитопланктона в этом же районе увеличилась вдвое, а биомасса – втрое. На фоне пока еще не изменившегося видового состава увеличилось число доминирующих форм за счет видов желто- и синезеленых водорослей [160], доминирующих сейчас в быстро эвтрофирующемся Ладожском озере. Приблизительно за этот же период увеличилась и электропроводность воды открытой части озера и несколько снизилась

ее прозрачность [68 и др.]. Пока все эти показатели не выходят за пределы, характерные для олиготрофных водоемов, но сам факт существования такой тенденции вызывает определенную тревогу.

В целях сохранения уникальных качеств воды Онежского озера и своеобразия его экосистемы необходимо неукоснительно выполнять все установленные водоохранные меры и в первую очередь довести очистку сточных вод, поступающих в озеро, до состояния нормативно, очищенных, а в ближайшей перспективе промузлы, расположенные в бассейне озера, должны перейти на малоотходную технологию или не замкнутый цикл водообеспечения, что существенно сократит поступление загрязнений в озеро.

Охрана чистоты вод Онежского озера – дело большой государственной важности. От нее зависит не только судьба уникального явления природы, но и сохранность огромных вековых запасов высококачественной озерной воды.

ЛИТЕРАТУРА

1. Акопян М. А., Демин Д. Л. Численное моделирование течений озера Севан // Метеорология и гидрология. 1982. № 8. С. 68–74.
2. Алекин О. А., Семенов А. Д., Скопинцев Б. А. Руководство по химическому анализу вод суши. Л., 1973. 269 с.
3. Александров Б. М. О нектонобентосных реликтовых ракообразных Онежского озера // Проблемы использования промысловых ресурсов Белого моря и внутренних водоемов Карелии. М.; Л., 1963. Вып. 1. С. 232–242.
4. Александров Б. М. Об изучении состава донной фауны Онежского озера // Предварительные результаты работ комплексной экспедиции по исследованию Онежского озера. Петрозаводск, 1968. Вып. 3. С. 37–39.
5. Александрова Д. Н. Бактериопланктон и микрофлора донных отложений Онежского озера // Микробиология и первичная продукция Онежского озера. Л., 1973. С. 5–84.
6. Александрова Д. Н. Численность и биомасса бактерий в воде и донных отложениях литоральной зоны Онежского озера // Литоральная зона Онежского озера. Л., 1975. С. 183–189.
7. Александрова Д. Н., Слепухина Т. Д., Сенатская А. В. и др. Современное состояние и интенсивность самоочищения верховьев р. Сухоны // Гидробиол. журн. 1977. Т. 13, № 2. С. 86–91.
8. Алимов А. Ф. Функциональная экология пресноводных двустворчатых моллюсков. Л., 1981. 250 с.
9. Алимов А. Ф., Бульон В. В., Гутельмахер Б. Л., Иванова М. Б. Методы изучения участия гидробионтов в процессах самоочищения водоемов // Роль гидробионтов в очистке сточных вод. Фрунзе, 1977. С. 3–42.
10. Алимов А. Ф., Винберг Г. Г., Салазкин А. А., Финогенова Н. П. Методические рекомендации по сбору и обработке материалов при гидробиологических исследованиях на пресноводных водоемах // Зообентос и его продукция. Л., 1984. 52 с.
11. Андроникова И. Н. Изменения в сообществе зоопланктона в связи с процессом эвтрофирования // Эвтрофирование мезотрофного озера. Л., 1980. С. 78–99.
12. Антропогенное эвтрофирование Ладожского озера. Л., 1982. 304 с.
13. Аринушкина Е. В. Руководство по химическому анализу почв. М., 1961. 491 с.
14. Астраханцев Г. П., Егорова Н. Б., Руховец Л. А. Численное моделирование круглогодичной циркуляции глубоких озер // Докл. АН СССР. 1987. Т. 296, № 6. С. 1331–1334.
15. Балущкина Е. В. Функциональное значение личинок хирономид в континентальных водоемах. Л., 1987. 180 с.
16. Бархатова И. В., Бояринов П. М., Ефремова Т. В. Временная изменчивость ветра над Онежским озером // Лимнология Кондопожской губы Онежского озера. Петрозаводск, 1986. С. 4–16.
17. Белова С. Л. К методике определения объемов простейших. Гидробиол. журн. 1982. Т. 18, № 1. С. 110–112.
18. Бискэ Г. С. Четвертичные отложения и геоморфология. Петрозаводск, 1959. 307 с.
19. Бискэ Г. С. Когда и как образовалось Онего // Онежское озеро. Петрозаводск, 1975. С. 19–39.
20. Бискэ Г. С., Григорьев С. В., Малинина Т. И., Смирнов А. Ф., Эпштейн Е. М. Онежское озеро. Петрозаводск, 1975. 164 с.
21. Бискэ Г. С., Лак Г. Ц., Лукашов А. Д., Горюнова Н. Н., Ильин В. А. Строение и история котловины Онежского озера. Петрозаводск, 1971. 73 с.
22. Бокс Дж., Дженкинс Г. Анализ временных рядов: Прогноз и управление. М., 1974. 406 с.
23. Бояринов П. М. Ветровой апвеллинг в крупном озере // Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана. 1984. Т. 20, № 12. С. 1189–1198.
24. Бояринов П. М. Исследование апвеллингов и даунвеллингов Онежского озера // Гидрология Байкала и других водоемов. Новосибирск, 1984. С. 53–59.
25. Бояринов П. М. Фронт термического бара // Петрозаводское Онего и его лимнологические особенности. Петрозаводск, 1984. С. 13–23.
26. Бояринов П. М. Структура и физические особенности фронтов в крупном озере // Круговорот веществ и энергии в водоемах: Тез. докл. 6-го Всесоюз. лимнол. совещ. Иркутск, 1985. Вып. 6. С. 57–59.
27. Бояринов П. М., Лифшиц В. Х. Изменчивость течений и волны Кельвина в Онежском озере // Гидрология Байкала и других водоемов. Новосибирск, 1984. С. 45–50.
28. Бояринов П. М., Лифшиц В. Х., Петров М. П., Титов В. С. Натурные исследования и моделирование горизонтального и вертикального переноса в крупном озере // Взаимодействие между водой и седиментами в озерах и водохранилищах. Л., 1984. С. 173–190.
29. Бояринов П. М., Петров М. П. Длинные волны в крупном озере // Круговорот веществ и энергии в водоемах: Тез. докл. 6-го Всесоюз. совещ. лимнологов. Иркутск, 1985. Вып. 6. С. 59–61.
30. Бояринов П. М., Швец П. Д. Мезомасштабные вертикальные движения в Онежском и Ладожском озерах // Проблемы исследования крупных озер СССР. Л., 1985. С. 130–133.
31. Брагинский Л. И. Пестициды и жизнь водоемов. Киев, 1972. 227 с.
32. Брагинский Л. И., Буртная И. Л., Щербань Э. П. Токсичность синтетических моющих средств для массовых форм пресноводных беспозвоночных // Экспериментальные исследования влияния загрязнителей на водные организмы. Апатиты, 1979. С. 24–30.
33. Бульон В. В. Первичная продукция планктона в оз. Байкал // Журн. общ. биол. 1976. Т. 37. С. 517–524.
34. Бычкова И. А., Викторов С. В., Виноградов В. В. Дистанционное определение температуры моря. Л., 1988. 223 с.
35. Васильева Е. П. Химический состав донных отложений Большой губы Повенецкого залива Онежского озера // Охрана и использование водных ресурсов Карелии. Петрозаводск, 1974. С. 124–138.
36. Васильева Е. П. Динамика органического вещества и биогенных элементов в осадках залива Большое Онего Онежского озера // Органическое вещество и биогенные элементы в водах Карелии. Петрозаводск, 1985. С. 52–61.
37. Васильева Е. П., Поллиева Т. В. Характеристики органического вещества донных отложений Кондопожской губы Онежского озера // Элементы экосистемы Онежского озера и его бассейна (оперативно-информационные материалы). Петрозаводск, 1984. С. 21–23.
38. Васильева Е. П., Фрейдлинг В. А. Формирование химического состава донных отложений больших заливов Онежского озера // Проблемы исследования крупных озер СССР. Л., 1985. С. 139–142.
39. Винберг Г. Г. Итоги исследований пресноводных сообществ всех трофических уровней // Ресурсы биосферы. Л., 1971. Вып. 2. С. 145–157.

40. Винберг Г. Г. Некоторые итоги практики применения продукционно-гидробиологических методов // Продукция популяций и сообществ водных организмов и методы ее изучения. Свердловск, 1985. С. 3–18.
41. Виноградов А. П. Закономерности распределения химических элементов в земной коре // Геохимия. 1956. Т. 1. С. 6–52.
42. Вислянская И. Г. Фитопланктон залива Большое Онего // Лимнологические исследования на заливе Онежского озера Большое Онего. Л., 1982. С. 70–81.
43. Водные ресурсы Карелии и их использование. Петрозаводск, 1979. 141 с.
44. Воронков П. П. Формирование химического состава поверхностных вод степной и лесостепной зон европейской территории СССР. Л., 1955. 250 с.
45. Воронова З. И., Гапочка Л. Д., Носов В. Н. Влияние фосфора и азота на устойчивость водоросли *Sincohastis aquatilis* к токсическому действию некоторых загрязнителей // Вестн. МГУ. Сер. 16. Биология. 1983. № 3. С. 50–55.
46. Вотинцев К. К., Мещерякова А. Н., Поповская Г. И. О значении ультрамикробиологических водорослей в создании первичной продукции Байкала в летний период // Гидробиол. журн. 1972. Т. 8, № 3. С. 21–27.
47. Выхристюк Л. А. Органическое вещество донных осадков Байкала. Новосибирск, 1980. 79 с.
48. Гаевская Н. С. Простейшие (Protozoa) // Жизнь пресных вод СССР. М.; Л., 1949. Т. 2. С. 229–310.
49. Гак Д. З. Бактериопланктон и его роль в биологической продуктивности водохранилищ. М., 1975. 250 с.
50. Герд С. В. Обзор гидробиологических исследований озер Карелии // Тр. Карело-Фин. отд-ния ВНИОРХ. 1946. Вып. 11. С. 28–140.
51. Герд С. В. Планктонические комплексы больших озер Карелии и вопрос о летних миграциях ряпушки // Учен. зап. Карело-Фин. гос. ун-та. 1947. Т. 1. С. 305–345.
52. Герд С. В. Биоценозы бентоса больших озер Карелии. Петрозаводск, 1949. 149 с.
53. Гидробиология Петрозаводской губы Онежского озера. Петрозаводск, 1980. С. 174.
54. Гидрохимия и гидрооптика Ладожского озера. Л., 1967.
55. Гидрохимия Онежского озера и его притоков. Л., 1973. 243 с.
56. Гильзен К. К. О слоистости донных осадков в грунтах глубоких озер (Ладожского и Онежского) // Изв. АН СССР. Сер. 6. 1918. № 18. С. 1–187.
57. Гецен М. В. Фитопланктон тундровых озер Харьейской системы // Продуктивность озер восточной части Большеземельской тундры. Л., 1976. С. 33–55.
58. Гордеев О. Н. Распространение реликтовых ракообразных в озерах Карелии // Учен. зап. Карел. пед. ин-та. 1958. Вып. 8. С. 16–33.
59. Гордеев О. Н. Высшие ракообразные озер Карелии // Фауна озер Карелии: Беспозвоночные. М.; Л., 1965. С. 153–171.
60. Григорьев С. В., Грицевская Г. Л. Каталог озер Карелии. М.; Л., 1959. 239 с.
61. Гуляева А. М., Покровский В. В. Современный состав иктюфауны и промысловые уловы рыбы в Онежском озере // Сб. науч. тр. ГосНИОРХ, Л., 1984. Вып. 216. С. 4–10.
62. Давыдов В. К. О гидрологическом режиме Петрозаводской губы Онежского озера // Изв. ГГИ. 1927. № 19. С. 35–48.
63. Давыдова Н. Н., Петрова Н. А., Распопов И. М. История исследований водных растений Онежского озера // Растительный мир Онежского озера. Л., 1971. С. 16–18.
- 63а. Демин Ю. А., Ибраев Р. А. Численный метод расчета течений и уровня в многосвязных областях океана. М., 1988. 26 с. (Препринт).
64. Дзюбан Н. А., Кузнецова С. П. Зоопланктон как показатель загрязнения водохранилищ // Гидробиол. журн. 1978. Т. 14, № 6. С. 42–46.
65. Динамика водных масс Онежского озера. Л., 1972. 205 с.
66. Дриженко Ф. К. Обзор гидрографических и картографических работ морского министерства на Онежском озере с 1892 по 1896 г. // Изв. РГО. 1898. Т. 33, вып. 6. С. 1–150.
67. Дроздов О. А. Формирование увлажненности суши при колебаниях климата // Метеорология и гидрология. 1981. № 4. С. 17–23.
68. Дружинин Г. В., Короткевич О. Е., Николаев И. И., Румянцев В. Б. О структуре вод Петрозаводской губы // Петрозаводская губа Онежского озера. Петрозаводск, 1981. С. 52–57.
69. Дружинина Г. В., Короткевич О. Е., Румянцев В. Б., Николаев И. И. Признаки деградации экосистемы Онежского озера и пути ее предотвращения // Антропогенное эвтрофирование природных вод. Черноголовка, 1983. С. 173–175.
70. Зоопланктон Онежского озера. Л., 1972. 326 с.
71. Иевлева И. В. Температура среды и скорость энергетического обмена у водных животных. Киев, 1981, 231 с.
72. Изотова А. Ф. Некоторые особенности климата Онежского озера // Тепловой режим Онежского озера. Л., 1973. С. 25–52.
73. Исследования экосистемы Онежского озера. Петрозаводск, 1981. 74 с.
74. Крон В. И. Температурно-стратифицированное течение в проточном водоеме // Метеорология и гидрология. 1979. № 6. С. 74–79.
75. Кириллова В. А. Морфометрическая характеристика литоральной зоны Онежского озера // Литоральная зона Онежского озера. Л., 1975. С. 15–29.
76. Ключина Е. А. Видовой состав, биомасса и химический состав высшей водной растительности губ Повенецкого залива Онежского озера // Охрана и использование водных ресурсов Карелии. Петрозаводск, 1974. С. 151–168.
77. Ковальчук Л. Я. Токсическое действие некоторых моющих средств на *Daphnia magna* // Самоочищение, биопродуктивность и охрана водоемов и водотоков Украины. Киев, 1975. Р. 108–109.
78. Кононова М. М., Бельчикова Н. П. Ускоренные методы определения состава гумуса минеральных почв // Почвоведение. 1961. № 10. С. 55–87.
79. Копылов А. И. О химическом составе и калорийности инфузорий // Океанология. 1979. Т. 19, № 5. С. 885–889.
80. Коскова Л. А., Козловская В. И. Токсичность синтетических поверхностно-активных веществ и моющих средств для водных животных // Гидробиол. журн. 1979. Т. 15, № 1. С. 77–84.
81. Кравцов А. А., Гальшин Н. М. Препараты для защиты растений. (Справочник). М., 1984. 175 с.
82. Крючкова Н. М. Структура сообщества зоопланктона в водоемах разного типа // Продукционно-гидробиологические исследования водных экосистем. Л., 1987. С. 184–198.
83. Кукконен Н. А. Содержание соединений азота в воде Онежского озера в зимний период // Комплексное изучение водных ресурсов Карелии. Петрозаводск, 1982. С. 27–29.
84. Куликова Т. П. Зоопланктон залива Большое Онего и его продукция // Лимнологические исследования на заливе Онежского озера Большое Онего. Л., 1982. С. 130–155.
85. Куликова Т. П. Современное состояние зоопланктона Кондопожской губы // Лимнология Кондопожской губы Онежского озера. Петрозаводск, 1986. С. 124–137.
86. Куликова Т. П., Щурова Л. Э. Метазойный зоопланктон Петрозаводской губы в 1976 г. // Гидробиология Петрозаводской губы Онежского озера. Петрозаводск, 1980. С. 74–96.
87. Курочкина А. А. Литология и хемостратиграфия донных отложений Онежского озера // Палеолимнология Онежского озера. Л., 1976. С. 74–130.

88. Лазарева В. И., Кауфман З. С., Полякова Т. Н. Фауна олигохет внешней части Петрозаводской губы Онежского озера // Водные малоцетинковые черви. Тбилиси, 1983. С. 42–46.
89. Ланд Дж. В. Г. Эвтрофикация // Научные основы контроля качества поверхностных вод по гидробиологическим показателям. Л., 1977. С. 33–43.
90. Лейте В. Определение органических загрязнений питьевых, природных и сточных вод. М., 1975. 181 с.
91. Лесников Л. А. Методика оценки влияния воды из природных водоемов на *Daphnia magna* // Методики биологических исследований по водной токсикологии. М., 1971. С. 157–167.
92. Летанская Г. Н. Фитопланктон и первичная продукция озер Кольского полуострова // Озера различных ландшафтов Кольского полуострова. Л., 1974. Ч. II. С. 78–119.
93. Лимнологические исследования на заливе Онежского озера Большое Онего. Л., 1982. 212 с.
94. Лимнология Кондопожской губы Онежского озера. Петрозаводск, 1986. 172 с.
95. Лимнология Онежского озера и его бассейна. Петрозаводск, 1985. 53 с.
96. Литоральная зона Онежского озера. Л., 1975. 244 с.
97. Лифшиц В. Х. Краткая физико-географическая характеристика и некоторые элементы гидрологического режима Петрозаводской губы // Гидробиология Петрозаводской губы Онежского озера. Петрозаводск, 1980. С. 5–10.
98. Лифшиц В. Х., Петров М. П. Характеристики изменчивости течений и температуры воды в Онежском озере по материалам круглогодичного цикла наблюдений с применением автономных приборов системы „Андера” // Проблемы использования крупных озер СССР. Л., 1985. С. 134–136.
99. Лифшиц В. Х., Титов В. С. Некоторые результаты применения ЭВМ в гидрологических исследованиях // Применение математических методов в научных исследованиях. Петрозаводск, 1974. С. 16–19.
100. Лифшиц В. Х., Титов В. С. Некоторые результаты натурных исследований и математического моделирования динамических процессов в водоемах Карелии // Тр. IV Всесоюз. гидрол. съезда. Л., 1975. Т. 5. С. 223–230.
101. Лифшиц В. Х., Титов В. С. Моделирование течений Онежского озера // Изучение и использование водных ресурсов: Оперативно-информационные материалы. Петрозаводск, 1979. С. 9–10.
102. Лифшиц В. Х., Титов В. С., Бояринов П. М. Натурные исследования и расчет течений Онежского озера // Водные ресурсы Карелии и их использование. Петрозаводск, 1979. С. 4–46.
103. Лифшиц В. Х., Бояринов П. М., Титов В. С. Течения Петрозаводской губы и водообмен с Онежским озером // Петрозаводское Онего и его лимнические особенности. Петрозаводск, 1985. С. 23–35.
104. Лифшиц В. Х., Титов В. С., Бояринов П. М. Натурные исследования, спектральный анализ и математическое моделирование течений Петрозаводской губы // Петрозаводская губа Онежского озера. Петрозаводск, 1981. С. 5–23.
105. Лифшиц В. Х., Титов В. С., Бояринов П. М. Экспериментальные исследования и расчет течений Онежского озера // Проблемы исследования крупных озер СССР. Л., 1985. С. 125–130.
106. Лифшиц В. Х., Титов В. С., Бояринов П. М. и др. Физико-географическая характеристика и основные элементы гидрологического режима в заливе Б. Онего // Лимнологические исследования на заливе Онежского озера Большое Онего. Л., 1982. С. 3–34.
107. Лифшиц В. Х., Титов В. С., Филатов Г. Ф. Результаты обработки натурных данных и расчета течений Кондопожского залива Онежского озера с применением ЭВМ // Биологические ресурсы Белого моря и внутренних водоемов европейского Севера: Тез. докл. Петрозаводск, 1974. С. 22–24.
108. Лифшиц В. Х., Титов В. С., Филатов Г. Ф., Бархатова И. В. Течения Кондопожского залива Онежского озера и некоторые результаты их расчета на ЭВМ // Круговорот вещества и энергии в водоемах: Математическое моделирование экосистем водоемов. Лиственичье на Байкале, 1977. С. 61–64.
109. Лурье Ю. Ю., Рыбникова А. И. Химический анализ производственных сточных вод. М., 1974. 335 с.
110. Луховицкий О. Л., Титов В. С., Филатов Н. Н. Изменчивость циркуляции вод Ладожского озера // Изменчивость гидрофизических полей в озерах. Л., 1978. С. 147–161.
111. Маслова Н. П. Гидрохимия вод Петрозаводской губы Онежского озера как источника питьевого водоснабжения // Вопросы гидрологии, озераведения и водного хозяйства Карелии. Петрозаводск, 1965. С. 25–50.
112. Маслова Н. П. Характеристика сточных вод Кондопожского целлюлозно-бумажного комбината и их влияния на химический состав воды Кондопожского залива Онежского озера // Вопросы гидрологии, озераведения и водного хозяйства Карелии. Петрозаводск, 1969. С. 112–147.
113. Мажейкайте С. И. Протозойный планктон Онежского озера: Автореф. ... дис. канд. биол. наук. Л., 1970. 31 с.
114. Мажейкайте С. И. Планктонные простейшие // Зоопланктон Онежского озера. Л., 1972. С. 40–125.
115. Мажейкайте С. И. Микрозоопланктон литоральной зоны Онежского озера // Литоральная зона Онежского озера. Л., 1975. С. 160–168.
116. Мажейкайте С. И. Класс ресничные инфузории Ciliata // Определитель основных пресноводных беспозвоночных европейской части СССР. Л., 1977. С. 46–97.
117. Малинина Т. И. Водный баланс Ладожского озера // Гидрологический режим и водный баланс Ладожского озера. Л., 1966. С. 182–203.
118. Малинина Т. И., Солнцева Н. О. Сейши Онежского озера // Динамика водных масс Онежского озера. Л., 1972. С. 40–73.
119. Мамаева Н. В. Инфузории бассейна Волги. Л., 1979. 149 с.
120. Мартынова М. В. Азот и фосфор в донных отложениях озер и водохранилищ. М., 1984. 160 с.
121. Мартынова Н. Н., Пирожкова Г. П. Некоторые данные о содержании и динамике органических веществ в Петрозаводской губе // Петрозаводская губа Онежского озера. Петрозаводск, 1981. С. 123–137.
122. Матвеева Л. Я. О некоторых характеристиках ветрового режима Онежского озера. 1964–1967 // Динамика водных масс Онежского озера. Л., 1972. С. 5–20.
123. Материалы Междуведомственного совещания по проблеме изучения и обоснования методов расчета испарения с водной поверхности и суши, 3–7 августа 1965. Валдай, 1966. 300 с.
124. Марченко А. И. Почвы Карелии. М.; Л., 1962. 310 с.
125. Методика расчета установившихся течений в мелководных морях. М., 1970. 64 с.
126. Микробиология и первичная продукция Онежского озера. Л., 1973. 167 с.
127. Михеева Т. М. Оценка продукционных возможностей единицы биомассы фитопланктона // Биологическая продуктивность эвтрофного озера. М., 1970. С. 50–70.
128. Молчанов И. В., Былинкина В. Н., Викулина З. А., Горшунова Т. А. Онежское озеро. Л., 1946. 207 с.
129. Мордухай-Болтовский Ф. Д., Ривьер И. К. Беспозвоночные как показатели эвтрофирования водоемов // Научные основы контроля качества поверхностных вод по гидробиологическим показателям. Л., 1977. С. 28–33.
130. Музылев С. В., Привальский В. Е., Раткевич Д. Я. Стохастические модели в инженерной гидрологии. М., 1982. 184 с.

131. На ст а в л е н и е гидрометеорологическим станциям и постам. Л., 1958. Вып. 3, ч. 1.
132. Николаев И. И. История исследования зоопланктона Онежского озера // Зоопланктон Онежского озера. Л., 1972. С. 5–23.
133. Николаев И. И. Происходящие и ожидаемые изменения в экологии озера Северо-Запада СССР // Вод. ресурсы. 1977. № 6. С. 98–105.
134. Николаев И. И. Современное состояние Петрозаводской губы Онежского озера как экологической системы // Гидробиология Петрозаводской губы Онежского озера. Петрозаводск, 1980. С. 169–174.
135. Николаев И. И., Пирожкова Г. П., Васильева Е. П. и др. Онежское озеро как гетерогенная система // Изучение и освоение водоемов Прибалтики и Белоруссии: Тез. докл. XX науч. конференции. Рига, 1979. Т. 1. С. 15–19.
136. Никулина В. Н. Фитопланктон озер Зеленецкого и Акулькина // Биологическая продуктивность северных озер. Л., 1975. Ч. II. С. 37–52.
137. Никулина В. Н. Фитопланктон озер Кривого и Круглого // Биологическая продуктивность северных озер. Л., 1975. Ч. I. С. 42–54.
138. Никулина В. Н. Фитопланктон р. Тюн и Тюнского залива // Гидробиологические исследования на реке Тюн и Тюнском заливе озера Иссык-Куль. Л., 1977. С. 31–41.
139. Никулина В. Н. Влияние добавок биогенных элементов и разнотипных вод на фитопланктон Онежского озера // Лимнологические исследования на заливе Большое Онего. Л., 1982. С. 97–109.
140. Озера Карелии: (Справочник). Петрозаводск, 1959. С. 86–94.
141. Онежское озеро как объект хозяйственного использования. Л., 1970. 242 с.
142. Оперативно-информационные материалы. Петрозаводск, 1979. 66 с.
143. Оперативно-информационные материалы. Петрозаводск, 1980. 51 с.
144. Основные гидрологические характеристики. Т. 2: Карелия и Северо-Запад. Л., 1978. 669 с.
145. О содержании таннидов в воде Онежского озера: Оперативно-информационные материалы // Исследования озерно-речных систем Карелии. Петрозаводск, 1982. С. 6–8.
146. Охлопкова А. Н. Течения Онежского озера // Динамика водных масс Онежского озера. Л., 1972. С. 74–113.
147. Охрана и использование водных ресурсов Карелии. Петрозаводск, 1974. 343 с.
148. Павлов В. К. Расчет стоковых течений Невской губы // Тр. Арктич. и антарктич. н.-и. ин-та. 1979. Т. 361. С. 93–99.
149. Павлов В. К., Прошутинский А. Ю. Сравнительный анализ применимости двух гидродинамических моделей к расчету течений в мелководных районах // Экспресс-информация ВНИИГМИ МИД. 1977. Вып. 3(43). С. 14–21.
150. Петров М. П. Наблюдения за прохождением фронта термобара в заливе Большое Онего // Исследования экосистемы Онежского озера: Оперативно-информ. матер. Петрозаводск, 1981. С. 25–26.
151. Петров М. П. Проникающая конвекция в период подледного прогрева в Онежском озере // Гидрология Байкала и других водоемов. Новосибирск, 1984. С. 88–92.
152. Петров М. П. Тонкая термическая структура верхнего слоя крупного озера // Тез. докл. 6-го Всесоюз. лимнол. совещания. Иркутск, 1985. Вып. 6.
153. Петров М. П., Пальшин Н. И. Весеннее вертикальное перемешивание подо льдом в Онежском озере // Лимнология Онежского озера и его бассейна: Оперативно-информ. матер. Петрозаводск, 1985. С. 46–48.
154. Петров М. П., Сутырин Г. Г. О вовлечении проникающей конвекции, обусловленной солнечным прогревом в озере подо льдом // Тез. докл. II Всесоюз. симпозиума „Тонкая структура и синоптическая изменчивость морей и океанов”. Таллинн, 1984. Ч. II. С. 112–114.
155. Петров М. П., Сутырин Г. Г. Суточный ход конвекции в озере подо льдом // Метеорология и гидрология. 1985. № 1. С. 91–98.
156. Петрова Н. А. Фитопланктон Онежского озера // Растительный мир Онежского озера. Л., 1971. С. 88–127.
157. Петрова Н. А. Биомасса фитопланктона Онежского озера по данным 1964–1965 гг. // Микробиология и первичная продукция Онежского озера. Л., 1973. С. 84–91.
158. Петрова Н. А. Соотношение между продукцией и биомассой фитопланктона Онежского озера // Микробиология и первичная продукция Онежского озера. Л., 1973. С. 92–106.
159. Петрова Н. А. Фитопланктон литоральной зоны Онежского озера // Литоральная зона Онежского озера. Л., 1975. С. 138–144.
160. Петрова Н. А., Антонов С. Е. Анализ изменений в фитопланктоне Онежского озера за период с 1964 по 1979 гг. // Биологические ресурсы Белого моря и внутренних водоемов европейского Севера. Петрозаводск, 1981. С. 42–43.
161. Петрова Н. А., Расплетина Г. Ф., Гусаков Б. Л. Изучение потребности фитопланктона озер различного типа в биогенных элементах методом планируемых добавок // Ботан. журн. 1977. Т. 62, № 7. С. 984–989.
162. Петрозаводская губа Онежского озера. Петрозаводск, 1981. 168 с.
163. Петрозаводское Онего и его лимнические особенности. Петрозаводск, 1984. 191 с.
164. Пирожкова Г. П. Гидрохимический режим Петрозаводской губы // Петрозаводская губа Онежского озера. Петрозаводск, 1981. С. 92–123.
165. Пирожкова Г. П. Характеристика органических веществ Повенецкого залива // Исследования экосистемы Онежского озера. Петрозаводск, 1981. С. 33–35.
166. Пирожкова Г. П. Гидрохимическая характеристика залива Большое Онего // Лимнологические исследования на заливе Онежского озера Большое Онего. Л., 1982. С. 35–48.
167. Пирожкова Г. П. Гидрохимическая характеристика Петрозаводского Онего // Петрозаводское Онего и его лимнологические особенности. Петрозаводск, 1984. С. 35–52.
168. Пирожкова Г. П. Гидрохимия притоков юго-западного побережья Онежского озера // Петрозаводское Онего и его лимнологические особенности. Петрозаводск, 1984. С. 52–67.
169. Пирожкова Г. П. Источники формирования химического состава воды Кондопожской губы Онежского озера // Лимнология Кондопожской губы Онежского озера. Петрозаводск, 1985. С. 47–63.
170. Пирожкова Г. П. Количественная и качественная характеристика органических веществ речного стока Повенецкого залива Онежского озера // Лимнология Онежского озера и его бассейна. Петрозаводск, 1985. С. 48–51.
171. Пирожкова Г. П. Сравнительная оценка состава и качества воды крупных заливов Онежского озера // Проблемы исследования крупных озер СССР. Л., 1985. С. 136–139.
172. Пирожкова Г. П., Коваленко В. Н., Морозов А. К. Влияние термического бара на качество воды южной части Онежского озера // Элементы экосистемы Онежского озера и его бассейна. Петрозаводск, 1984. С. 15–16.
173. Пирожкова Г. П., Кукконен Н. А. Краткая сравнительная характеристика рек южного и юго-восточного побережий Онежского озера // Элементы экосистемы Онежского озера и его бассейна. Петрозаводск, 1984. С. 17–19.
174. Пирожкова Г. П., Мартынова Н. Н., Кукконен Н. А. О гидрохимии залива Большое Онего // Оперативно-информационные материалы, Петрозаводск, 1979. С. 15–17.

175. Пирожкова Г. П., Мартынова Н. Н., Кукконен Н. А. Гидрохимическая характеристика Онежского озера в зимний период // Оперативно-информационные материалы. Петрозаводск, 1980. С. 11–13.
176. Пирожкова Г. П., Новицкая Л. Л. О гидрохимии южной части Онежского озера: Оперативно-информационные материалы // Исследования экосистемы Онежского озера. Петрозаводск, 1981. С. 36–37.
177. Пирожкова Г. П., Филимонова Н. А. Формирование качества вод заливов Онежского озера // Материалы VI Всесоюзного симпозиума по современным проблемам самоочищения водоемов и регулирования качества воды. Таллинн, 1979. Ч. 1. С. 109–111.
178. Побегайло П. И. Роль донных организмов в процессе самоочищения водоемов, загрязненных сточными водами: Автореф. дис. ... канд. биол. наук. М., 1955.
179. Поддубная Т. Л. Материалы по питанию массовых видов тубифицид Рыбинского водохранилища // Тр. Ин-та биологии водохранилищ. 1961. Т. 4 (7). С. 219–231.
180. Подоба З. П. Определение небольших количеств дубильных веществ в воде // Научно-техн. бюл. ВНИОРХ. 1956. № 1–2. С. 12–15.
181. Поливанная М. Ф. Материалы к познанию зоопланктона Онежского озера: Автореф. дис. ... канд. биол. наук. Петрозаводск, 1950. 18 с.
182. (Поливанная М. Ф.) Поливана М. Ф. Гіллястову сі та веслоногі ракоподібні Онезького озера. Повід. 1 // Науч. зап. Киев. ун-та. 1954. Т. 13, вып. 6. С. 123–147.
183. (Поливанная М. Ф.) Поливана М. Ф. Гіллястову сі та веслоногі ракоподібні Онезького озера. Повід. 2 // Науч. зап. Киев. ун-та. 1956. Т. 15, вып. 4. С. 79–90.
184. Поляков Ю. К., Родькина И. С. Донные отложения Петрозаводской губы Онежского озера // Петрозаводская губа Онежского озера. Петрозаводск, 1981. С. 74–83.
185. Помазовская И. В., Дубровина Л. В., Флинт Е. В. Влияние биоенов на токсичность детергентов // Биологические ресурсы Белого моря и внутренних водоемов европейского Севера: Тез. докл. Петрозаводск, 1981. С. 23–24.
186. Пономарев А. И. Методы химического анализа минералов и горных пород. М., 1951. 334 с.
187. Попченко В. И., Александров Б. М. Донная фауна Онежского озера и ее биоценозы // Пресноводные гидробионты и их биология. Л., 1983. С. 102–126.
188. Предварительные результаты работ комплексной экспедиции по исследованию Онежского озера. Петрозаводск, 1965. Вып. 1. 43 с.; 1967. Вып. 2. 72 с.; 1969. Вып. 3. 147 с.; 1969. Вып. 4. 139 с.
189. Пущкарев Н. Н. Физико-географические данные об Онежском озере, сведения об его ихтиофауне и происхождении. Олонец; Петрозаводск, 1902. 230 с.
190. Пырина И. Л., Гецен М. В., Ванштейн М. Б. Первичная продукция фитопланктона озер Харбейской системы Большеземельской тундры // Продуктивность озер восточной части Большеземельской тундры. Л., 1976. С. 63–76.
191. Пырина И. Л., Елизарова В. А., Николаев И. И. Содержание фотосинтетических пигментов в фитопланктоне Онежского озера и их значение для оценки уровня продуктивности этого водоема // Микробиология и первичная продукция Онежского озера. Л., 1973. С. 108–122.
192. Пырина И. Л., Елизарова В. А., Николаев И. И. Содержание фотосинтетических пигментов в фитопланктоне Онежского озера и их значение для оценки уровня продуктивности этого водоема // Микробиология и первичная продукция Онежского озера. Л., 1973. С. 108–122.
193. Распопов И. М. Макрофиты Онежского озера // Растительный мир Онежского озера. Л., 1971. С. 21–87.
194. Растительный мир Онежского озера. Л., 1971. 191 с.
195. Ресурсы поверхностных вод СССР. Л., 1966. Т. 2. 702 с.
196. Ресурсы поверхностных вод СССР // Основные гидрологические характеристики. Т. 2: Карелия и Северо-Запад. Л., 1972. Ч. 1. 527 с.
197. Ридли Лж. Е. Эвтрофные водоемы и водоснабжение // Научные основы контроля качества поверхностных вод по гидробиологическим показателям. Л., 1977. С. 13–28.
198. Родина А. Г. Методы водной микробиологии: Практическое руководство. Л., 1965. 365 с.
199. Рожков В. А. Методы вероятностного анализа океанологических процессов. Л., 1979. 280 с.
200. Романенко В. И., Кузнецов С. И. Экология микроорганизмов пресных водоемов: Лабораторное руководство. Л., 1974. 194 с.
201. Руководство по химическому анализу поверхностных вод суши. Л., 1977. 540 с.
202. Салимовская-Родина А. Г. Микробиологические исследования Онежского озера в 1930–1931 гг. // Исследования озер СССР. 1932. Вып. 1. С. 8–84.
203. Саркисян А. С., Демин Ю. Л., Ибраев Р. А. и др. Методы и результаты расчета циркуляции вод Мирового океана. Л., 1986. 151 с.
204. Семенович Н. И. Донные отложения Онежского озера. Л., 1973. 102 с.
205. Скопинцев Б. А. Органическое вещество в природных водах (водный гумус) // Тр. ГОИН. 1950. Вып. 17 (29). С. 31.
206. Слепухина Т. Д. К фауне олигохет литорали Онежского озера // Водные малощетинковые червы. Ярославль, 1972. С. 51–77. (Матер. 2-го Всесоюз. симп.).
207. Слепухина Т. Д., Алексеева Н. А. Донные беспозвоночные // Антропогенное эвтрофирование Ладожского озера. Л., 1982. С. 181–190.
208. Смирнова Т. С. Зоопланктон Онежского озера: Автореф. дис. канд. биол. наук. Л., 1972. 26 с.
209. Смирнова Т. С. Планктонные коловратки и ракообразные // Зоопланктон Онежского озера. Л., 1972. С. 126–240.
210. Смирнова Т. С. Зоопланктон литоральной зоны Онежского озера // Литоральная зона Онежского озера. Л., 1975. С. 145–159.
211. Смирнова Т. С. Изменение структуры сообществ водных беспозвоночных под влиянием антропогенного эвтрофирования. 1. Зоопланктон // Антропогенное эвтрофирование Ладожского озера. Л., 1982. С. 173–180.
212. Современные методы химического анализа природной воды. М., 1955. 103 с.
213. Соколова В. А. Гастроподы озер Карелии и их роль в питании рыб: Автореф. дис. ... канд. биол. наук. Петрозаводск, 1951. 17 с.
214. Соколова Н. Ф. Гидрохимия Онежского озера и его притоков. Л., 1973. 240 с.
215. Сорокин Ю. И., Федоров К. В. Определение первичной продукции и деструкции органического вещества в Онежском озере // Тр. Ин-та биол. внутр. вод АН СССР. 1968. Вып. 19 (22). С. 3–8.
216. Сорокин Ю. И., Федоров К. В. Первичная продукция и деструкция в Онежском озере // Предварительные результаты работ комплексной экспедиции по исследованию Онежского озера. Петрозаводск, 1969. Вып. 3. С. 29–33.
217. Справочник по климату СССР. Л., 1966. Вып. 3, 2.3. 271 с.
218. Стадниченко А. П. Моллюски. Перлівницеві, Кулькові Фауна України, Київ, 1984. Т. 29, вып. 9. 380 с.
219. Стельмакова Г. К. Зообентос Ладожского озера // Биологические ресурсы Ладожского озера: (Зоология). М.; Л., 1968. С. 4–71.
220. Тепловой режим Онежского озера / Под ред. С. В. Калесника. Л., 1973. 327 с.

221. Тимм Т. Малоцетинковые черви (Oligochaeta) водоемов Северо-Запада СССР. Таллинн, 1987. 299 с.
222. Титов В. С. Опыт применения стационарной модели для расчета течений в Онежском озере // Комплексное изучение водных ресурсов Карелии: Оперативно-информ. матер. Петрозаводск, 1982. С. 5–8.
223. Титов В. С. Моделирование течений залива Большое Онего // Исследование экосистемы Онежского озера: Оперативно-информ. матер. Петрозаводск, 1981. С. 15–18.
224. Титов В. С., Тамсалу Р. Э. Трехмерная модель неустановившихся течений в Онежском озере // Лимнология Онежского озера: Оперативно-информ. матер. Петрозаводск, 1985. С. 6–11.
225. Тихомиров А. И. Температура воды, теплозапасы, тепловой баланс и термический режим Онежского озера // Тепловой режим Онежского озера. Л., 1973. С. 202–223.
226. Толмазин Д. М., Шнайрман В. А. О динамике стационарных течений Азовского моря // Океанология. 1971. Т. 11, № 6.
227. Толмачев В. А. Работы в Кондопожской губе летом 1927 г. // Изв. ГГИ. 1928. № 21. С. 142–144.
228. Трифонова И. С., Николаев И. И. Продуктивность фитопланктона Петрозаводской губы и прилегающих районов Онежского озера // Гидробиологическая характеристика Петрозаводской губы Онежского озера. Петрозаводск, 1980. С. 30–36.
229. Трифонова И. С., Ульянова Д. С., Чеботарев Е. Н. Первичная продукция, содержание хлорофилла и органическое вещество сестона в Онежском озере летом 1977 года // Гидробиол. журн. 1982. Т. 18, № 5. С. 106–109.
230. Умнова Л. П. Первичная продукция фитопланктона, содержание хлорофилла „а” и сестона в воде залива Большое Онего Онежского озера // Лимнологические исследования на заливе Онежского озера Большого Онего. Л., 1982. С. 81–93.
231. Унифицированные методы исследования качества вод. IV. Методы микробиологического анализа вод. М., 1975. 138 с.
232. Урбан В. В. Характеристика зоопланктона карельских озер и значение его в питании рыб // Биология внутренних водоемов Прибалтики. М.; Л., 1962. С. 144–150.
233. Урбан В. В. Кормовые ресурсы планктона Онежского озера // Тр. Карел. отд-ния ГосНИОРХ. 1968. Т. 4, вып. 3. С. 106–132.
234. Устинов Г. Н., Рубушкова Л. Д. Уровненный режим Онежского озера в естественном и зарегулированном состоянии // Сб. Ленинградской ГМО. Л., 1977. Вып. 11. С. 54–66.
235. Фельзенбаум А. И. Обобщение теории Экмана на случай неравномерного ветра и произвольного рельефа дна замкнутого моря // Докл. АН СССР. 1956. Т. 109, № 2. С. 199–302.
236. Фельзенбаум А. И. Метод полных потоков в классической теории морских течений // Тр. Ин-та океанол. АН СССР. 1956. № 19. С. 57–82.
237. Фельзенбаум А. И. Теоретические основы и методы расчета установившихся морских течений. М., 1960. 123 с.
238. Фельзенбаум А. И. Динамика морских течений // Гидромеханика, 1968: Итоги науки, серия механика. М., 1970. С. 97–338.
239. Филатов Н. Н. Динамика озер. Л., 1983. С. 166.
240. Белецкий Д. В., Демин Ю. Л., Филатов Н. Н. Диагностический расчет летней циркуляции вод Онежского озера // Изв. АН СССР. ФАО. 1989. Т. 25, № 5. С. 556–557.
241. Филатов Н. Н., Рянжин С. В. О спектрах движений в крупных озерах // Термодинамические процессы в глубоких озерах. Л., 1981. С. 13–22.
242. Филатова И. В., Филатов Н. Н. Закономерности изменчивости внешнего водообмена и уровня крупных озер // Тр. V Всесоюз. гидрол. съезда. Л., 1988. С. 47–54.
243. Филимонова З. И. Влияние сточных вод целлюлозно-бумажных комбинатов на развитие зоопланктона // Вопросы гидрологии, озераведения и водного хозяйства Карелии. Петрозаводск, 1969. С. 154–182.
244. Филимонова З. И. Зоопланктон Петрозаводской губы Онежского озера // Охрана и использование водных ресурсов Карелии. Петрозаводск, 1974. С. 212–247.
245. Филимонова З. И. Зоопланктон Кондопожской губы и Онежского озера // Водные ресурсы Карелии и их использование. Петрозаводск, 1975. С. 117–132.
246. Филимонова З. И., Куликова Т. П. Зоопланктон северной части Повенецкого залива // Охрана и использование водных ресурсов Карелии. Петрозаводск, 1974. С. 179–193.
247. Филимонова З. И., Куликова Т. П. О зоопланктоне Петрозаводского Онего // Петрозаводское Онего и его лимнологические особенности. Петрозаводск, 1984. С. 123–138.
248. Филимонова Н. А. Микробиологический режим Большой губы Повенецкого залива Онежского озера // Охрана и использование водных ресурсов Карелии. Петрозаводск, 1974. С. 139–151.
249. Филимонова Н. А. Бактериопланктон Петрозаводского Онего // Петрозаводское Онего и его лимнологические особенности. Петрозаводск, 1984. С. 83–95.
250. Филимонова Н. А. Оценка продукционных возможностей бактериопланктона одного из заливов Онежского озера // Микроорганизмы в экосистемах озер и водохранилищ. Новосибирск, 1985. С. 82–85.
251. Филимонова Н. А., Лазарева Н. Б., Вислянская И. Г. Динамика развития планктонных сообществ – показатель антропогенного эвтрофирования отдельных районов Онежского озера // Антропогенное эвтрофирование природных вод: Тез. докл. III Всесоюз. симпозиума. Чернологовка, 1983. С. 175–177.
252. Филимонова Н. А., Пирожкова Г. П., Вислянская И. Г. и др. Роль гидробионтов в трансформации органического вещества в заливе Большое Онего Онежского озера // Органическое вещество и биогенные элементы во внутренних водах: Тез. докл. III Всесоюз. симпозиума. Таллинн, 1978. С. 118–119.
253. Филимонова Н. А., Федорова Т. М. Бактериопланктон Петрозаводской губы // Гидробиология Петрозаводской губы Онежского озера. Петрозаводск, 1980. С. 37–52.
254. Филимонова Н. А., Фурсенко М. В. Бактериопланктон залива Большое Онего Онежского озера // Лимнологические исследования на заливе Онежского озера Большое Онего. Л., 1982. С. 49–70.
255. Финогенова Н. П., Лобашова Т. М. Малоцетинковые черви, их видовой состав, количественное развитие и распределение // Невская губа: Гидробиологические исследования. Л., 1987. С. 127–135.
256. Характеристика отдельных элементов озерных экосистем Карелии. Петрозаводск, 1982. 30 с.
257. Харкевич Н. С. Гидрохимия северной части Повенецкого залива Онежского озера // Охрана и использование водных ресурсов Карелии. Петрозаводск, 1974. С. 68–123.
258. Харкевич Н. С., Мартынова Н. Н., Митина И. Ф., Селиванова Е. А. Некоторые данные о химическом составе атмосферных осадков, выпадающих на территории КАССР // Тез. докл. IX сессии ученого совета по проблеме „Биологические ресурсы Белого моря и внутренних водоемов европейского Севера”. Петрозаводск, 1974. С. 15–18.
259. Харкевич Н. С., Фрейдлинг В. А. Поступление в озера южной Карелии биогенных элементов с атмосферными осадками и с различных по характеру водосборов // Тез. докл. на III Всесоюз. симпозиуме „Антропогенное эвтрофирование природных вод”. Чернологовка, 1983. С. 177–178.

260. Хлебович Т. В. Роль инфузорий в процессе самоочищения водоема // Гидробиологические основы самоочищения вод. Л., 1976. С. 25–29.
261. Хлебович Т. В. Количественные показатели питания инфузорий // Общие основы изучения водных экосистем. Л., 1979. С. 100–106.
262. Хлебович Т. В. Скорость потребления кислорода инфузориями // Общие основы изучения водных экосистем. Л., 1979. С. 25–31.
263. Цалолыхин С. Я. Nematoda // Биологическая продуктивность северных озер. Л., 1975. Т. 2. С. 117–119.
264. Цветова Е. А. Математическое моделирование циркуляции вод озера // Течения в Байкале. Новосибирск, 1977. С. 63–81.
265. Цветкова Л. И. О роли сапробных олигохет в кислородном балансе водоемов (бассейн р. Невы): Автореф. дис. ... канд. биол. наук. Л. 20 с.
266. Чербадж и И. И. Определение фотосинтетических пигментов // Методы химического анализа в гидробиологических исследованиях. Владивосток, 1979. С. 103–122.
267. Черняева Ф. А. Морфометрическая характеристика Онежского озера // Тепловой режим Онежского озера. Л., 1973. С. 7–24.
268. Чорик Ф. П. Свободноживущие инфузории водоемов Молдавии. Кишинев, 1968. 250 с.
269. Швец П. Д. Водный баланс Онежского озера // Сб. работ Ленинградской гидрометеосерватории. Л., 1977. Вып. II. С. 25–53.
270. Швец П. Д. Гидрологическая изученность Онежского озера и его бассейна // Исследования режима и расчеты водного баланса озер – водохранилищ Карелии. Л., 1977. Вып. II. С. 3–24.
271. Швец П. Д. Изменение водного баланса Онежского озера в связи с проектируемой переброской части его стока на Волжский склон // Биологические ресурсы Белого моря и внутренних водоемов европейского Севера. Сыктывкар, 1977. С. 30–32.
272. Шкудова Г. Я. Расчет стационарных течений Северного Каспия // Тр. ГОИН. 1972. Вып. 115.
273. Шкудова Г. Я. Метод расчета трехмерного поля стационарных ветровых течений в мелководных замкнутых и полужамкнутых бассейнах // Рекомендации по расчету течений в шельфовой зоне морей. М., 1979. С. 52–78.
274. Шкудова Г. Я., Ковалев Н. П. Опыт применения гидродинамической стационарной модели для расчета течений в мелком море // Метеорология и гидрология. 1969. № 10. С. 76–86.
275. Шнитников А. В. Внутривекровая изменчивость общей увлажненности бассейна Ладожского озера // Гидрологический режим и водный баланс Ладожского озера. Л., 1966. С. 5–57.
276. Щербakov А. П. Продуктивность зоопланктона Глубокого озера. Сообщение III. Планктонные простейшие // Тр. ВГБО. 1963. Т. 13. С. 13–24.
277. Щербань Э. П. Токсичность некоторых синтетических поверхностно-активных веществ для *Daphnia magna* // Гидробиол. журн. 1979. Т. 15, № 3. С. 69–73.
278. Эгерг М. Б. Планктонные инфузории // Тр. Сиб. отд. лимнол. ин-та АН СССР. 1971. Т. 12 (32). С. 201–223.
279. Элементы экосистемы Онежского озера. Петрозаводск, 1984. 84 с.
280. Allender I. H. Comparison of model and observed currents in Lake Michigan // J. Phys. Oceanogr. 1977. Vol. 7. P. 711–718.
281. Bennet T. R. A three-dimensional model of Lake Ontario's summer circulation. I. Comparison with observations // J. Phys. Oceanogr. 1977. Vol. 7. P. 591–601.
282. Danks H. V., Oliver D. R. Seasonal emergens of some high arctic chironomidae (Diptera) // Canad. Entomol. 1972. Vol. 104. P. 661–686.
283. Gu D. Vorstudien zur Bedeutung der sedimentbewohnenden Zuckmücken in Stoffhaushalt des Balatonsees (Ungarn) // Chironomidae: Ecol., Syst., Cytol., Physiol.: Proc. 7 Intern. Symp. on Chironomidae, August 1979. Dublin, 1979. S. 269–273.
284. Huang J., Sloss P. Simulation and verification of Lake Ontario's mean state // J. Phys. Oceanogr. 1981. Vol. 11, N 11. P. 1548–1566.
285. Kahl A. Wimpertiere oder Ciliata (Infusoria) // Die Tierwelt Deutschlands. Jena, 1930–1935. 886 S.
286. Luther A. Bideag kändedomen om Land och Sötvattengastropodernas Utbredning in Finland // Acta Soc. fauna et flora fennica. 1901. Vol. 20, N 3. P. 119–123.
287. Simons T. I. Verification of numerical model of Lake Ontario. I. Circulation in spring and early summer // J. Phys. Oceanogr. Vol. 4. P. 507–523.
288. Simons T. Reliability of circulation models // J. Phys. Oceanogr. 1985. Vol. 15, N 9. P. 1191–1204.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	3
1. Физико-географическая характеристика озера (Т. В. Ефремова)	5
2. Современная структура и перспективы развития водного хозяйства в бассейне озера (Н. В. Альтшуллер, Т. Е. Гершензон, В. А. Карпечко, В. И. Кухарев, А. В. Литвиненко, В. Х. Лифшиц)	12
3. Гидрологическая характеристика озера	24
3.1. Водный баланс (П. Д. Швец, Карельский республиканский центр по гидрометеорологии)	24
3.2. Изменчивость водного баланса и уровня (Н. Н. Филатов)	29
3.3. Термический режим (М. П. Петров)	32
3.3.1. Температура поверхности воды по данным ИК-съемок (Т. В. Ефремова)	37
3.3.2. Зоны проявления, повторяемость прибрежного апвеллинга и циркуляция вод озера (Н. Н. Филатов)	47
3.4. Течения	53
3.4.1. Инструментальные исследования течения (П. М. Бояринов, С. Ф. Руднев)	53
3.4.2. Математическое моделирование течений озера в период гомотермии (В. С. Титов)	71
3.4.3. Особенности изменчивости течений Онежского озера в период стратификации по данным наблюдений и моделирования [Н. Н. Филатов (КФАН СССР), Д. В. Белецкий, Л. В. Зайцев (Ин-т озероведения АН СССР)]	85
4. Гидрохимический режим озера и его изменение под влиянием антропогенного воздействия (Г. П. Пирожкова)	95
4.1. Источники формирования химического состава воды озера	97
4.2. Химический состав воды Онежского озера	103
4.2.1. Центральное Онего	104
4.2.2. Залив Большое Онего	109
4.2.3. Повенецкий залив	117
4.2.4. Южная часть озера	121
4.2.5. Петрозаводская губа	126
4.2.6. Кондопожская губа	136
Заключение	145
5. Донные отложения (Е. П. Васильева)	147
5.1. Общая характеристика и гранулометрический состав	147
5.2. Формирование и распределение химических ингредиентов	149
5.3. Динамика органических веществ и биогенных элементов	169
5.4. Стратификация химического состава	171
5.5. Тенденция изменения химического состава осадков	173
6. Гидробиологическая характеристика озера	175
6.1. Бактериопланктон (Н. А. Филимонова)	175
6.2. Фитопланктон (И. Г. Вислянская)	183
6.2.1. Общая характеристика	184
6.2.2. Содержание хлорофилла	190
6.2.3. Интенсивность фотосинтеза	191
6.3. Протозойный планктон (Н. Б. Кустовлянкина)	192
6.4. Зоопланктон (Т. П. Куликова)	207
6.5. Донная фауна (З. С. Кауфман, Т. Н. Полякова)	216
7. Влияние биогенных элементов на развитие токсического процесса у гидробионтов (И. В. Помазовская, Е. В. Флинк, Л. В. Дубровина)	231
7.1. Влияние биогенных элементов на токсичность пестицидов	232
7.2. Влияние биогенных элементов на токсичность детергентов	242
7.3. Влияние биогенных элементов на токсичность тяжелых металлов	243
Заключение	245
Литература	250