

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК
ИНСТИТУТ БИОЛОГИИ ВНУТРЕННИХ ВОД
им. И. Д. Папанина

Э. С. Бикбулатов, Е. М. Бикбулатова,
А. С. Литвинов, С. А. Поддубный

ГИДРОЛОГИЯ И ГИДРОХИМИЯ ОЗЕРА НЕРО

Э. С. Бикбулатов, Е. М. Бикбулатова, А. С. Литвинов, С. А. Поддубный. Гидрология и гидрохимия озера Неро. — Рыбинск: Изд-во ОАО «Рыбинский Дом печати», 2003. — 192 с. Библ. 101 назв. Ил. 34. Табл. 65.

Книга содержит первое полное описание гидрологического и гидрохимического режимов одной из жемчужин средней полосы России — оз. Неро. Детально рассматриваются особенности морфометрии, термики, структуры течений, водного баланса, процессов формирования химического состава вод. Большое внимание уделено биогенным элементам, органическому веществу, донным отложениям. Затрагиваются вопросы формирования первичной продукции фитопланктона и высшей водной растительности.

Книга будет полезна специалистам, работающим в области гидроэкологии — гидрологам, гидрохимикам, гидробиологам, лимнологам, а также преподавателям и студентам высшей школы.

Книга издана при финансовой поддержке РФФИ,
проект 01-05—64684.

Bikbulatov E. S., Bikbulatova E. M., Litvinov A. S., Poddubnyi S. A.
Hydrology and hydrochemistry of Lake Nero.

The book contains the first complete description of hydrological and hydrochemical regimes of Lake Nero — one of the pearls of European Russia. Peculiarities of morphometry, thermics, structure of currents, water balance, processes of formation water chemical composition are considered in detail. Much attention is given to biogenic elements, organic matter, bottom sediments. Formation of primary production and higher aquatic plants also receives consideration.

This book is intended for specialists engaged in hydroecological studies — hydrologists, hydrochemists, hydrobiologists limnologists, as well as for university teachers and students.

Рецензент
доктор биологических наук **И. К. Рявьер**

Введение

Озеро Неро известно с древнейших времен. Еще в сказаниях и былинах, нашедших отражение в памятнике литературы «Песня о Ерше Ершовиче, сыне Щетинникова» говорилось о Ростовском озере, как «море тинном». В то же время исследованиям всего Ярославского Поволжья, нашедшим отражение в печатных изданиях, немногим более 250 лет. Опубликованная с тех пор литература о водоемах Ярославской области насчитывает тысячи названий (Лиманова, 1970). Подавляющее большинство их относится к периоду с 1840 по 1965 гг. и стало библиографической редкостью. Результаты гидрологических и гидрохимических исследований водных объектов области рассредоточены в этом «море» литературы, касающейся разных сторон географической и биологической области знаний, что в совокупности с труднодоступностью большинства ранних публикаций, крайне затрудняет поиск информации об особенностях их водного, термического и химического режимов.

Проведенный анализ литературных источников, во многом опирающийся на библиографическую сводку Н. А. Лимановой (1970), позволяет выделить в исследовании бассейна оз. Неро 7 основных этапов. Ниже приводится их краткая характеристика.

1760—1794 гг. Создание первого в России «Географического лексикона Российского государства» Ф. А. Полуниным (1773 г.). «Лексикон» имел объем 468 страниц текста и был снабжен «Приложением» с информацией о географических долготах и широтах, листом по небесным наблюдениям. Здесь же упоминаются ряд притоков р. Волги и, в том числе, р. Которосль, берущая начало из Ростовского озера. Второе издание словаря в 6 томах, дополненное и исправленное, под сокращенным названием «Географический словарь Максимова» вышло в свет в 1788—1789 гг., где приводились сведения о природе, климате, реках и озерах Ярославской области с указанием их основных морфометрических показателей (Дитмар, 1956).

1841—1859 гг. Картографическое описание, характеристика водных объектов области.

1866—1887 гг. Картографическое описание, первые самостоятельные труды об оз. Неро, геоморфологическое, геологическое описание области.

1895—1915 гг. Комплексные гидрологические и гидробиологические исследования, краткий очерк оз. Неро с батиметрической картой, промерные работы, геологические, почвенные и гидрографические исследования.

1920—1939 гг. Первые полевые сведения о гидрологии (морфометрии, температуре воды, прозрачности, цветности, грунтовом

комплексе) и гидрохимии (кислородном режиме, углекислоте, жесткости, хлоре, окисляемости) озера Неро, геологические исследования области. Большую долю занимают гидробиологические исследования.

1949—1970 гг.

Уточнение сведений о морфометрии озера, более полные гидрологические, физико-географические, лимнологические исследования. Наиболее полная характеристика грунтового комплекса, запасов сапропеля. Обобщение и критический анализ всей накопленной географической и биологической информации в ряде сборников.

1987—1991 гг.

Комплексные гидролого-гидрохимические и гидробиологические исследования экосистемы оз. Неро ИБВВ АН СССР (РАН). Опубликование сборника статей «Современное состояние экосистемы озера Неро» (1991).

Краткий анализ направлений исследований экосистемы оз. Неро выявляет постепенное увеличение доли комплексных работ с начала XX века до наших дней. Вместе с тем, непосредственное изучение гидрологического и гидрохимического режимов озера проводилось отрывочно и крайне недостаточно. Сведения о многих показателях гидрологического режима, таких как температура, электропроводность воды, режим уровня течений, волнение, сток, их сезонная и межгодовая динамика ограничены или совсем отсутствуют.

Процентное соотношение публикаций, прямо или косвенно касающихся оз. Неро, и в графическом виде представленное ниже, показывает, что наибольшее внимание исследователей и общественности водоем привлекал в период с 1940 по 1960 гг.

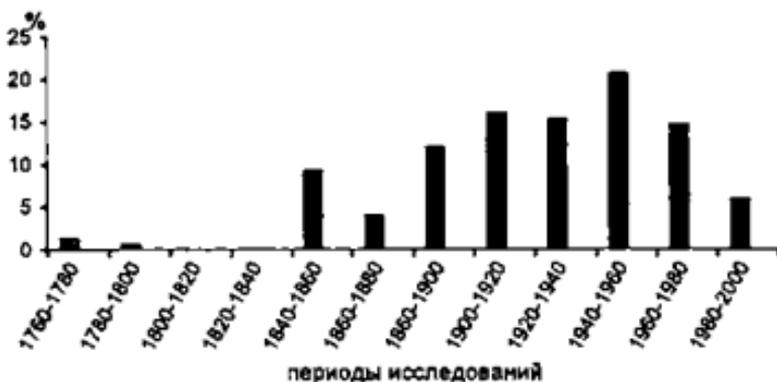


Рис. Интенсивность изучения бассейна оз. Неро в различные периоды по библиографическим источникам

Особенно большие пробелы существуют в знаниях о гидрохимическом режиме водоема. После довольно обстоятельной работы Б. С. Грезе, проведенной в 1926—1929 гг. до начала комплексных исследований ИБВВ АН СССР в 1987 г., появлялись лишь отрывочные сведения об ограниченном круге химических компонентов.

Разработка в последнее время новых методов химического анализа, приборных комплексов для регистрации разнообразных параметров водной среды, привлечение современных методов сбора и обработки информации, методов математического моделирования гидродинамических процессов с использованием быстродействующих персональных ЭВМ и различного программного обеспечения позволяет получить новые представления о протекающих в озере гидрофизических и гидрохимических процессах и легче восполнить пробелы в изучении его режима.

Знание особенностей поведения гидрологических и гидрохимических параметров озера во времени и пространстве необходимо при проведении и трактовке результатов большинства гидробиологических исследований, оценке современного состояния экосистемы, выявлении тенденций ее изменения под воздействием внешних и внутренних факторов, установлении допустимых пределов антропогенной нагрузки, при которой обеспечивается ее продолжительное и устойчивое существование. В конечном счете знание пределов изменчивости абиотических факторов среды необходимо при разработке комплексного подхода к управлению водным объектом, а также планировании различных мероприятий по реставрации или реконструкции озерной экосистемы. Отсутствие или недостаточность такого рода сведений не только ограничивают возможности управления качеством воды в озере, но и могут привести к нежелательным необратимым последствиям при необоснованном вмешательстве в ее веками установившуюся жизнь.

С целью устранения большей части указанных пробелов в исследовании экосистемы оз. Неро Институтом биологии внутренних вод АН СССР (РАН) в период с 1987 по 1991 гг. было проведено 25, из них зимой 6, экспедиционных обследований озера. Работы велись на 16 стандартных станциях (рис. 1.1а), намеченных по предварительно проведенным подробным измерениям электропроводности воды (170 точек). Они охватывали всю акваторию озера, а также основные притоки (реки Сара, Ишня). Наблюдениями была охвачена и р. Векса, вытекающая из озера. Пробы воды в основных притоках (реки Сара, Ишня, Векса) отбирались с мостов: из р. Сары — в с. Поречье, из р. Ишня — с моста по московской трассе, из р. Вексы — с моста в с. Белогостицы. Станции 2, 9, 11 располагались в непосредственной близости от устьев рек, что позволило оценивать влияние соответствующих притоков на приустьевые участки.

На сильно заросшей высшей водной растительностью акватории качество воды и илов характеризовали на основании данных ст. 12, находившейся в плотном окружении тростника. Станция 4 располагалась в

центральной — самой глубоководной части озера. Остальные станции располагались на мелководьях западной и восточной частей водоема. Общее число съемок озера за период исследований составило 25, из них в зимний период — 6. Материалы этих исследований легли в основу описания гидрологического и гидрохимического режимов одной из жемчужин средней полосы России — оз. Неро.

Авторы считают своим приятным долгом выразить благодарность д.б.н. И. К. Ривьер за труд по рецензированию книги, И. К. Степаковой, В. Л. Склярченко, Н. П. Горбенко, Ю. В. Ершову, В. М. Михайловой, В. Н. Фотиевой, А. П. Куликовой за обработку полевых материалов и выполнение гидрохимических анализов, М. А. Беляковой за оказанную помощь в подготовке рукописи к изданию.

Отклики и замечания по предлагаемой читателям книге будут с признательностью приняты авторами. Просим направлять их по адресу: 152742, Ярославская область, Некоузский район, п. Борок, ИБВВ РАН.

ЧАСТЬ I

ГИДРОЛОГИЯ

Глава I

ФИЗИКО-ГЕОГРАФИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА

1.1. Водосборный бассейн

Неро — самое большое озеро в пределах Ярославского Поволжья расположено в южной части Ростовской низины. Водосборный бассейн озера площадью 1314 км² почти целиком находится в пределах Борисоглебской возвышенности, являющейся частью Ярославско-Грязовецкой моренно-холмистой гряды (Чижиков, 1956, Рохмистров, 1970). Длина Ростовской котловины составляет 35 км, ширина — 25 км, а площадь близка к 750 км² (Фортунатов, Московский, 1970). Образование котловины связано с такими последовательно действующими причинами, как возникновение депрессии вследствие тектонических или карстовых явлений, действие предледниковых потоков и выпаживание ледником, влияние мертвого льда (Чижиков, 1956 б).

Бассейн озера сложен четвертичными отложениями (ледниковым комплексом, флювиогляциальными отложениями, покровными суглинками, древним и современным аллювием, древним и современным делювием и отложениями подземных вод), подстилаемыми коренными породами — черными юрскими глинами и пестроцветными глинами триаса. В бассейне встречаются калининская, московская, днепровская и окская морены, мощность которых в среднем составляет 10—15 м, достигая местами 60 м. Почвы представлены следующими видами: слабо- и среднеподзолеными, сильноподзолеными, подзолисто-оглеенными, дерново-слабо- и среднеподзолистыми, темноцветными слабоподзоленными, аллювиальными, темноцветными, засоленными (усолами), иловато-болотными, оглеенными и дерново-полуболотными, низинными, переходными и верховыми торфяниками различной мощности. По механическому составу преобладают суглинки от легких до тяжелых и супеси. (Чижиков, 1956 а). Растительность водосбора представлена еловыми лесами. Культурное земледелие занимает ~ 50—60% площади водосбора.

Окружающий озеро рельеф холмисто-моренный или холмисто-долинный. Холмы большей частью высокие с плоскими вершинами и относительно пологими склонами. Между холмами много ложбин, проложенных потоками ледниковых вод. В приозерной котловине оз. Неро

наблюдаются пять террас: заливная (луговая); сложенная из речного аллювия и современных озерных отложений; надлуговая, сложенная древним аллювием; образованная мореной и покровными суглинками; сложенная из отложений ледника и послеледниковых вод (Чижиков, 1956 б). Общий уклон низины, направленный к озеру, составляет не более 0,059%, наиболее высокие точки — моренные гряды (Рохмистров, 1970).

Гидрогеология Ростовской котловины характеризуется полным отсутствием основного водоносного горизонта в центре низины и мощным его развитием на бортах низины. Главное место в формировании стока рек принадлежит грунтовым водам надморенных песчаных и супесчаных толщ.

Залесенность низины — ~ 15%, заболоченность — до 20%, коэффициент густоты речной сети крайне мал — 0,18. Гидрографическая сеть включает более 20 притоков, наиболее крупными из которых являются река Сара, Кучибешь, Ишня, Сулость. Самая большая из впадающих рек — Сара, ее длина 93 км, площадь водосборного бассейна до 903 км² (Рохмистров, 1970; Фортунатов, Московский, 1970).

1.2. Морфометрия и рельеф дна

Морфометрические показатели озера представляют количественное выражение элементов формы и размеров котловин озер и объема заполняющих их вод, отражают специфику развития котловины и процессы, протекающие в водной массе озера (Богословский, 1977; Теоретические вопросы классификации озер, 1993).

На основании сложившейся практики лимнологических исследований выделен ряд морфометрических показателей поверхности озера, объема, глубины и дна:

— длина озера, L ;

— средняя ширина, $\bar{B} = \frac{f_0}{L}$;

— максимальная ширина, B_{\max} ;

— длина береговой линии, l ;

— развитие береговой линии, $K = \frac{l}{2\sqrt{f_0\pi}}$;

— удлиненность озера, $K_y = \frac{L}{B}$, (форма близкая к округлой — $K_y = 1,5 - 3,0$, овальной — $K_y = 3 - 5$, овально-удлиненная $K_y = 5 - 7$, удлиненная — $K_y = 7 - 10$, вытянутая в виде борозды — $K_y > 10$);

— площадь водосбора, F км²;

— площадь поверхности (зеркала), f_0 ;

— площадь озера, $K_0 = \frac{f_0}{F}$;

— островность, $I = \frac{f' - f_0}{f} 100\%$, f' — общая площадь озера;

— максимальная глубина, H_{\max} ;

— средняя глубина, $\bar{H} = \frac{V}{f_0}$;

— объем, V ;

— форма котловины, $C = \frac{\bar{H}}{H_{\max}}$ (для цилиндра, полуэллипсоида, параболоида и конуса C соответственно равен 1, 2/3, 1/2 и 1/3);

— относительная глубина, $a = \frac{\bar{H}}{f_0^{1/3}}$, при $a = 0,1 - 0,5$ — очень мелкие озера, $a = 0,5 - 2,0$ — мелкие, $a = 2 - 4$ — нормальные, $a = 4 - 10$ — глубокие, $a = 10 - 20$ — очень глубокие;

— средний уклон дна, α , $\operatorname{tg} \alpha = \frac{h \sum l_i}{f_0}$, $\sum l_i$ — сумма длин изобат, h — сечение изобат;

— открытость озера, $K_{от} = \frac{f_0}{H}$;

— батиграфическая кривая.

Морфометрические показатели позволяют с одной стороны достаточно точно определить место водоема в общей системе классификации водных объектов, а с другой несут необходимую информацию для нахождения зависимостей между гидрологическим режимом и гидрохимическими и биологическими особенностями водоема. (Китаев, 1984; Кудерский, 1991; Теоретические вопросы классификации озера, 1993).

К настоящему времени существует не так много литературы, касающейся морфометрических показателей оз. Неро. Вместе с тем, сведения об основных морфометрических показателях озера достаточно противоречивы. Так, Б. С. Грезе (1929) определяет длину, максимальную ширину, площадь и максимальную глубину равными соответственно 12,8 км, 7,5 км, 51,32 км², 3,5 м. По Н. В. Чижикову (1956 б) длина озера равна 12,9 км, максимальная ширина — 7,5 км, площадь — 56 км² и максимальная глубина — 4,5 м. При этом не указывается для какой отметки уровня произведены измерения указанных показателей. В дальнейшем М. А. Фортунатов и Б. Д. Московский (1970) со ссылкой на исследования В. Л. Рохмистрова приводят следующие значения основных морфомет-

рических показателей: длина — 12,5 км, максимальная ширина — 8 км, площадь — 51,7 км², объем — 77,5 · 10⁶ м³, максимальная глубина — 3,5 м, длина береговой линии — 49 км. Все значения соответствуют среднему уровню озера — 95,08 м. Здесь возникают наибольшие сомнения в правильности определения параметров, т. к. средний многолетний уровень озера, согласно табл. 41 в статье М. А. Фортунатова и Б. Д. Московского (1970), равен 93,75 м. Наконец, в «Гидрологических ежегодниках» площадь озера определена в 54,4 км². Выявленные неоднозначности в толковании основополагающих морфометрических показателей озера Неро привели к необходимости повторной их оценки с целью уточнения и пересмотра.

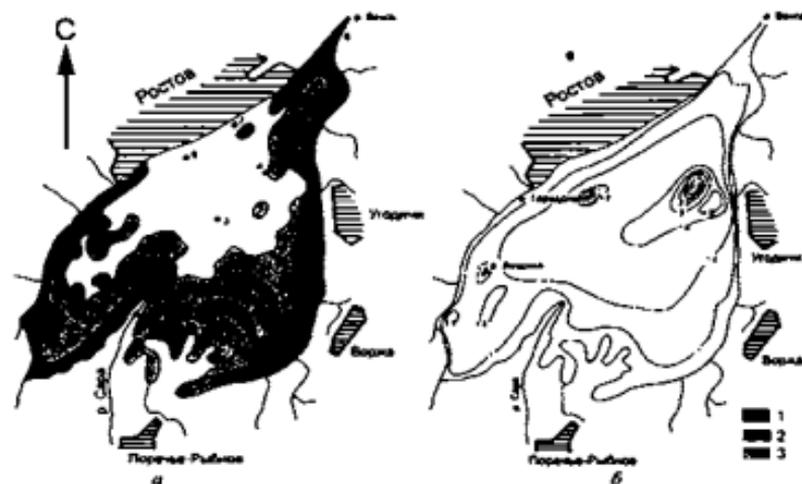


Рис. 1.1. Озеро Неро:

a — расположение створов наблюдений и схема зарастания (по: Добря, 1991); *б* — рельеф дна; 1 — воздушно-водная растительность, 2 — растительность с плавающими на поверхности воды листьями, 3 — погруженная растительность

Для расчета длины, ширины и площади озера использовалась батиметрическая карта озера, полученная в результате промеров глубин лабораторией гидрологии ИБВВ со льда в марте 1988 г. (рис. 1.1 б). На ее основе строились объемная $V = f(H)$ и батиграфическая $f_0 = f(H)$ кривые (рис. 1.2). Все необходимые расчеты осуществлялись по стандартным гидрологическим методикам (Богословский, 1960) и были приведены к среднему многолетнему уровню 93,75 м (табл. 1.1).

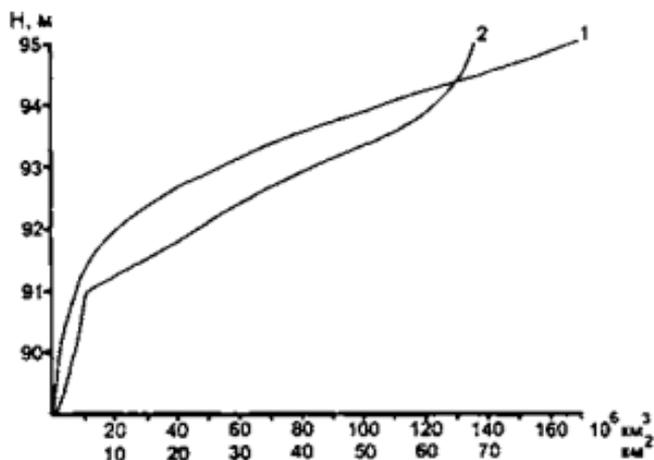


Рис. 1.2. Объемная (1) и батиметрическая (2) кривые оз. Неро

Таблица 1.1

Морфометрические показатели оз. Неро при среднем многолетнем уровне 93,75 м

Показатель	Значение
L , км	13.2
B_{max} , км	8.3
B , км	4.4
F , км ²	1256.2
f_0 , км ²	57.8
f , км ²	57.85
V , 10 ⁶ м ³	90
$H_{пр}$, м	4.7
H , м	1.6
l , км	56
K	2.1
K_y	3
l	0.1
C	0.34
a	0.42
α , град.	0.07
$K_{пр}$	36
K_0	0.05

Согласно полученным данным (табл. 1.1), оз. Неро относится к очень мелким озерам с формой близкой к округлой, с достаточно развитой береговой линией и доступностью к воздействию метеорологических факторов. Рельеф дна практически ровный. Средний уклон дна составляет 0,07°. Более 50% акватории приходится на участки с глубинами, близкими к 1,5 м. В северо-восточной части озера расположена ложбина с глубинами > 3 м, занимающая площадь ~ 28 га. Небольшое углубление > 1,5 м отмечено в юго-западной части озера у устья р. Кучебишь, связанное вероятно с промышленной добычей в этом районе сапропеля. При типичном летнем наполнении на озере существуют три острова, суммарной площадью ~ 5,4 га.

1.3. *Климатические особенности бассейна*

1.3.1. *Температура воздуха, осадки, испарение.* Климат бассейна Верхней Волги, в пределах которого находится оз. Неро, умеренно-континентальный и складывается под воздействием морских и континентальных воздушных масс. Морские массы формируются над северными районами Атлантического океана и арктических морей, континентальные на Азиатской территории СНГ. Бассейн Верхней Волги пересекают полярные оси антициклонов, проходящие через Скандинавию, Исландию и Карское море, здесь же находится центр пересечения траектории циклонов из северной Атлантики и Средиземного моря. Таким образом, своеобразное географическое положение района способствует развитию штормов и достаточно больших скоростей ветра в течение всего сезона (Гидрометеорологический режим озер и водохранилищ СССР, 1975).

Средняя годовая температура воздуха в бассейне озера составляет 3,4 °С. Самый теплый месяц — июль, наиболее холодные — январь и февраль, со средними температурами соответственно -18 °С и -10,8 °С. Переход среднесуточной температуры через 0 °С происходит в первой половине апреля, осенью — в первых числах ноября. Продолжительность периода с положительными температурами 242 дня с суммой температур 2390 °С. Среднее многолетнее годовое количество осадков составляет 523 мм, 73% которых выпадает в теплый период года (апрель — октябрь — 372 мм). Испарение в теплый период года, рассчитанное по стандартной методике (Указания по расчету испарения с поверхности водосмов, 1969), несколько меньше количества выпадающих осадков (405 мм).

В зависимости от климатических условий года сезонный ход метеорологических характеристик может существенно изменяться (табл. 1.2). Так, в маловодный 1972 г. наибольшая среднемесячная температура воздуха отмечалась в июле и достигала 20,2°. Испарение за период с апреля

по октябрь (600 мм) в 2,4 раза превышало количество выпавших осадков (250 мм). В многоводный 1990 г. осадки на зеркало озера (602 мм) в 1,4 раза превышали испарение (440 мм). Максимальная температура воздуха наблюдалась в первой декаде июля (20,5°).

Таблица 1.2

**Метеорологические характеристики района оз. Неро
в теплый период года**

Месяцы	Температура, °С			Осадки, мм			Испарение, мм		
	1981—1986	1972	1990	1981—1986	1972	1990	1981—1986	1972	1990
апрель	4.1	4.2	6.3	34	49	10	10	30	32
май	12.4	11.8	9.8	35	31	96	48	89	119
июнь	15.6	18.4	14.3	110	23	59	94	143	85
июль	18.5	21.9	17.9	75	47	184	98	148	101
август	16.5	20.2	15.9	62	10	95	86	106	59
сентябрь	10.4	10.0	8.8	65	38	117	45	56	24
октябрь	4.9	4.4	4.3	60	52	43	24	28	20
Сумма за апрель—октябрь				441	250	602	405	600	440

Анализ 50-летнего ряда температуры воздуха на территории Ярославской области (побережье Рыбинского водохранилища) показал устойчивое ее повышение в течение исследуемого периода (Литвинов и др., 2002). Рост среднегодовых температур с 1947 по 2000 гг. по постам «Брейтово» и «Переборы» составил 1,2 °С. Наиболее интенсивное повышение температуры отмечалось в зимний период времени и составило 1,7 °С, тогда как за теплый период оно не превышало 0,25 °С при максимальной амплитуде колебаний в 9,3 и 3,2 °С соответственно.

В. А. Климановым (1992), на основе информационно-логического анализа по таблицам связи общего состава пыльцы и спор древесных пород с климатическими показателями (температурой воздуха и годовой суммой осадков), на примере озерно-болотных отложений Половецко-Кунанского болота, расположенного в Переславском районе, показано, что с начала голоцена до второй половины его субатлантического периода произошло 11 последовательных потеплений климата. Потепления сопровождались повышением температуры воздуха от 1 до 2,5 °С и в основном снижением количества осадков в среднем на 25 мм относительно современных значений (рис. 1.3). Периоды потеплений сменялись

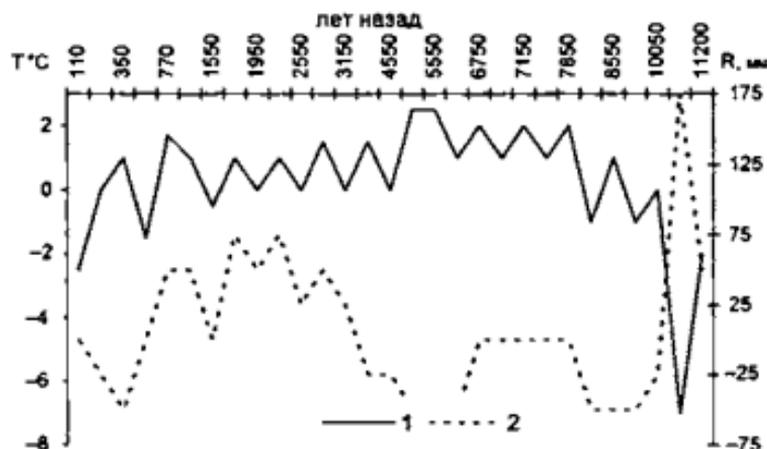


Рис. 1.3. Палеоклиматические изменения в пределах Ярославской области (T, °C — 1 и R, мм — 2 — отклонения температуры воздуха и количества осадков от современных значений)

периодами похолодания, которых выделено 10. При похолоданиях температура воздуха на 1—2 °C понижалась относительно температуры периодов потепления и в среднем была близка к современным значениям.

Более детальное изучение изменений климата во второй половине субатлантического периода до наших дней В. А. Климановым и Н. А. Хотинским (1992) выявили 8 периодов похолодания, сменяющихся 7 периодами потепления (рис. 1.3). Максимальное отклонение летних температур от их современных значений составляло ± 2 °C. Среднегодовое количество осадков отклонялось от современных в пределах ± 50 мм. Климатические колебания достаточно хорошо группировались в ряды однородных этапов (подфаз) продолжительностью от 25 до 225 лет. Подфазы меньшей продолжительности, как правило, соответствовали похолоданиям, а большей — потеплениям.

1.3.2. Режим ветра. Ветровые условия района озера определяются его направлением, скоростью и суточным ходом. Крайняя мелководность и открытость озера Неро обуславливают высокую реакцию водоема на ветровое воздействие.

В течение года преобладают ветры южных румбов, а в теплый период года — северо-западных направлений (табл. 1.3, 1.4). Расчет скорости ветра над акваторией озера по данным ГМС г. Ростова с учетом защищенности ГМС на суше, характера рельефа в пункте наблюдений, сред-

ней длины разгона воздушного потока над водоемом показал, что скорость ветра на высоте 2 м над водной поверхностью в среднем превышает в 1,5 раза скорость, измеренную на ГМС. С введенной поправкой средняя скорость ветра в течение сезона изменяется от 3,3 до 4,5 м/с.

Таблица 1.3

Повторяемость направлений ветра над акваторией оз. Неро за многолетний период

Месяц	Румбы							
	С	СВ	В	ЮВ	Ю	ЮЗ	З	СЗ
Апрель	16.7	7.8	5.5	12.3	20.7	10.2	16	10.8
Май	16.6	11.6	12	14.2	16	8.6	13	8
Июнь	20.2	8	12.2	10	11.2	11.4	19	8
Июль	21.6	9	12	10	11	9	16.2	11.2
Август	22.2	5.4	6	11.2	12	11.6	20.6	11
Сентябрь	13.2	4.8	7.8	13.4	14.4	15.8	21.8	5.8
Октябрь	10.4	3.6	3.2	9.4	26.2	16.8	22	8.4
Среднее	17.3	7.2	8.4	11.5	16.4	11.9	18.3	9.0

Таблица 1.4

Среднемесячная многолетняя скорость ветра (м/с) над акваторией оз. Неро

Апрель	Май	Июнь	Июль	Август	Сентябрь	Октябрь
4.1	3.8	4.2	3.3	3.8	4.4	4.5

В целом за сезон преобладают ветры со скоростью до 5 м/с (78,8%), продолжительность которых достигает 145 дней. Штормовые условия встречаются в 21,2% случаев и не превышают 39 дней (табл. 1.5). Средняя максимальная скорость ветра в безледный период составляет 15 м/с, а в отдельные дни может достигать 25 м/с.

Из-за отсутствия данных учащенных измерений скорости и направления ветра по ГМС г. Ростова для выявления особенностей внутрисуточной изменчивости характеристик ветра мы использовали часовые регистрации его параметров на АРИВе «Городок», установленном в центральной части Рыбинского водохранилища. Анализ данных измерений скорости и направления ветра в безледный период в 1988—1990 гг. показали, что в течение суток могут наблюдаться устойчивые по направлению (± 15 — 20°) ветры всех основных румбов при скоростях, достигающих штормовых значений. Это связано, как правило, с прохождением периферий крупных барических образований высокого и низкого давления. При прохождении фронтальных разделов (теплых, холодных, окклюзий)

или вторичных холодных фронтов направление ветра с сохранением высоких скоростей может несколько раз меняться в течение суток до противоположного (рис. 1.4). Причем такие изменения направления ветра также встречаются по большинству основных румбов.

Таблица 1.5

Повторяемость и продолжительность направлений ветра по градациям скорости над экваторной оз. Неро

Градация скорости, м/с	Средняя для градации скорость, м/с	Румбы								Сумма
		С	СВ	В	ЮВ	Ю	ЮЗ	З	СЗ	
0—5 %	2.5									
		13.7	5.6	7.0	8.9	12.3	9.6	14.8	6.9	78.8
час		600	247	312	394	542	425	655	305	3480
6—11 %	8.5									
		3.5	1.4	1.8	2.3	3.1	2.5	3.8	1.7	20.1
час		154	62	80	101	137	110	170	74	888
12—17 %	14.5									
		0.19	0.08	0.1	0.12	0.17	0.13	0.21	0.01	1.1
час		8	4	4	6	7	6	9	4	48

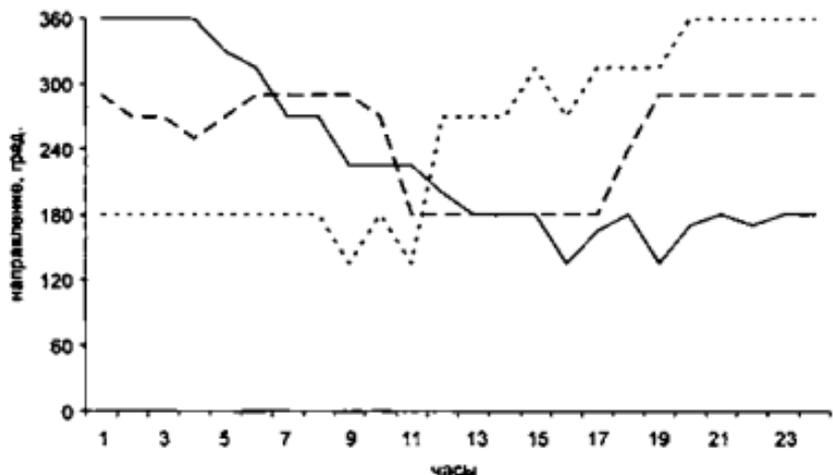


Рис. 1.4. Характерные внутрисуточные изменения направления ветра по АРВУ «Городок» (Рыбинское водохранилище)

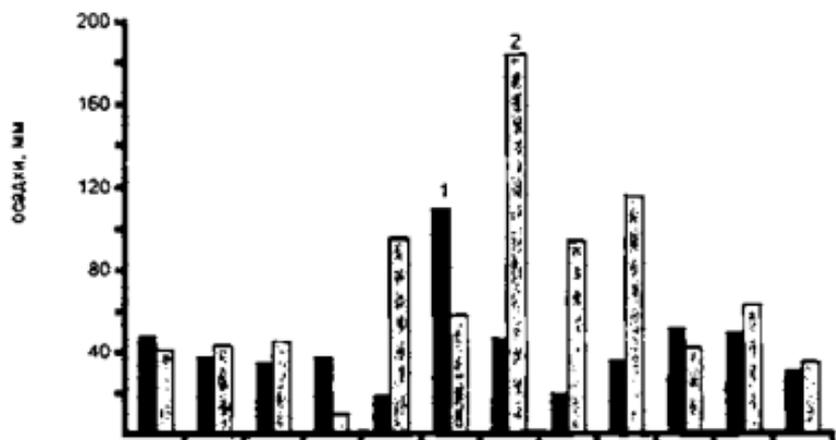
**ОСОБЕННОСТИ ГИДРОЛОГИЧЕСКОГО
РЕЖИМА ОЗЕРА****2.1. Режим уровня**

Сезонный ход уровня воды в озере типичен для озер средней полосы. Весенний подъем обычно начинается в третьей декаде марта. Наибольших отметок уровень достигает при прохождении пика весеннего половодья на реках (в конце апреля — начале мая) и наступает до момента очищения озера ото льда. Интенсивность подъема уровня в апреле может достигать 10—20 см/сутки. Максимальный уровень держится в течение 2—3 дней, а затем начинается его понижение, продолжающееся 3,5—4,0 месяца (рис. 1.5). За период 1930—1980 гг. максимальный уровень наблюдался 1 мая 1955 года и достигал отметки 96,37 м, а наименьший в период весеннего наполнения — 94,34 м 7—11 апреля 1975 года. Минимальный уровень приходится обычно на август—сентябрь (табл. 1.6). Абсолютный минимум уровня за тот же период был зафиксирован 12 октября 1955 г. и составил 93,09 м. В октябре—декабре за счет осенних дождевых паводков отмечается некоторое повышение уровня.

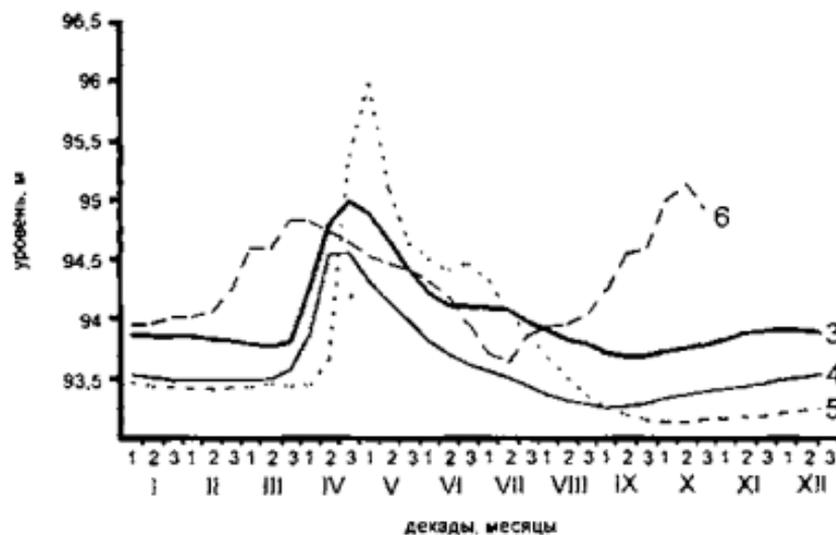
В средние по водности годы амплитуда колебания уровня составляет 1,2—1,3 м, а в отдельные годы (при незначительном количестве осадков в июле—сентябре) может достигать 3 м (1955 г.). В маловодные годы (1972) при малом объеме стока и интенсивном испарении в теплый период года уровень воды в озере на 0,4—0,6 м ниже, чем в средние по водности годы. В годы с большим количеством осадков в летне-осенний период (100—150 мм/мес.) в сезонном ходе уровня может наблюдаться два пика — весенний и осенний. При этом осенний пик уровня может превышать весенний (1990 г.) и достигать отметки 95,10 м (рис. 1.6).

Озеро Неро относится к зарегулированным водоемам, что накладывает свой отпечаток на сезонную изменчивость уровня. Вместе с тем, влияние плотины у с. Белогостицы на р. Вексе на колебание уровня достаточно не определено, так как за время существования водомерного поста плотина несколько раз реконструировалась, а временами полностью разрушалась. Кроме того, на настоящий момент также неизвестен и режим работы плотины.

К наиболее интересным особенностям гидрологического режима озера, связанным с колебаниями его уровня, следует отнести кратковременные превышения уровня в устье р. Вексы над уровнем озера, связанные с прохождением пика весеннего половодья и летне-осенних



а



б

Рис. 1.5. Сезонные изменения количества осадков (а);

1 — в 1990 г., 2 — в 1955 г. и уровни (б) 3 — за период 1981—1986 гг., 4 — в 1972 г., 5 — в 1955 г., 6 — в 1990 г.

Таблица 1.6

Сезонное изменение уровня воды оз. Неро

Месяц	1936—1963	1961—1984	1972	1985	1990	1962—1966 Минимальный
I	93.60	93.85	93.50	93.42	93.96	93.22
II	93.60	93.82	93.47	93.41	94.10	93.24
III	93.61	93.78	93.50	93.42	94.79	93.18
IV	94.42	94.66	94.31	95.38	94.74	93.41
V	94.44	94.64	94.13	94.62	94.46	93.62
VI	93.85	94.14	93.70	94.46	94.13	93.40
VII	93.60	94.03	93.48	93.84	93.72	93.37
VIII	93.50	93.82	93.30	93.35	93.96	93.25
IX	93.50	93.69	93.26	93.14	94.44	93.11
X	93.53	93.74	93.35	93.14	95.00	93.09
XI	93.59	93.86	93.42	93.14	—	93.10
XII	93.60	93.89	93.50	93.12	—	93.15

паводков на р. Устье. Обратные уклоны уровня способствуют формированию встречного к озеру течения в р. Вексе и поступлению вешних вод из бассейна р. Устье в оз. Неро. Такие явления могут наблюдаться, согласно В. Л. Рохмистрову (1970), один раз в три года. Однако данный вывод не однозначен.

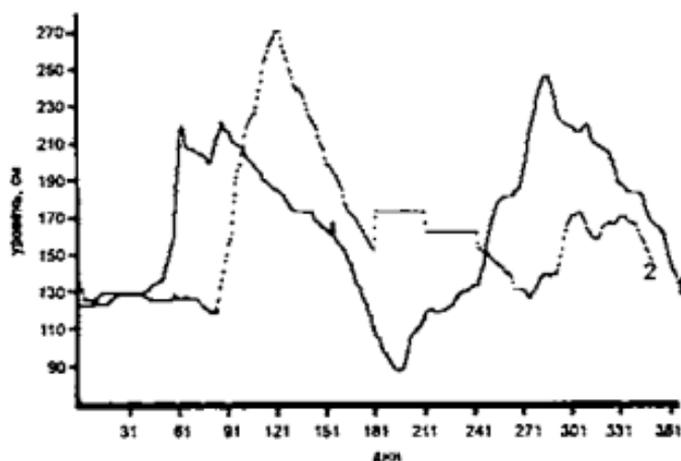


Рис. 1.6. Ежедневные изменения уровня воды в оз. Неро:
1 — 1990 г., 2 — 1991 г.

Для оценки возможностей образования обратных уклонов уровня использовались среднесуточные данные изменения уровней в период весеннего половодья и летних паводков по водомерному посту на р. Устье, расположенному в 30 км выше по течению от места ее слияния с р. Вексой. При расчете уровней в устье р. Вексы применялись стандартные методы гидрологических прогнозов (Полов, 1979). Из-за ограниченности доступного для анализа материала использовались данные регистраций уровня только с 1979 по 1985 гг. Расчет уровней осуществлялся в следующей последовательности: 1) определялась разница в уровнях на посту р. Устье и водомерном посту на р. Которосль, расположенном в 77 км ниже по течению от устья р. Вексы; 2) определялась величина превышения уровня относительно его минимального значения на водомерном посту на р. Устье; 3) в зависимости от превышения уровней на р. Устье или на р. Которосль рассчитывалась величина поправки на уровень в устье р. Вексы, которая или вычиталась из уровня на р. Устье или прибавлялась к нему; 4) определялась величина уровня в устье р. Вексы суммированием скорректированного уровня на р. Устье с минимальной абсолютной отметкой уровня в устье р. Вексы (абсолютные отметки минимального уровня на р. Устье и р. Вексе снимались с топографической карты масштаба 1:25000); 5) методом соответственных уровней рассчитывалось время добегаания волны половодья (паводка) от водомерного поста на р. Устье до устья р. Вексы; 6) с учетом времени добегаания определялись уровни оз. Неро, соответствующим по времени уровнем в устье р. Вексы.

Проведенные расчеты показали, что превышения уровня в устье р. Вексы над уровнем в озере наблюдаются в период прохождения пика половодья (паводка) на р. Устье и в первой половине его спада. Продолжительность существования обратных уклонов уровня в период половодья изменяется от 5 до 14 дней, а разница в уровнях может достигать 1,5 м. В зависимости от условий года превышение уровня отмечается в конце марта — первой декаде апреля, середине апреля — первой декаде мая. Начальный этап превышений уровня, как правило, проходит перед разрушением ледостава на озере. Обратные уклоны уровня, вызванные летними паводками, незначительны по продолжительности (~4 дней), отличаются малыми превышениями уровня (до 20 см) и достаточно редки: из семи проанализированных лет встретились один раз (рис. 1.7).

На фоне рассмотренных выше сезонных колебаний уровня озера в периоды действия сильных, устойчивых по направлению ветров в водоеме могут возникать кратковременные стонно-нагонные явления, приводящие к перекосам водной поверхности и, следовательно — понижению или повышению уровня воды в отдельных участках озера. Для оценки уровней в случае стационарной ветровой децивелиции использовалась формула А. В. Караушева (1960):

$$\Delta z = (3 + 10h) 10^{-8} \frac{L}{H_{cp}} W^2 \cos \alpha,$$

где Δz — абсолютная величина разности уровней в двух точках, м; L — расстояние между этими точками, м; H_{cp} — средняя глубина водоема в зоне между теми же точками, м; α — угол между направлением ветра и осью L (град.); W — скорость ветра на высоте флюгера, м/с; h_s — средняя на рассматриваемом участке водоема высота ветровой волны, м.

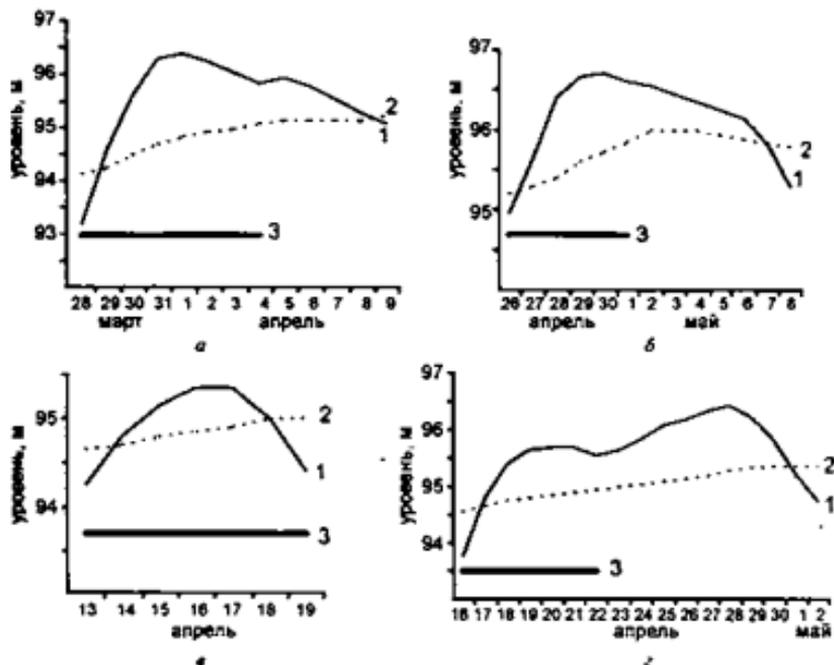


Рис. 1.7. Временной ход уровней в устье р. Пексы (1) и оз. Неро (2), ледостав на озере (3):

а — в 1983 г., *б* — в 1979 г., *в* — в 1981 г., *г* — в 1985 г.

Расчеты проведены для румбов преобладающих в сезоне штормовых ветровых ситуаций: северного, южного и западного ветра скоростью 15 м/с при соответствующих средних разгонах волн 7700 и 7200 м. Дополнительно рассчитывались превышения уровня при наибольшем разгоне волны — 13200 м, соответствующем СВВ направлению ветра.

Расчеты показали, что в первых двух случаях Δz между крайними точками у берегов озера составляют ~ 10 см. При наибольшем разгоне Δz может достигать 20 см.

Достаточно малые рассчитанные значения перекосов уровня и незначительная их повторяемость в сезоне ($\sim 0,6\%$) позволяют сделать вывод о незначительном воздействии ветровых деформаций на колебаниях уровня воды в озере.

2.2. Водный баланс и водообмен

Приходная часть водного баланса оз. Неро складывается из притока р. Сары, площадь водосбора которой составляет около 63% площади водосбора озера и притока 20 небольших рек и ручьев с площадью водосбора от 3 до 84 км². Реки бассейна озера характеризуются значительной неравномерностью распределения стока в течение года. Доля весеннего стока р. Сары (апрель—май) за период с 1981 по 1985 гг. составляла 42%, летне-осеннего (июль—ноябрь) — 39,4%, зимнего (декабрь—февраль) — 19%. Для притоков озера характерно наличие двух периодов низкого стока — летней и зимней межени. В летнюю межень минимальный сток наблюдается в июле—августе, в зимнюю — в феврале. В октябре—ноябре за счет дождевых паводков объем стока вновь увеличивается (рис. 1.8).

По данным В. Л. Рохмистрова (1970) наибольший приток в озеро поступает с 6 апреля по 12 мая и достигает 43% общей его величины. Продолжительность половодья в среднем 37 дней, минимальная на р. Саре — 21 день, максимальная — 49 дней.

В экстремальные по водности годы распределение притока по р. Саре внутри года может существенно изменяться. Так, в многоводном 1990 г., когда объем притока почти в два раза превышал среднюю величину за 1981—1985 гг., пик половодья наблюдался в марте и за март—апрель в озеро поступило 37% суммарного объема, а в мае только 4%. В летнюю межень (в июле) объем стока составил лишь 1,3% от суммарного за год. В тоже время за счет обильных дождей объем стока в октябре составил 19% от суммарного и был только на 2,6% меньше, чем в период половодья в марте (рис. 1.8).

Поверхностный приток в озеро составляет 238×10^6 м³/год, подземный сток — 72×10^6 м³/год и осадки на зеркало — 28×10^6 м³/год (Рохмистрова В. Л., 1970). Таким образом, в приходной части водного баланса озера приток поверхностных вод составляет 70,5%, подземных — 21,2% и осадки на зеркало — 8,3% от суммы прихода. Расход воды из озера осуществляется через р. Вексу и испарение с зеркала озера. Длина р. Вексы около 7 км, ширина русла — 50—60 м, глубина — 1—5,5 м. Сток через р. Вексу в расходной части достигает 92,6% и испарение 7,4% от суммы расхода.

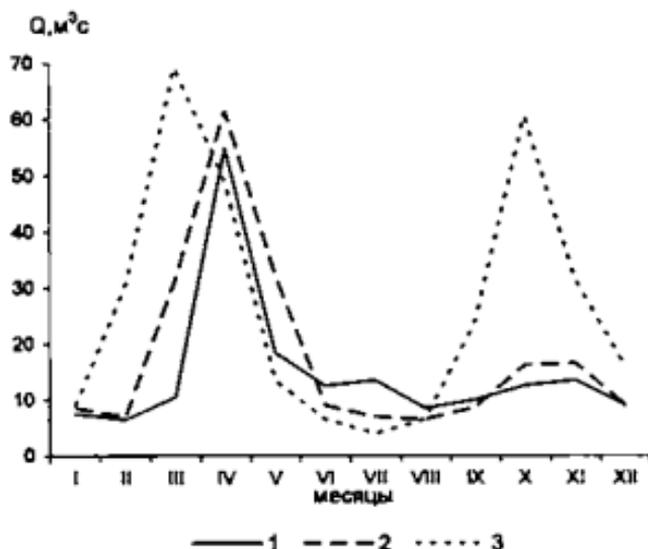


Рис. 1.8. Объем притока по р. Сарг:
1 — 1981—1985 гг.; 2 — 1989 г.; 3 — 1990 г.

Для оценки сезонной изменчивости водообмена озера использовались данные по среднемноголетнему уровню (табл. 1.6) и данные по внутригодовому распределению стока 90% обеспеченности (табл. 1.7).

Таблица 1.7

Внутригодовое распределение притока по озеру Неро (10^6 м^3)

Месяц	Обеспеченность, %		Месяц	Обеспеченность, %	
	75	90		75	90
январь	4.21	3.47	июль	4.39	3.62
февраль	4.72	3.9	август	4.14	3.42
март	5.93	4.89	сентябрь	4.21	3.47
апрель	112	92.3	октябрь	4.88	4.03
май	13.9	11.6	ноябрь	5.12	4.22
июнь	7.88	6.45	декабрь	5.61	4.63
СУММА				177	146

Коэффициент условного водообмена рассчитывался по формуле:

$$K_* = \frac{V_n + V_{\text{ст}}}{2W}, \quad (1)$$

где V_n — объем притока, $V_{\text{ст}}$ — объем стока и W — средний объем водоема за расчетный период.

Принималось, что $V_{\text{ст}} = V_n \pm \Delta W$. По результатам расчетов наибольший водообмен отмечался в апреле, мае и июне ($K_* = 1,19, 0,14$ и $0,08$ соответственно), в остальные месяцы K_* изменялся от $0,05$ до $0,12$. Годовой K_* составил $1,9$, т. е. в год 90%-ной обеспеченности объем воды в озере сменяется около двух раз в год, а в многоводные годы еще чаще.

2.3. Термический режим

Вскрытие озера происходит в конце апреля или первых числах мая. Самое раннее очищение от льда за период с 1930 по 1986 гг. наблюдалось 7 апреля 1975 г., а самое позднее — 9 мая 1941 и 1945 гг. Средняя дата очищения от льда 28 апреля. Наиболее ранний сплошной ледостав был зарегистрирован 13 октября 1976 г., самый поздний — 5 декабря 1938 г. В среднем ледостав наступает 6 ноября. Продолжительность безледного периода колеблется в пределах от 154 до 217 дней и в среднем равна 186 дням. Толщина льда в январе может варьировать от 16 до 60 см, в марте — от 47 до 82 см.

По данным берегового поста ГМС в г. Ростове средняя многолетняя температура воды (1977—1986) в озере в первой и третьей декаде мая составляет $7,8$ и $14,7$ °C, июня—августа — $16,4$ — $19,6$ °C и $19,6$ — $15,5$ °C, сентября—октября — $13,3$ — $5,9$ °C и $8,4$ — $2,6$ °C соответственно. В зимние месяцы температура воды у дна изменяется от $1,4$ до $3,9$ °C.

Декадные колебания температуры воды озера находятся в тесной зависимости от изменения температуры придонного слоя воздуха (рис. 1.9), а суточные, кроме того, могут определяться потерями тепла на испарение при ветровых воздействиях. Наибольшая средняя многолетняя температура отмечается во второй декаде июля ($20,9$ °C). Наиболее высокая температура ($30,5$ °C) по срочным данным наблюдалась 5—6 июля 1938 г. (Многолетние данные о режиме и ресурсах поверхностных вод суши, 1986).

По термоглубинной классификации озер В. Р. Хомского (1969) оз. Неро относится к термически мелководным: $\Delta t = t_n - t_z > 15^\circ$ (где t_n — температура придонного слоя в период термической стагнации, t_z — температура этого слоя зимой при наличии ледяного покрова).

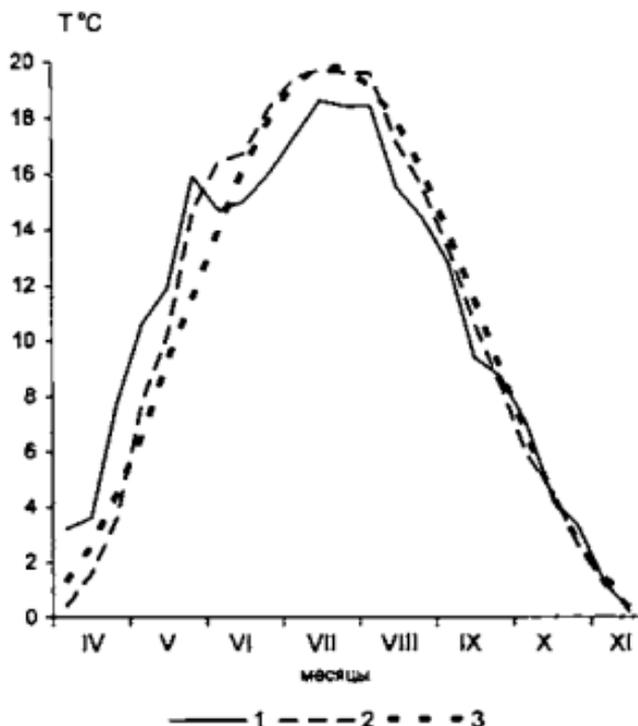


Рис. 1.9. Средние многолетние сезонные изменения температуры воздуха (1), фактической (2) и рассчитанной по уравнению (2) температуры воды (3)

Расслоение озера на устойчивые эпи- и гипolimнион летом невозможно из-за полного перемешивания водной толщи даже при ветрах средней силы. Кратковременная термическая стратификация иногда наблюдается в первой половине лета в штилевую погоду. Для зимних месяцев типична обратная термическая стратификация. Ввиду мелководности озера, распределение температуры воды по его акватории в безледный период относительно равномерное и, как правило, разность температур в отдельных участках не превышает 4°C (рис. 1.10). Зимой за счет теплоотдачи грунта температура в придонном слое довольно быстро достигает 3°C , а к концу марта в наиболее глубоких местах повышается до $4,4^{\circ}\text{C}$. Поскольку термические характеристики мелких озер определяются в основном количеством поступающей солнечной радиации,

зависящей от широты расположения водоема (George, 1989), среднепогодный сезонный ход температуры поверхности достаточно хорошо аппроксимируется синусоидальной кривой, рассчитанной по уравнению:

$$T_*(t) = A_0 + A_1(\sin T + \gamma_1), \quad (2)$$

где $T_*(t)$ — температура на каждый момент времени года, t ; A_0 — средняя за безледный период поверхностная температура; A_1 — половина амплитуды сезонных изменений температуры; γ_1 — фазовый угол для температуры (градусы широты).

Применительно к оз. Неро при $A_0 = 10,3^\circ$, $A_1 = 9,6^\circ$ и $\gamma_1 = 57^\circ 10'$, вычисленным за период 1977—1986 гг., опуская гомотермичность водной толщи, получена удовлетворительная аппроксимация сезонного хода температуры воды (рис. 1.9).



Рис. 1.10. Распределение температуры воды в оз. Неро в 1988 г.:
 а — 23—26 апреля, б — 8—9 мая, в — 8—11 июня; г — 26—30 июля; д — 8—10 сентября;
 е — 14—17 октября

Изменение температуры воды и объема озера в сезонном плане обуславливает и динамику теплозапаса водной массы водоема. Рассчитанный по уравнению $Q = W T_{cp}$ (W — объем воды озера и T_{cp} — средняя температура) наибольший теплозапас приходится на июнь—июль. Начиная с августа теплозапас постепенно уменьшается (табл. 1.8).

Таблица 1.8
Теплозапас водной массы озера Неро (10^{13} Дж)

Год	Апрель	Май	Июнь	Июль	Август	Сентябрь	Октябрь
1981—1986	1.2	6.8	8.4	8.9	7.1	3.9	1.9
1972	2.0	6.7	7.5	7.3	5.4	2.7	1.3
1992	3.4	7.1	7.2	7.0	7.1	5.0	3.8

2.4. Электропроводность и прозрачность воды

Электропроводность воды притоков озера имеет четко выраженный сезонный ход. Максимальные величины электропроводности наблюдаются в период осенне-зимней межени, минимальные — в период весеннего половодья. В зависимости от водности конкретного года и внутрigoдового распределения осадков величина ее может существенно изменяться (табл. 1.9).

Таблица 1.9
Электропроводность воды в притоках озера Неро

Год, число	р. Сара	р. Ишля	р. Векса
1987, 20.05	336	393	228
20.06	380	848	233
10.07	325	677	253
12.08	395	—	248
16.09	403	849	275
6.10	366	795	312
1988, 25.03	423	747	544
8.05	207	585	251
10.06	412	766	259
15.10	407	—	—
1989, 20.03	276	504	522
15.05	376	718	281
15.09	383	871	240
30.10	321	749	374
1990, 17.08	339	604	270

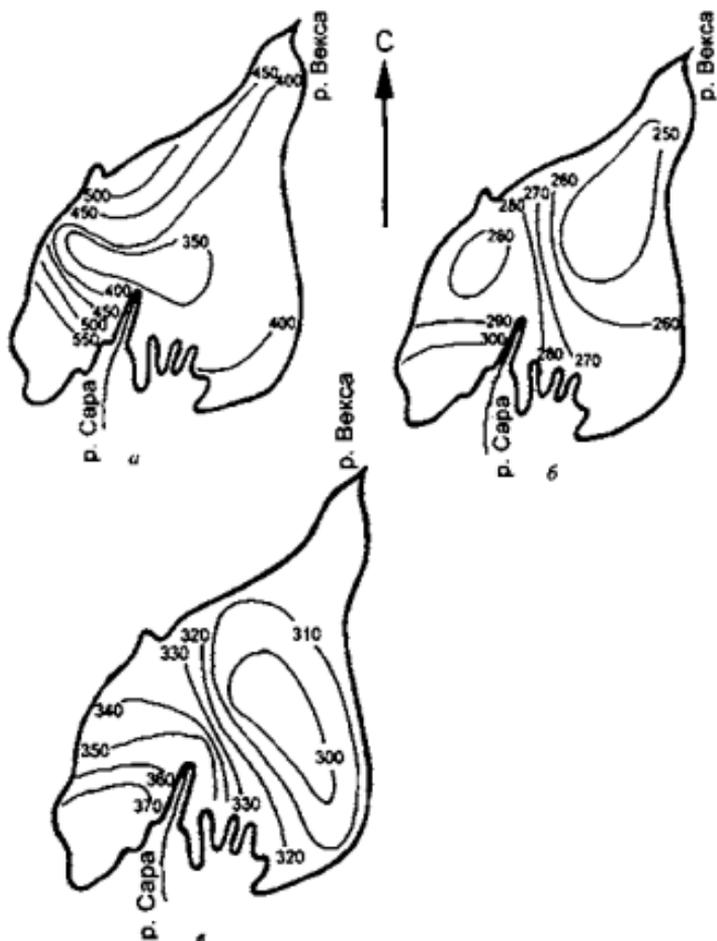


Рис. 1.11. Среднее многолетнее (1989—1990 гг.) распределение электропроводности воды в оз. Неро:

a — в марте; *b* — в мае—сентябре; *c* — в октябре

В связи с относительно интенсивным водообменом величина и характер распределения электропроводности воды по акватории озера определяются ее динамикой в основных притоках. Наибольшие различия наблюдаются в марте и могут достигать 260 мкСм/см. После очищения

водоема от льда (апрель) и до начала осени (сентябрь) различия в электропроводности уменьшаются (рис. 1.11); в это же время в центральной части озера они достигают наименьших значений $\sim 200\text{—}250$ мкСм/см, а в среднем не превышают 300 мкСм/см. В октябре за счет поступления более минерализованных вод осенней межени из притоков электропроводность повышается до 300—350 мкСм/см. Наиболее высокие ее значения наблюдаются вдоль западного берега озера в конце ледостава, поскольку туда поступают более минерализованные воды второй по величине реки — Ишпи. Повышенные значения электропроводности в юго-западной и южной частях озера обусловлены сохранением там в течение летне-осеннего периода зимних вод с повышенной минерализацией в виду уменьшения водообмена этой части озера за счет обилия высшей водной растительности.

Прозрачность воды в весенние и летние месяцы в большинстве случаев колеблется в пределах 30—50 см видности белого диска. При длительной штилевой погоде она увеличивается до 80—100 см. Зимой при отсутствии взмучивания на наиболее глубоких участках прозрачность может достигать 130 см.

2.5. Грунтовый комплекс

Наиболее полные к настоящему времени сведения о грунтах оз. Неро представлены в трудах лаборатории сапропелевых отложений Института леса АН СССР (1956). На основе химического, биологического, гидрогеологического и минералогического анализов данных семи бурений озерного дна, выполненных в 1950—1952 гг., выделены 11 слоев донных отложений (табл. 1.10). В центральной части озера в среднем до глубины 6 м залегают различные сапропели, сменяющиеся ниже глинистыми осадками (Кордз, 1956). В целом по озеру толщина илистых отложений существенно варьирует. Наибольшей мощности (до 7,8 м) иловые отложения достигают в южной части озера у восточного берега и севернее устья р. Сары, а наименьшей (1,8—3,5 м) в центральной части водоема (рис. 1.12).

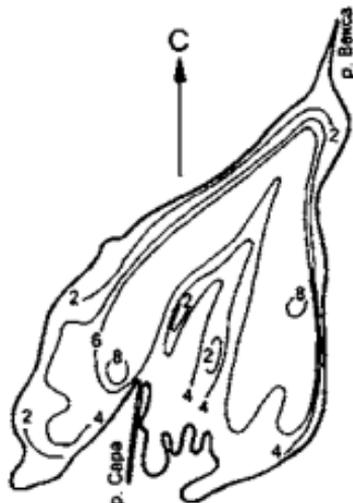


Рис. 1.12. Мощность илистых отложений (м) в оз. Неро (по Смирнову, 1956)

Характеристика донных отложений центральной части оз. Неро
(по Н. В. Корда, 1956; Е. А. Виноградовой, 1956)

Слой	Глубина от поверхности отложений, м	Влажность, %	Процентное содержание фракций, мм			Типологическая характеристика	Группа	Возраст
			0.5—0.01	0.01—0.001	0.001			
I	0—0.25	91				темноцветный, глинистый, протококковый сапропель	обедневшие органические вещества в составе сапропеля	современный
II	0.5—1.0		55	22	13	темноцветный, глинистый, диатомовый сапропель		поздний голоцен
III	1.5—2.5	90	64	27	9	темноцветный, глинистый, шваннофельдно-протококковый сапропель		
IV	3—3.8	82	34	37	21	темноцветный, глинистый, известковистый, смешанно-водорослевый сапропель		средний голоцен
V	4.9—5.8	76				темноцветный, известковистый, шваннофельдно-протококковый сапропель		
VI	7.2	39	88	7	5	светлый, известковистый, смешанно-водорослевый алевроит	глинистые осадочные отложения	

Слой	Глубина от поверхности отложения, м	Влажность, %	Процентное содержание фракций, мм			Типологическая характеристика	Грунта	Возраст
			0,5—0,01	0,01—0,001	0,001			
VII	7,8—9,2	42	43	45	12	светлая, известково-песчаная глина с шифофемидитомскими и остатками животных	глинистые озерные отложения	ранний голоцен
VIII	9,55—10,0	32—14	38			темная песчаная глина с протококковыми, динтомеями и остатками животных		древний голоцен
IX	10,4—13,8	25—22	50	38	12	темная, слабоизвестковая, песчанистая глина с протококковыми и остатками животных		
X	14,3—15,1	33				темная, слабоизвестковистая глина с шифофемидитом, с хризолондами или с протококковыми и остатками животных	глинистые озерные отложения	древний голоцен
XI	15,8—19,05	23—21	25	63	12	темная озерная глина с протококковыми и остатками животных		

Прибрежные сапропели имеют незначительную толщину и уже на уровне 1,5 м они сменяются карбонизированными глинами и озерными известняками (табл. 1.11). Существенное изменение мощности сапропеля от прибрежья к центру водоема объясняется тем, что вносимые в озеро более крупные минеральные компоненты откладываются прежде всего у берегов, где формируются и известковистые отложения. Наиболее мелкие фракции минеральных осадков вместе с легким органическим детритом вносятся в центральную часть озера.

Таблица 1.11

**Характеристика прибрежных донных отложений оз. Неро
(по Корз, 1956)**

Слой	Глубина от поверхности отложений, м	Влажность, %	Типологическая характеристика	Группа
I	0—0,25	88	Темноцветный, глинистый, протококковый сапропель	обедненный органическим веществом сапропель
II	0,5—1	85—78	Темноцветный, глинистый, книзу карбонизированный, диатомово-протококковый сапропель	
III	1,5	76	Светлый, цианофциено-протококковый озерный известняк	озерные известняки
IV	2—3	72—52	Светлый, книзу темнеющий диатомовый озерный известняк	
V	3,5—3,7		Темная, карбонизированная, цианофциенная озерная глина	

Достаточно отчетливо выявленная биостратификация отложений озера (табл. 1.10, 1.11) позволила оттенить на качественном уровне некоторые черты его палеолимнологии. Так, Л. С. Козловской (1956) показано, что озеро прошло в своем развитии две стадии обмеления (кроме современной) и три стадии обводнения. Периоды обмеления соответствуют отложениям с глубинами 15,8—15,1 м и 8,5—7,8 м (время березово-сосновых лесов). Периоды обводнения отражены в фауне отложений с глубины 14,6—10,3 м (нижний максимум ели), с глубины 4,9—3,8 м (максимум широколиственных пород) и в верхних оливковых сапропелях на глубине ~ 1,5 м (верхний максимум ели). Такие резкие смены гидрологического режима и связанные с ними колебания уровня озера могли

быть вызваны изменением климатических условий в период от древнего до позднего голоцена. Не исключено и другое предположение (Новский, 1970), что смена обводнений и обмелений обусловлена колебательным характером тектонических движений.

Окончательные суждения о палеолимнологическом режиме озера (колебаниях уровня и площади водоема) может быть получено при комплексном современном анализе сейсмических, радиоуглеродных, магнитных, седиментационных, изотопных и палеонтологических данных донных отложений.

Глава 3

ГИДРОДИНАМИЧЕСКИЙ РЕЖИМ

Гидродинамические процессы в озере, в силу его мелководности, обуславливаются воздействием ветра на водную поверхность. Ветровое волнение и ветровые течения определяют обмен веществом и энергией в пределах водной массы водоема. Стоковые течения проявляются локально в пространстве и ограничены по времени. Они отмечаются при прохождении весеннего половодья (как правило до момента очищения озера ото льда), осенних паводков (перед началом ледостава) и при поступлении вод р. Вексы в озеро в случае превышения уровня воды в реке относительно уровня воды в озере (конец ледостава, июль).

В связи с отсутствием каких-либо сведений о режиме ветрового волнения и ветровых течений в оз. Неро, изучение особенностей их пространственной структуры основано на использовании различных расчетных методов.

3.1. Режим волнения

К основным динамическим параметрам, характеризующим степень воздействия волнения на дно озера, следует отнести максимальные донные скорости в волновом потоке, глубины начала размыва донных отложений определенной крупности и режимные энергетические показатели (суммарная энергия и ее равнодействующая).

В настоящее время для изучения распределения параметров ветровых волн (высоты, длины и периода) используются расчетные методы, изложенные в СНиП 2.06.04—82 (1983). Сложность применения этих методов заключается в одновременном использовании формул, номо-

грамм и графиков, что существенно снижает оперативность расчетов. Вместе с тем, для озер и водохранилищ приемлемо использовать и другие методы вычисления параметров ветрового волнения — В. Г. Андреева, А. П. Браславского (Богословский, 1960), Н. А. Лабзовского (1976). Среди указанных методов наиболее адекватным, на наш взгляд, является метод Н. А. Лабзовского, позволяющий рассчитать параметры волн как в глубоководной, так и в мелководной зонах водоемов.

Поскольку режимных наблюдений за волнением на оз. Неро не проводилось, нами апробировались два метода расчета ветрового волнения — СНиП (1983) и Н. А. Лабзовского (1976). Вычисления проводились для штормового юго-западного ветра (225° , $14,5$ м/с) по разрезу, пересекающему озеро от западного до восточного берега в направлении действия ветра. В результате было выявлено, что указанные методы позволяют рассчитать высоты ветровых волн с расхождением их средних значений ~ 2 см, не превышающим погрешность измерительных приборов, достигающую ~ 5 см (табл. 1.12). В связи с этим при дальнейших расчетах был выбран метод Н. А. Лабзовского, как наиболее удобный для программирования.

Таблица 1.12

Расчитанные высоты ветровых волн в оз. Неро

Глубина по разрезу, м	Расгон, м	Метод СНиП		Метод Н. А. Лабзовского	
		h, м	λ , м	h, м	λ , м
Подветренный берег	—	—	—	—	—
0.5	300	0.17	1.3	0.16	1.5
1.0	600	0.30	2.6	0.26	2.5
0.5	975	0.18	1.6	0.24	2.0
1.0	1275	0.34	3.5	0.33	3.0
1.7	1575	0.42	4.5	0.41	4.0
2.0	1950	0.51	6.2	0.46	4.5
2.0	2250	0.56	6.2	0.49	4.7
2.0	2625	0.56	6.2	0.51	4.9
2.2	2925	0.56	6.2	0.55	5.3
2.2	3300	0.58	6.2	0.57	5.5
2.0	3525	0.58	6.2	0.57	5.4
Средняя 2.0	3975	0.59	6.2	0.59	5.5
2.2	4275	0.60	6.2	0.62	5.9
2.2	4575	0.60	6.2	0.64	6.0
2.7	4875	0.64	6.9	0.69	6.7

Глубина по разрезу, м	Разгон, м	Метод СНИП		Метод И. А. Лавровского	
		$h, м$	$\lambda, м$	$h, м$	$\lambda, м$
3.0	5250	0.68	7.6	0.73	7.1
3.2	5550	0.73	7.6	0.76	7.5
3.5	5850	0.77	8.3	0.79	7.9
3.5	6225	0.77	8.3	0.81	8.0
3.2	6600	0.77	8.3	0.80	7.8
2.7	6900	0.68	7.6	0.78	7.4
2.0	7200	0.60	6.2	0.72	6.5
0.5	7500	0.30	2.0	0.53	4.0
Наветренный берег	—	—	—	—	—
Среднее		0.54	5.7	0.56	5.4

Максимальные орбитальные скорости у дна в соответствии с линейной теорией Стокса вычислялись по формуле (Алексеевский, Михинов, 1991):

$$U_m = h_s \pi / TshkH, \quad (3)$$

где $k = 2\pi/\lambda$; h_s , T — соответственно высота и период поверхностных волн.

В результате проведенных расчетов выявлено, что в оз. Неро при преобладающих в летне-осеннем сезоне северном и юго-западном ветре скоростью 14,5 м/с и разгоне до 7 км высота волн 1% обеспеченности может составлять 0,7—0,8 м (рис. 1.13 а, б). При скорости ветра 50% обеспеченности (4 м/с) высота волны, как правило, не превышает 20 см. Длина волны на более глубоких участках достигает 8—10 м, а в прибрежной зоне с глубинами 1—1,5 м — 4—6 м. Максимальные донные скорости в штормовых условиях составляют 10—20, а в отдельных случаях могут увеличиваться до 70 см/с.

Рассмотренные выше параметры характеризуют динамические процессы без учета времени их действия. Вследствие изменчивости волнения, связанной с непостоянством ветрового воздействия, для его описания нужен показатель, учитывающий как мощность, так и частоту явления. Такими свойствами обладают энергетические методы определения волнового режима. Энергетический метод позволяет оценить общую энергию волновых движений в каком-либо районе водоема независимо от их направления.

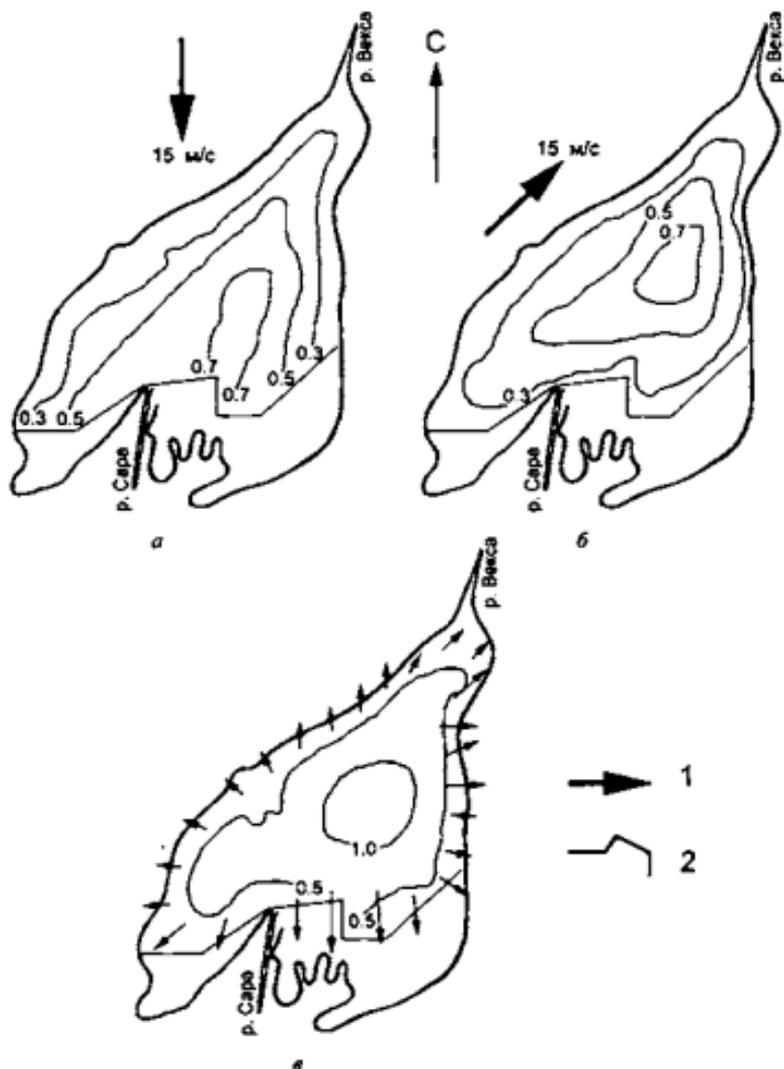


Рис. 1.13. Распределение высот волн (м) при штормовом ветре северного (а), юго-западного (б) направления, суммарной энергии волн и ее равнодействующей (МДж/м) (в):

1 — направление ветра, 2 — принятая при расчетах граница распространения макрорифтов

Расчет энергетических характеристик производится по формуле (Роль волнения, 1990):

$$E = \sum_{i=1}^m e_i, \quad e_i = \int_0^T \rho g h_i^2 b n \lambda / 8 T dt, \quad i = 1, \dots, m. \quad (4)$$

Распределение суммарной волновой энергии по акватории озера достаточно однородно. Величины ее достигают 0,5—1 МДж/м, что соответствует защищенным мелководьям Рыбинского водохранилища. Равнодействующая волновой энергии направлена перпендикулярно к береговой линии и свидетельствует о преобладании процессов аккумуляции над абразией. Наибольшему воздействию волн подвержены восточная и юго-восточная части озера (рис. 1.13 в).

3.2. Структура течений

3.2.1. Типы циркуляции вод в мелких озерах. Согласно современным представлениям, в мелких озерах может формироваться ветровая циркуляция воды следующих типов.

1. В озере постоянной глубины, в его центральной части перенос воды направлен по ветру. Вдоль берегов формируются компенсационные градиентные течения. За счет трения на боковых границах вдольбереговое течение характеризуется пониженной скоростью по сравнению с дрейфовым потоком воды. Этот тип циркуляции формируется только в горизонтальной плоскости. Дрейфовое и компенсационные течения однонаправлены по глубине (рис. 1.14 а) (Livingstone, 1954).

2. В озере переменной глубины при средних по скорости ветрах в центральной части водосма формируется противоположный направлению ветра компенсационный поток. Вдоль берегов развивается дрейфовое течение. Скорость компенсационного течения меньше скорости дрейфового течения. Одной из причин увеличения скорости дрейфового течения является разрушение на пологом береговом склоне ветровых волн, вносящих вклад в формирование вдольберегового переноса воды. Дрейфовое и компенсационное течения однонаправлены по глубине. Циркуляция воды развивается в горизонтальном плане (рис. 1.14 б) (Verhagen, 1994).

3. В озере переменной глубины горизонтальная циркуляция представляет собой серию разнонаправленных круговоротов и аналогична рассмотренной выше циркуляции воды второго типа. По вертикали течение двухслойное. Смена направления течения на противоположное (компенсационное) наблюдается в глубокой части озера на горизонте, равном $\sim 1/3H$. В мелководной зоне водоема до глубины 1—1,5 м дрейфовое течение в слое от поверхности до дна направлено по ветру,

в глубоководной верхней слой перемещается по ветру или с отклонением от него вправо на угол $60-80^\circ$, а в средних и нижних слоях формируется компенсационное течение. Этот тип циркуляции выявлен в результате математического моделирования течений на различных мелководных озерах (рис. 1.14 а) (Ряжкин и др., 1984; Фомичев, Литвинов, 1979; Yokosi, Tomidokoro, 1979).

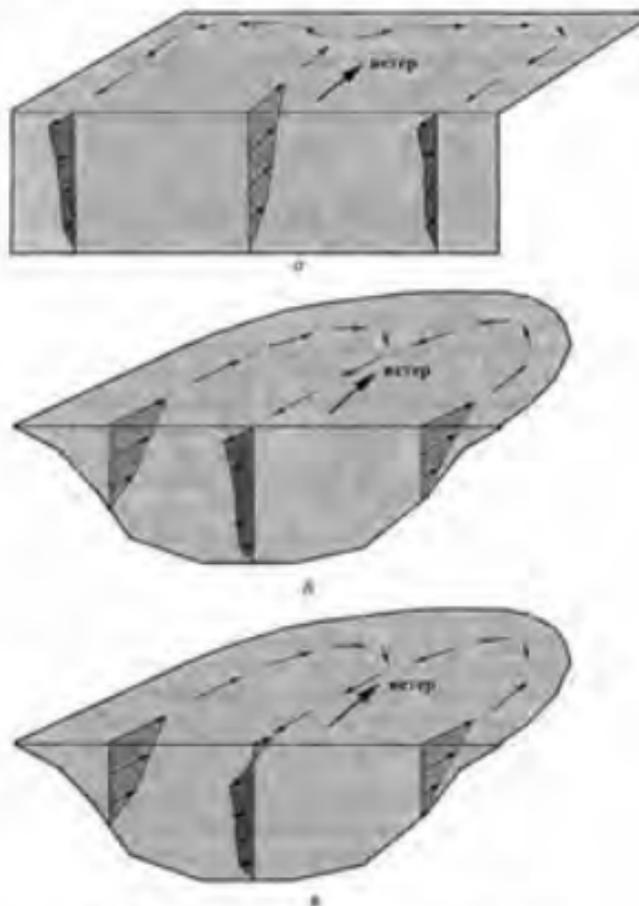


Рис. 1.14. Типы циркуляции воды в мелководных озерах:
 а — 1-й тип, б — 2-й тип, в — 3-й тип

3.2.2. Натурные наблюдения над течениями. В связи с отсутствием информации о структуре течений в оз. Неро лабораторией гидрологии ИБВВ РАН в 1991 г. были выполнены измерения скорости и направления ветрового переноса воды в различных частях водоема. Измерения проводились с моторной лодки привязными поплавками с крестообразными демферами, расположенными на горизонтах 0,3, 1, 2 и 3 м.

В результате проведенных измерений было выявлено, что при юго-западном ветре скоростью 5,5 м/с (близкой к скорости ветра 50% обеспеченности) перенос воды у западного и восточного берегов происходил в направлении ветра и характеризовался однонаправленностью от поверхности до дна. В глубокой центральной части сформировалось компенсационное течение против ветра, также отличающееся одинаковым направлением по глубине (рис. 1.15 а). Скорость дрейфового и компенсационного течений составила 3,5—5,5 см/с. Во время второй съемки (первая декада сентября) удалось зафиксировать скорость и направление течения только на прибрежных станциях. При поперечном к продольной оси озера западном ветре скоростью 6,5 м/с течение также отличалось неизменностью направления по глубине и распространялось вдоль западного берега в южном, а вдоль восточного берега — в северном направлении (рис. 1.15 б). Скорости течения изменялись от 2,3 до 10 см/с в поверхностном и от 1,4 до 9,6 см/с — в придонном слое.

Несмотря на ограниченность проведенных исследований, структура течений, зафиксированная во время первой съемки в июле 1991 г., подтвердила возможность формирования в оз. Неро циркуляции воды рассмотренного выше второго типа. Разнонаправленные плановые

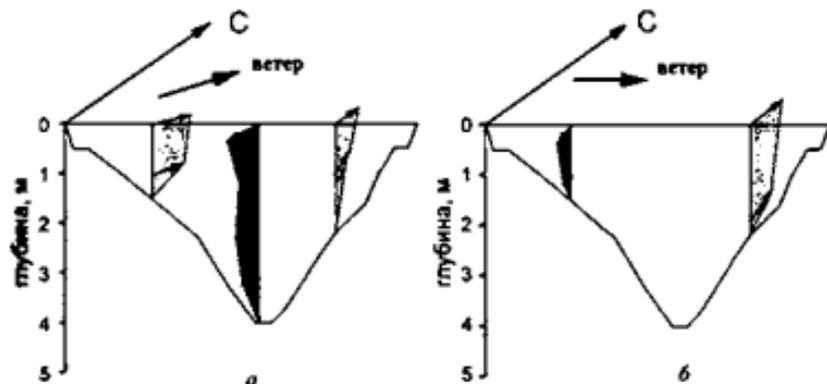


Рис. 1.15. Структура течений на поперечном разрезе:
а — при юго-западном ветре скоростью 5,5 м/с; б — при западном ветре 6,5 м/с

вдольбереговые потоки, выявленные в сентябре 1991 г., не позволяют на настоящий момент сделать вывод о возможности формирования при определенных метеорологических условиях какого-либо другого типа переноса воды в озере, например, единого круговорота циклонического или антициклонического характера.

3.2.3. Математическое моделирование циркуляции воды. Практически исчерпывающую информацию об особенностях структуры течений в мелких озерах могут дать результаты математического моделирования циркуляции воды с применением различных гидродинамических моделей. Малые глубины и отсутствие ярко выраженной плотностной стратификации позволяют использовать модели, основанные на уравнениях теории мелкой воды (Афанасьев, Рянжин, 1986; Рянжин и др., 1984; Ramming, 1979; Yokosi, Tomidokoro, 1979). Такие модели дают подробное представление о средних потоках и колебаниях уровня, но не позволяют выявить вертикальную структуру поля течений. Поэтому в последнем случае полезной может оказаться модель течений мелкого водоема, предложенная А. И. Фельзенбаумом (1960) и основанная на решении стационарных уравнений движения жидкости. При этом полагается, что движение воды обуславливается тангенциальным напряжением ветра над водоемом с учетом влияния рельефа дна, притока в водоем и стока из него. Наклонами свободной поверхности, вызванными стоками и нагонами вод в результате неравномерности ветра с учетом влияния берегов и стока рек, трением о дно и силой Кориолиса пренебрегается. На поверхности водоема тангенциальное напряжение ветра уравновешивается турбулентным трением в воде: $\partial u / \partial z = T_x$, $\partial v / \partial z = T_y$. Давление равно атмосферному давлению: $p = p_0$. На дне водоема движение отсутствует: $u = v = w = 0$.

Компоненты скорости течения u и v вдоль осей x и y соответственно и понижение уровня ζ определяются по распределению функции полных потоков ψ :

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{A}{H^3} \frac{\partial \psi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{A}{H^3} \frac{\partial \psi}{\partial y} \right) &= \frac{1}{2} \text{rot}_z \frac{T}{H}, \\ \frac{\partial \zeta}{\partial x} &= -\frac{3T_x}{2gH\rho} - \frac{3A}{gH^3\rho} \frac{\partial \psi}{\partial y}, \\ \frac{\partial \zeta}{\partial y} &= -\frac{3T_y}{2gH\rho} + \frac{3A}{gH^3\rho} \frac{\partial \psi}{\partial x}, \\ u &= \frac{T_x(H-Z)}{\lambda} + \frac{g\rho}{\lambda} \left(\frac{H^2-Z^2}{2} \right) \frac{\partial \zeta}{\partial x}, \end{aligned} \quad (5)$$

$$v = \frac{T_x(H-Z)}{A} + \frac{g\rho}{A} \left(\frac{H^2-Z^2}{2} \right) \frac{\partial \zeta}{\partial y},$$

где \vec{T} — вектор тангенциального напряжения ветра, а $T_x = (W^2 \cos \alpha_w) \gamma$ и $T_y = (W^2 \sin \alpha_w) \gamma$ — его составляющие по осям x и y ; γ — постоянная $3,25 \cdot 10^{-4} \text{ г/см}^3$; α_w — направление ветра; $A = 0,54 \cdot 10^{-4} WH$ — коэффициент вертикального турбулентного обмена зависит от скорости ветра и глубины водоема. Следует отметить, что на береговой линии задается сама функция $\psi = 0$, на жидкой границе — $\partial \psi / \partial n = 0$.

В результате решения системы уравнений (5) производится расчет скоростей и направлений течения при конкретных гидрометеорологических условиях на отдельных горизонтах в узлах регулярной сеточной области с шагом $\Delta x = \Delta y = l$ без учета островов. В случае необходимости получения характеристик осредненного от поверхности до дна (интегрального) переноса воды составляющие u и v осредняются по каждой вертикали:

$$\bar{u} = \frac{1}{H} \int_{z=0}^H u dz, \quad \bar{v} = \frac{1}{H} \int_{z=0}^H v dz. \quad (6)$$

Если параметры u , v и ζ определены, то из уравнения неразрывности в дифференциальной форме в каждой узловой точке расчетной сетки легко определить вертикальную составляющую скорости течения w :

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0, \quad (7)$$

$$w = - \int_z^H \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right) dz$$

или в разностном виде:

$$w = \frac{H-Z}{2l} \sum_i^n (u_i - u_{i+1} + v_i - v_{i+1}), \quad (8)$$

где суммирование ведется по горизонтам:

$$\frac{Z_0 + Z_1}{2}, \dots, \frac{Z_{n-1} + Z_n}{2},$$

а компоненты вектора скорости вычисляются в четырех соседних узлах сеточной области.

В процессе расчетов по описанной выше модели в печатной и электронной формах выводились следующие параметры течений: функция

полных потоков ψ ($\text{м}^3/\text{с}$), скорость и направление течения ($\text{см}/\text{с}$, градусы), вертикальная составляющая вектора скорости ($\text{см}/\text{с}$) на заданных горизонтах. Кроме того, расчеты по модели позволяли получить дополнительную информацию о динамических характеристиках водной среды: выделить зоны минимальных и максимальных скоростей интегрального переноса воды и определить горизонтальный размер круговоротов как удвоенное расстояние от центра до наибольшей скорости на периферии вихря согласно (Каменкович и др., 1982); рассчитать скорость и направление переноса воды в отдельных слоях водной толщи; рассчитать параметры течений без учета какого-либо одного (или нескольких) внешних факторов — ветра, притока и рельефа дна. В последнем случае исключение из граничных условий воздействия ветра позволяет вычислить характеристики потока в условиях чисто стоковых течений.

Таким образом, применение данной модели позволяет:

— выявить роль отдельных факторов в формировании циркуляции водных масс;

— исследовать пространственную структуру циркуляции воды и ее изменения при фиксированных и меняющихся по пространству внешних факторах;

— оценить роль циркуляции в распределении и перераспределении отдельных гидрофизических характеристик водной среды и отдельных видов гидробионтов.

Следует отметить, что существенным вопросом моделирования циркуляции воды в мелких озерах является учет при расчетах зарослей высшей водной растительности, покрывающей отдельные участки акватории водоемов. Разными исследователями эта задача решается неоднозначно. Так, для озера Сестрорецкий Разлив локальные участки зарослей макрофитов (тростник, камыш и др.) аппроксимировались уменьшением глубины места до 0,1 м (при средней глубине озера 2,2 м, максимальной — 4,5 м) и равенством $\bar{T} = 0$ (Рянжин и др., 1984). Вместе с тем, при восстановлении средних по глубине скоростей течения по рассчитанным функциям полных потоков первые из-за малости глубин достигали нерезко больших значений. Поэтому в дальнейшем при расчетах полей примесей в данном озере полученные для макрофитовых зарослей значения скоростей предварительно обращались в ноль, т. е. перенос примеси обуславливался только за счет диффузии (Афанасьев, Рянжин, 1986). Практически это означало исключение при моделировании циркуляции воды участков с макрофитовыми зарослями.

В другом случае (оз. Нейзидлер-Зе с глубиной 1,5—2 м) предполагалось, что скорость ветра над участками зарослей можно уменьшить в 4 раза по сравнению с его скоростью над свободной от макрофитов акваторией (Ramming, 1979).

Наиболее адекватным, на наш взгляд, подходом к расчету течений на заросших участках озер может выступать учет коэффициента шероховатости в зоне зарослей. Однако, определение значения коэффициента шероховатости сопряжено со значительными трудностями и требует постановки специальных полевых экспериментов по измерению скорости потока воды в зарослях. Одним из таких методов определения скорости течения служит метод растворения гипсовых блоков (Распопов, Доценко, 1987; Тимченко, 1990).

Таким образом, отсутствие надежных методов учета высшей водной растительности при моделировании гидродинамических процессов, сложность постановки эксперимента по измерению течения в зарослях и ограничения используемой авторами модели течений привели к необходимости исключения при расчетах циркуляции воды в оз. Неро его зарослей южной части (рис. 1.13).

Расчетная область озера аппроксимировалась квадратной сеткой с шагом 225 м. Матрица глубин строилась на основе батиметрической карты путем разности в каждый узел сеточной области глубин, соответствующих отметке уровня 93,75 м БС. Расчеты проводились для преобладающего ветра северных румбов (360°), характерного в мае—августе и ветра южных румбов (225°), преобладающего в сентябре—октябре скоростью 4 и 15 м/с (50 и 1% обеспеченности соответственно). Приток в водоем задавался равным стоку из него и в годы 50% обеспеченности принимался равным $5 \text{ м}^3/\text{с}$ по р. Саре и р. Вексе. Для верификации модели дополнительно рассчитывались варианты течений при ветрах, наблюдаемых в период проведения съемок.

Проведенная верификация модели показала, что наилучшее совпадение измеренных и рассчитанных параметров течений было достигнуто при условиях, соответствующих июльской съемке (ветер 225° , 5,5 м/с). Минимальное расхождение модельных и измеренных скоростей плановых течений отмечалось на станциях в центральной части и у восточного берега озера. Различия в направлениях течения как плановых, так и на отдельных горизонтах изменялись от 0 до 60° за исключением поверхностного слоя на центральной станции. Здесь расхождение модельного и фактического направления течения достигало 100° . Наихудшее совпадение рассчитанных и измеренных скоростей и направлений течения было отмечено для условий сентябрьской съемки (ветер 270° , 6,5 м/с). В последнем случае расхождение по скорости как плановых течений, так и течения на отдельных горизонтах составило от 1,5 до 6,5 раз, а по направлению— 48 — 180° (табл. 1.13). Можно предположить, что такие существенные расхождения модельных и фактических параметров течений были обусловлены их нестационарностью, т. е. во время проведения съемки течением еще не достигло установившегося состояния.

Измеренные и рассчитанные значения скорости
и направления течения в северной части оз. Неро в 1991 г.

Район измерений, Горизонт, м	Ветер 225°, 5,5 м/с				Ветер 270°, 6,5 м/с				
	α_n	α_p	v_n	v_p	α_n	α_p	v_n	v_p	
У западного берега 0	25	39	3.5	15.1	160	70	2.3	10.0	
	1	35	34	3.7	1.6	150	332	1.4	2.8
От поверхности до дна	30	37	3.6	8.0	155	52	1.8	4.5	
Центральная часть 0	205	106	5.0	1.8	—	—	—	—	
	1	220	207	3.8	4.6	—	—	—	—
	2	215	215	5.0	6.3	—	—	—	—
	3	200	217	5.0	4.6	—	—	—	—
От поверхности до дна	210	207	4.7	3.8	—	—	—	—	
У восточного берега 0	10	16	5.5	9.4	355	78	10.0	6.4	
	1	355	295	4.8	3.2	—	—	—	—
	2	—	—	—	—	350	280	9.6	2.8
От поверхности до дна	2	360	5.2	5.1	352	40	9.8	1.5	

Примечание: α_n , α_p , v_n , v_p — соответственно измеренные и рассчитанные направления (градусы) и скорости (см/с) течения.

В целом, несмотря на ограниченность материалов натуральных наблюдений над течениями озера и, следовательно, данных для верификации модели, следует допустить, что последняя удовлетворительно описывает плановую структуру циркуляции воды указанных выше 2-го и 3-го типов и в отдельных случаях может быть пригодна для изучения вертикальной структуры течений.

Согласно расчетам в мае—августе совместное действие ветра, рельефа дна и стока приводит к формированию интегральной циркуляции воды, состоящей из двух круговоротов. При ветрах северной четверти у западного берега формируется циклонический круговорот воды, у восточного — антициклонический. В случае действия ветров южных румбов положение круговоротов практически не изменяется, но вместе с тем происходит смена направления переноса воды на противоположный (рис. 1.16). В поверхностном слое озера до глубины 0,5 м преобладает перенос воды по ветру, в слое 0,5—1,0 м отмечается смена направления течения, глубже 1,5 м большую часть акватории озера охватывает перенос воды против ветра (рис. 1.17).

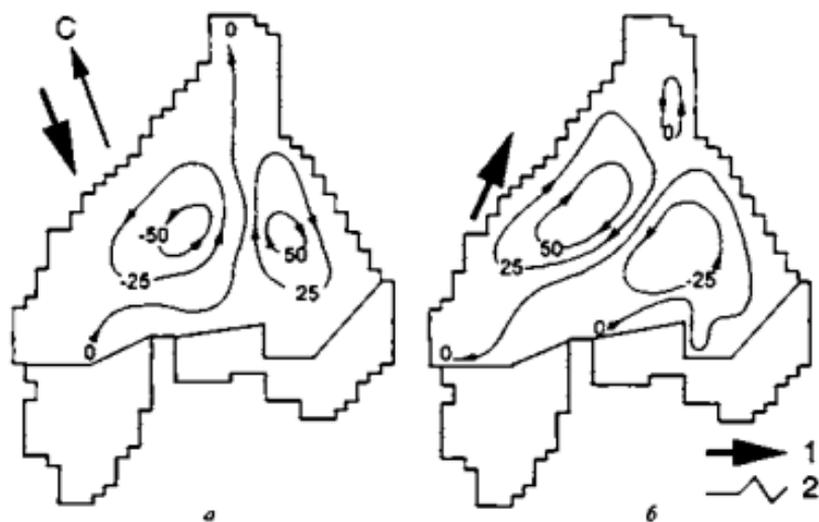


Рис. 1.16. Схемы интегральной циркуляции воды:

a — в августе—сентябре, *b* — в сентябре—октябре; 1 — направление ветра, 2 — граница распространения макрофитов

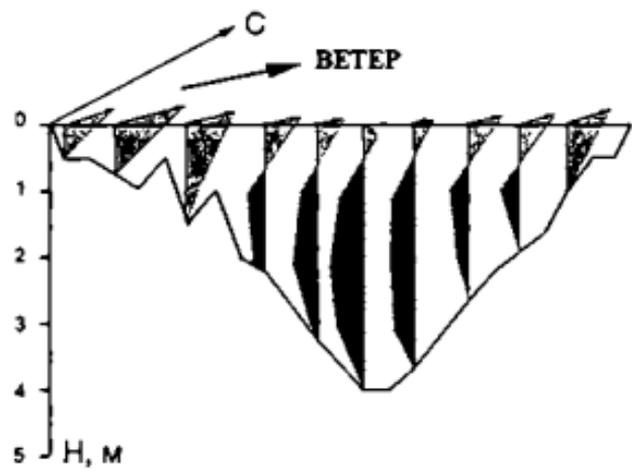


Рис. 1.17. Структура течений на поперечном разрезе оз. Неро при юго-западном ветре

Скорости течения в поверхностном слое изменяются от 2,4 до 9,5 см/с, в слое 0,5—1,0 м — от 1,8 до 5,7 см/с, глубже 1,5 м — от 1,0 до 5,0 см/с. Минимальные скорости отмечаются на горизонтах смены направления течения в зонах круговоротов (0,1—0,3 см/с), а максимальные — в зонах вдольберегового переноса воды (15—25 см/с). Средние по горизонтам характеристики скорости течения в период открытой воды приведены в таблице 1.14.

Таблица 1.14

Характеристики скорости течения (см/с) в оз. Неро

Глубина, м	Май—август			Сентябрь—октябрь		
	средняя	минимальная	максимальная	средняя	минимальная	максимальная
0	8.5	0.9	24	9	0.5	25
0.5	2.7	0.02	7	2.9	0.1	6.8
1	2.7	0.2	5.4	2.7	0.1	5.4
1.5	2.8	0.3	6.1	2.9	0.1	6.4
2	2.8	0.5	6.4	2.8	0.4	6.8
2.5	3.3	0.8	6	3.5	0.8	6.3
3	2.8	1.0	4.8	2.9	1	5.1
3.5	1.8	0.6	2.8	1.9	0.7	2.9

При оценке вклада основных факторов в формирование циркуляции воды, которая проводилась, согласно предложенной ранее методике (Поддубный и др., 1994), последовательным исключением из расчета каждого из них выявлено, что в мае—октябре при 50% обеспеченности величины стока основную роль играют рельеф дна (67%) и ветер (33%). В период половодья при значениях расходов воды по главным притокам, близких к 5% обеспеченности, в формировании циркуляции воды роль стока может составлять до 56%, а роль рельефа дна и ветра примерно одинакова — 25 и 19% соответственно.

3.2.4. Воздействие волн и течений на дно озера. Мелководность оз. Неро позволяет сопоставить его с отдельными участками мелководий верхневолжских водохранилищ. Ранее (Поддубный, Бычкова, 1998) для мелководной зоны водохранилищ был разработан метод выделения в ее пределах областей преобладающего воздействия на дно ветровых волн и течений, позволяющий с одной стороны пространственно ограничить доминирующее проявление того или иного типа движения воды, а с другой — определить участки эрозии дна, вызванной соответственно волнами или течениями.

Суть метода заключается в следующем. Метод основан на рассмотрении критических тангенциальных донных напряжений с использованием понятия критической динамической скорости, соответствующей началу движения донных наносов (Алексеевский, Михинов, 1991). Отношения фактических тангенциальных напряжений волновых потоков и ветровых течений на дно мелководий к критическому тангенциальному напряжению служат критерием преобладающего проклевания указанных видов движения воды.

Вычислительная процедура включает следующие этапы.

1. Расчет критических тангенциальных напряжений при конкретном типе донных отложений:

$$\theta_{*,p} = U_{*,p}^2 / gd(S-1) \quad (9)$$

$$\theta_{*,p} = fctD, \text{ (кривая Шильдса)} \quad (10)$$

$$D = d [g(\rho_m - 1)/v^2]^{1/3}, \quad (11)$$

где g — ускорение свободного падения; d — средний диаметр частиц донного грунта; $\rho_m = \rho_s/\rho$ — относительная плотность донного грунта; ρ_s и ρ — соответственно плотность грунта и воды; v — коэффициент молекулярной кинематической вязкости.

2. Вычисление максимальных значений удельных тангенциальных напряжений на дне волнового потока:

$$U_{*m}^2 = fU_m^2/2 \quad (12)$$

$$f = \exp[5,213(K_s/a_b)^{0,194} - 5,977] \quad \text{при } K_s/a_b < 0,63$$

$$f = 0,3 \quad \text{при } K_s/a_b \geq 0,63$$

$$a_b = U_m/\omega, \quad \omega = 2\pi/T, \quad K_s = 2,5d$$

f — зависимость Нильсена; ω — угловая частота поверхностных волн; K_s — параметр шероховатости.

3. Вычисление максимальных тангенциальных напряжений на дне ветрового течения:

$$U_*^2 = V_*^2/[2,5 \ln(4H/d+1)]^2, \quad (13)$$

где V_* — осредненная по глубине скорость ветрового течения.

4. Вычисление отношений максимальных тангенциальных донных напряжений в волновом потоке и ветровых течениях к критическому тангенциальному напряжению:

$$N_1 = U_{*m}^2 / U_{*cp}^2; \quad N_2 = U_{*v}^2 / U_{*cp}^2. \quad (14)$$

При величине отношений больше 1 происходит увлечение донных наносов тем или иным видом движения воды.

5. Вычисление отношений максимальных тангенциальных донных напряжений в волновом потоке и ветровых течениях к суммарному напряжению по всем видам движения воды:

$$M_1 = U_{*m}^2 / \Sigma; \quad M_2 = U_{*v}^2 / \Sigma; \quad (15)$$

$$\Sigma = U_{*m}^2 + U_{*v}^2.$$

Из-за отсутствия натурной и модельной информации о степени воздействия ветрового волнения и ветровых течений на дно мелководной зоны, преобладающее влияние этих гидродинамических факторов условно определяется по их относительному вкладу, превышающему 50% (значения отношений более 0,5).

6. Построение изолиний значений отношений M_1, M_2 , сопоставление полученных схем распределения значений отношений и выделение областей преобладающего влияния ветрового волнения, ветровых и стоковых течений по критерию $M_1 > 0,5, M_2 > 0,5$.

Расчеты областей влияния ветрового волнения и ветровых течений при преобладающих в безледном сезоне метеорологических условиях показали, что в случае скорости ветра 50% обеспеченности (4 м/с) большую часть озера у подветренного берега и в центре водоема занимает ветровое течение. Волнение оказывает преобладающее влияние на дно у наветренного берега и на отдельных участках у подветренного берега, где глубины составляют 0,5—1 м (рис. 1.18). Эрозии дна волнами и течениями не происходит. При ветрах, достигающих скорости 15 м/с, основное воздействие на бенталь озера оказывают ветровые волны. Все дно водоема подвержено эрозии, за исключением глубоководной центральной зоны и локальных участков у подветренного берега. Следует отметить, что взмучивание и перераспределение донных осадков начинается при значениях максимальных донных орбитальных скоростей в волнах 10—11 см/с. Ветровое течение оказывает влияние на бенталь озера только при юго-западном ветре на очень небольших участках с подветренной стороны у границы зарослей высшей водной растительности (рис. 1.18 б).

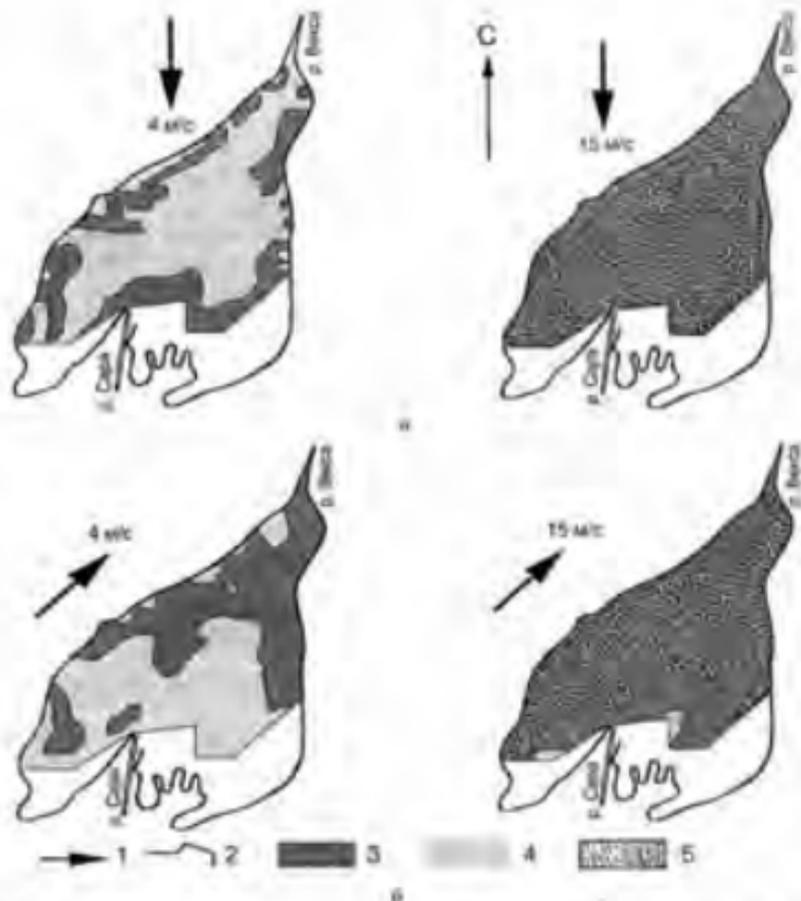


Рис. 1.18. Схемы распространения областей преобладающего воздействия на дно озера волн и течений:

а — при северном ветре; б — при юго-западном ветре; 1 — направление ветра, 2 — граница распространения макрофитов, 3 — волны, 4 — течения, 5 — зона дна.

Таким образом, почвенно-климатические условия на водосборе озера, особенности гидрологического режима, обусловленные морфологическим строением его котловины, интенсивностью водообмена и гидродинамическими процессами во многом определяют характеристики качества воды в озере и условия функционирования его экосистемы.

ЧАСТЬ II

ГИДРОХИМИЯ

При изучении гидрохимического режима озера Неро помимо обычных трудностей, с которыми сталкиваются исследователи водных экосистем, приходится считаться со многими дополнительными факторами естественного и искусственного характера, оказывающими существенное влияние на качество его воды. Из них отметим главные:

1. В отдельные периоды (половодье, продолжительные паводки, случающиеся иногда по несколько раз за год) река Векса, обычно текущая из озера, в результате подпора реками Которосль и Устье меняет свое направление движения и в значительных количествах (объемы не установлены) поставляет свои воды обратно в озеро.

2. На р. Вексе построена регулирующая сток плотина с неопределенным графиком работы, которая неоднократно обновлялась и переносилась с места на место (последний раз в 1988 г.).

3. В озере в заметных масштабах происходит садка солей, главным образом карбонатов кальция (процесс «биогенного декальцинирования»).

4. Высокая изменчивость и неоднородность ионного состава в различных частях акватории, связанная с большими различиями химического состава вод отдельных притоков, которые дренируют почвы разной степени солонцеватости.

5. Обильное зарастание озера высшей водной растительностью, создающей обособленные участки.

6. Значительные вариации в общем количестве растворенных минеральных компонентов и химическом составе грунтовых вод, обусловленные различной степенью влияния верховодки и глубоких (пластовых) вод, формирующихся среди коренных пород.

Кроме того за длительное время исследований оз. Неро использовались различные методы химического анализа состава вод и грунтов. Некоторые из них, такие как прямое определение ионов аммония по реакции с реактивом Несслера и железа с помощью роданида, не выдержали испытания временем и результаты, полученные с их помощью, во многих случаях должны рассматриваться как артефакты. Другие подверглись существенным модификациям, а по многим компонентам вообще не имелось никаких данных. Поскольку методики анализов имеют основополагающее значение для получения правильных результатов и, следовательно, соответствующих выводов, мы считаем целесообразным дать ссылки на используемые, а частью и разработанные в стенах ИБВВ РАН методы, которые прошли многолетнюю и многостороннюю апробацию в полевых и лабораторных условиях.

**МЕТОДЫ ХИМИЧЕСКОГО АНАЛИЗА
И ОТБОРА ПРОБ**

Основные компоненты солевого состава (кальций, магний, сульфаты, хлориды) определяли по методам, изложенным в руководстве по анализу природных вод (Алекси и др. 1973). Гидрокарбонаты (щелочность) определяли титрованием 0,05М НСl до рН=4,5 с использованием рН-метров, натрий и калий — методами пламенной фотометрии. Содержание свободного диоксида углерода — по результатам титрования 0,05н раствором Na_2CO_3 до рН=8,39.

Для установления низких концентраций различных форм биогенных элементов использовали разработанные или модифицированные в гидрохимической лаборатории ИБВВ РАН фотометрические методы: аммонийный азот определяли нesslerизацией после предварительной микродиффузионной отгонки (Трифенова, 1977), нитриты — путем диазотирования сульфаниламида (белого стрептоцида) и азосочетания полученного промежуточного продукта с нафтиламином (Бикбулатов, Верещагин, 1979), нитраты восстанавливали до нитритов на колонках с омедененным кадмием и применяли вышеуказанный метод определения нитритов, фосфаты — по «фосфомолибденовой сини», полученной с применением растворов двуххлористого олова, стабилизированных гидразином (Бикбулатов, 1974). Общее количество азот- и фосфорсодержащих соединений находили после перевода органических компонентов в неорганические формы путем сжигания с персульфатом калия (Бикбулатов, 1974; Галеева и др., 1982) с последующим применением указанных выше методов.

Для характеристики органического вещества в воде использовали показатели: цветность, определенную по хромокобальтовой шкале, биохимическое потребление кислорода за 5 суток (БПК₅) (Семенов, 1977), химическое потребление кислорода (бихроматную окисляемость) (Алекси и др., 1973), содержание органического углерода, определенное методом «мокрого» окисления персульфатом калия (Бикбулатов, 1974) и оптическую плотность профильтрованных водных образцов (Бикбулатов, 1982). Взвешенные вещества выделяли на мембранные фильтры с размером пор 0,45 мкм, доводили до постоянного веса при 105° и взвешивали на аналитических весах. Количество органического углерода в них устанавливали методом «сухого» сжигания после предварительного выделения взвесей на мембранные фильтры с накладкой из двуокиси кремния (Ларионов, Скопинцев, 1974), общего фосфора после окисления органических веществ персульфатом калия (Бикбулатов и др., 1978), общего

азота по Кьельдалю. В донных отложениях определяли групповой и фракционный состав гумуса по Кононовой и Бельчиковой (Орлов, Гришина, 1981), содержание белков методом Лоури в модификации Богданова (1968) и органический углерод по Тюрину (Орлов, Гришина, 1981).

Пробы воды отбирали батометром Руттиера. Основная масса измерений проведена в пробах с глубины 0,5 м. Донные отложения извлекали дночерпателем, а в ряде особо оговоренных случаев, например, при исследовании глуболежащих горизонтов, стратометром.

Глава 2

КИСЛОРОДНЫЙ РЕЖИМ

Главные особенности кислородного режима оз. Неро были установлены в 1929 году (Грезе, 1929). «Основной чертой кислородного режима озера является почти полное насыщение кислородом всей водной толщи в течение лета (часто и пересыщение) и резкий дефицит к концу зимы, вызывающий, как правило, ежегодный замор. Распределение кислорода в вертикальном направлении более или менее однородно, что очень хорошо согласуется с описанной выше гомотермией, и возникает как следствие одной и той же общей причины. Летние условия кислородного режима являются очень хорошими; кислород почти всегда имеется в максимуме; зимний же дефицит играет роль фактора «минимума», ограничивающего годовую продукцию биомассы — в том числе рыбы. Виднейшую роль в обогащении озерных вод кислородом в летнее время играют процессы фотосинтеза — как со стороны фитопланктона, чрезвычайно богатого протококковыми водорослями (вызывающими, как правило, мутность воды в течение всего лета), так и со стороны макрофитных ассоциаций, главным образом рдестов, распространенных по всему озеру. Высокая подвижность вод озера под влиянием ветров и ветровых течений способствует быстрому выравниванию содержания O_2 во всех слоях, в том случае, если начинают намечаться какие-нибудь различия; однако в некоторых случаях движение воды в озере под влиянием ветра само вызывает некоторые характерные явления в распределении O_2 . Окислительные процессы в илу являются в условиях озера Неро очень мощным фактором потребления O_2 ; однако летом этот процесс в общем полностью компенсируется за счет O_2 , поступающего из атмосферы и выделяющегося при фотосинтезе; лишь в условиях подледного режима потребление O_2 дном дает очень сильный эффект».

Высокая активность микроорганизмов, осуществляющих деструкцию лабильной части органического вещества сапропелевых отложений, даже летом часто приводит к аномалиям в вертикальном распределении кислорода. В условиях штилевой или близкой к ней погоде потребление кислорода в поверхностном слое илов не успевает компенсироваться поступлением его из вышележащих слоев воды и тогда наступает кратковременная химическая стратификация. Можно было полагать, что на отдельных участках, где донные отложения содержат незначительное количество органических веществ, подобная стратификация может и не происходить. Однако на станции, расположенной к югу от городского острова и имеющей общую глубину 2,4—2,7 м, 28 июня и 11 июля 1928 г. было зафиксировано температурное и кислородное расслоение. Причем грунты здесь представлены почти чистым песком и, следовательно, по мнению Гресе Б. С. (1929), убыль кислорода ко дну не может быть сведена к потреблению его разлагающимся илом и объясняется влиянием рек Ишия и Уинцы (Романихи), ближайших по своему положению к указанной станции. В связи с этим необходимо заметить, что приведенные им материалы по другим компонентам химического состава вод (жесткости, хлоридам, бикарбонатам) указывают на то, что влияние этих рек не распространялось далее 100 м от устья и, по-видимому, не могло быть причиной обнаруженной стратификации на рассматриваемом участке. По всей вероятности здесь, как и на других станциях, постоянно образуется наил, состоящий из отмерших клеток планктонных организмов, в значительной своей части способных к относительно быстрой биохимической трансформации, и который, не меняя характера грунта, тем не менее может быть причиной заметного (на 20—30%) понижения содержания кислорода в придонных слоях воды.

В летнем горизонтальном распределении кислорода на фоне очень сложной картины можно уловить типичные черты (Гресе Б. С., 1929):

1. Количество кислорода у дна увеличивается от центра озера к берегам. Такое явление наблюдалось на разрезе Городской остров — с. Угодичи в конце июля 1927 г. и начале августа 1929 г. при северо-восточных и восточных ветрах и небольшом волнении. Причина подобного распределения кислорода в придонном слое кроется в том, что в прибрежных мелководных частях озера перемешивание воды и ее аэрация происходят по всей глубине, тогда как в глубоких частях озера придонные слои могут не затрагиваться волнением вовсе или подвергаться его воздействию в меньшей степени. Причем возможная биологическая причина рассматриваемого явления может быть исключена, так как фотосинтезирующие водоросли в береговой зоне развиты, как правило, в меньшей степени по сравнению с открытой частью. Макрофитные ассоциации против с. Угодичи благодаря частым прибойным явлениям развиты недостаточно сильно, чтобы играть решающую роль в пополнении водных масс кислородом.

2. Содержание кислорода в придонном слое достигает максимума у одного берега и более или менее постепенно снижается по направлению к противоположному берегу. Такое положение возникало 31 июля и 1 августа 1928 г. на разрезе Ростовский Кремль - с. Угодичи при очень сильном восточном ветре и сильном волнении. Содержание кислорода снижалось от подветренного к наветренному берегу. Механический эффект волнения, постепенно нарастая к восточному берегу, вызывал все большее взмучивание поверхностных легко подвижных слоев донных отложений, на окисление которых тратилось все большее количество кислорода, который в данном случае не компенсировался полностью азрацней воды или другими процессами. У защищенного подветренного берега этот процесс вовсе не имел места и содержание кислорода соответствовало нормальному состоянию озера. Здесь же Гресе Б. С. отмечает очень примечательный факт: предполагаемое взмучивание ила не сопровождалось соответственным уменьшением прозрачности, измеренной по диску Секки. Более того, по мере приближения к восточному наветренному берегу прозрачность возрастала. Кажущееся противоречие он приписывает погружению организмов фитопланктона, который в основной своей массе был представлен протококковыми волорослями, имеющими пластинчатую форму, в более нижележащие слои и таким образом пытающимися избежать неблагоприятных воздействий сильного волнения на свой организм. Подобное явление на оз. Неро наблюдалось неоднократно: при сильном волнении в центре озера происходит увеличение прозрачности. Ясно, что подобные ситуации в озере могут реализоваться только в том случае, если планктонные организмы определяющим образом сказываются на рассматриваемой характеристике водных масс.

3. Отсутствие какой-либо закономерности в распределении кислорода в штилевую погоду у дна на мелководных станциях в юго-восточной части озера, где имеется наибольшее развитие расположенных островками макрофитных ассоциаций. Повышенные по сравнению с открытыми и более глубоководными частями значения концентрации кислорода в этом районе обусловлены фотосинтезом высших растений. Волнение сильно нивелирует подобные различия.

Зимний кислородный режим озера крайне неблагоприятный и способствует ежегодным заморам, включая массовую гибель мальков. По данным измерений на 3 станциях, расположенных в восточной части, 12 марта 1927 г. в воде еще оставалось незначительное (2—13% насыщения) количество кислорода, которое было явно недостаточно для нормальной жизнедеятельности не только рыб, но и многих других гидробионтов. 26 марта 1928 г. при измерениях на трех мелководных (1,5—2,3 м) станциях, две из которых совпадали со станциями, замеченными в предыдущем году, только в поверхностных пробах были обнаружены следы кислорода (0,2—0,5% насыщения). При этом на станции, находящейся в прибрежной зоне у городского берега (вблизи Ростовского Кремля)

кислород отсутствовал от поверхности до дна, хотя глубина здесь была наибольшей из апробированных. В этом районе «констатированы все условия для сильного загрязнения; имеется несколько стоков, по которым городские сточные воды спускаются именно в эту часть озера. Одним из самых крупных источников загрязнения береговой зоны в городской черте является речка Пига, устье которой в 1927 г. было преобразовано в гавань для зимней стоянки парохода. Ил этого участка подвергается усилённому разложению, что сопровождается выделением сероводорода, явственно ощущаемого по запаху в зимних пробах». Привяв приведенные выше данные по насыщенности воды кислородом за последовательные фазы редукции O_2 , хотя они относятся к разным годам, Грзе Б. С. (1929) обоснованно предположил, что через неделю-другую, т. е. в первой декаде апреля, кислород во всей водной толще большей части озера должен исчезнуть и только на небольших участках сохраниться до вскрытия льда. На основании состояния планктона в январе—феврале и в отсутствие прямых измерений он же заключает, что резкий дефицит кислорода обычно должен наступать к концу зимы.

В пополнении кислородом озерных зимних вод определенную роль могли бы играть основные притоки. Широкое устье р. Ишны обильно зарастает, течение ее здесь очень слабое, дно покрыто гниющими остатками высшей водной растительности, которые «выедают» значительную часть кислорода, поэтому Ишны даже в периоды открытой воды не может служить сколь-нибудь заметным источником O_2 . Аналогичная ситуация складывается в реке Кучинбощ, которая течет среди заболоченного луга, а ее дно у устья также выстлано гниющими остатками растительности. Роль наиболее крупного притока — р. Сары — из-за благоприятного газового режима в ней в течение всего года может быть значительной, несмотря на сравнительно небольшие расходы, особенно в периоды зимней межени. На значимость этой реки в поддержании заметного, хотя и недостаточного уровня кислорода в районах, прилегающих к ее устью, сильное влияние оказывает уровеньный режим озера. Сара в своем устье мелководна и при низком уровне воды лед садится на дно и результатом может стать частичная закупорка протока. И без того малое поступление кислорода может снизиться до совсем малых величин, а главное, при таких условиях практически закрывается проход в реку рыбы, пытающейся найти здесь — одним из самых важных своих убежищ — спасение.

После фундаментальной работы Грзе Б. С. (1929), проведенной еще в далекие 1927—1928 гг., и сделанных им выводов, которые из-за недостатка экспериментального материала часто носят предположительный характер, в течение многих лет не было предпринято серьезных исследований кислородного режима озера. Наблюдения в одной точке у поста ГМС в различные сезоны 1948 г. показали, что во второй половине зимы кислород почти полностью бывает израсходован в результате процессов разложения колоссальной биомассы отмирающих макрофитов и фито-

планктона. Поэтому почти каждый год здесь происходят заморы рыбы. Изучение гидрохимической ситуации во время заморы, проведенное сотрудниками ИБВВ АН СССР в марте 1963 г. и феврале 1965 г., показало, что «в самом озере во второй половине зимы содержание растворенного кислорода в поверхностном слое не превышает 0,1 мг/л (0—0,06), а в придонном слое почти везде соответствует аналитическому нулю... В эти же дни в нижнем участке реки Сары отмечено наличие растворенного кислорода, хотя и в незначительном количестве. В пробе воды, взятой у Поречья-Рыбного, выше устья сточной канавы консервного завода, 9 февраля 1965 года было найдено 1,82 мг/л растворенного кислорода, а ниже устья канавы — 1,15 мг/л.» (Фортунов, Московский, 1973). Таким образом, впервые отмечалось, что зимой весьма неблагоприятный кислородный режим для рыбного населения имеет место и в основном притоке озера — р. Сара, по крайней мере в нижнем ее течении, где концентрация O_2 значительно ниже рыбохозяйственной ПДК, равной для зимнего периода 4 мг/л. Имеющиеся фрагментарные, зачастую единичные измерения других исследователей, лишь подтверждают изложенные выше положения.

В 1988—1991 гг. в рамках комплексных обследований оз. Неро сотрудниками ИБВВ РАН были проведены измерения содержания кислорода по выбранной сетке из 16 станций, охватывающей основные водные массы и основные гидрологические фазы в жизни водоема. Эти исследования выявили несколько новых моментов в его распределении и динамике.

В январе 1990 г. на небольшом числе станций были получены наиболее ранние для зимнего периода (в смысле календарных сроков) данные по кислороду (табл. 2.1).

Таблица 2.1

Содержание кислорода по разрезу г. Ростов — с. Угодича
в январе 1990 г., мг/л (по Ривьер, 1991)

Станция	Глубина, м	Поверхность	Дно
1	1.4	1.44	0.79
2	1.4	0.79	0.77
3	3.0	1.53	0.56
4	3.7	1.40	0.83
р. Векса	1.0	2.40	2.35
р. Сара	2.0	3.10	3.00

Они подтверждают сделанные выше замечания о возможной высокой интенсивности протекания окислительных процессов на дне водоема и позволяют сделать некоторые предположения о механизмах процессов.

В частности, отсутствие резко выраженной (хотя и заметной) стратификации, которую можно было бы ожидать в случае распространения анаэробной или микроаэрофильной зоны по механизму обычной медленной диффузии по направлению дну — поверхности, заставляет думать, что в покрытом льдом озере имеются факторы, ответственные за относительно быстрое перемешивание слоев. Являются ли ими течения или постоянный подток подземных вод, или отмеченная равномерность вызывается зоопланктонами, большое количество которых часто опускается вниз в богатые пищей (микрофлорой) металимниальные слои, способствуя их разрушению и тем самым уменьшению градиента концентраций, предстоит еще выяснить.

В конце марта 1988 г. р. Сара в районе Поречья, как и вся р. Ишня, еще была покрыта льдом, но уже местами имелись промоины. На р. Вехсе льда не было, а вода в ней имела необычный желто-зеленый цвет и, даже пройдя несколько сот метров по открытой местности после плотины, не успевала насытиться кислородом; у моста у с. Белогостицы его содержание составляло 2,4 мг/л. На ледяном покрове в центре озера также имелось несколько изолированных промоин. В них наблюдались выходы газов (O_2 , CO_2 , метан?), которые, постоянно поднимаясь со дна озера, способствовали поддержанию относительно малой толщины льда вероятно во время всего зимнего периода. Весной, при установлении длительных среднесуточных температур, озеро в первую очередь начинает вскрываться в таких местах. Здесь же небольшие потоки газа способствуют поддержанию более низких градиентов концентраций химических компонентов. Например, на ст. 4 а (большая промоина примерно в 300 м от основной глубоководной станции по направлению к устью Сары) в марте даже в придонной воде сохранялись заметные концентрации кислорода (2,5 мг/л), тогда как на ст. 4, полностью изолированной от атмосферы, у дна его не было вовсе, а в более высоколежащих слоях было значительно меньше (табл. 2.1). Здесь же (ст. 4 а) в большом количестве, особенно в поверхностном слое, встречались зоопланктонные организмы. Такие узко локализованные в пространстве не совсем обычные условия и связанные с ними явления должны быть весьма характерными для оз. Неро.

С 1988 г. начинается новый этап в жизни озера. Сток из озера в этом году впервые начал осуществляться через нижнюю часть задвижки правого водовода новой плотины, введенной в эксплуатацию осенью 1988 г. Уровень воды на плотине поддерживался на постоянной отметке 94,0 м. Эти обстоятельства решающим образом сказались на распределении химических компонентов.

В 1989 г. впервые документально было констатировано, что после становления ледяного покрова дефицит кислорода развивается быстро и уже к началу февраля распространяется практически на всю глубину водоса (табл. 2.2).

К этому времени в подавляющей части озерной водной массы не остается даже его следов. Лишь в районах, подверженных прямому воздействию речных вод, (ст. 2 у устья р. Сары и ст. 11 у устья р. Варус), сохраняется более благоприятный газовый режим. Тем самым не подтверждается выдвинутая на основании косвенных показателей гипотеза Гресе Б. С. о возможном медленном становлении анаэробных условий. Не меняет положения и присутствие в поверхностных пробах небольших количеств кислорода на станциях, прилегающих непосредственно к городу (ст. 7—9).

Таблица 2.2

Сезонная динамика содержания кислорода в 1989 г, мг/л

Станции	Дата отбора проб				
	3 февраля	20 марта	14 мая	20 июля	18 сентября
1	-	11.1	7.5	7.8	8.8
2	8.4	10.6	8.8	7.5	10.3
3	0	9.1	9.8	8.0	10.6
4 пов.	1.2	2.7	8.7	8.7	12.7
4 дно	0	0	-	-	-
5	0	1.4	9.1	8.6	13.3
6	-	1.6	9.2	8.0	11.5
7	1.3	1.0	9.9	9.9	10.7
8	1.2	<0.1	10.2	-	10.0
9	1.2	6.2	10.7	10.1	10.4
10	0	1.5	10.7	9.4	10.5
11	5.8	9.3	9.2	7.4	8.8
12	0.8	2.7	7.9	8.1	11.1
14	0	1.8	10.1	9.1	11.4
15	0	3.9	10.1	9.3	11.5
16	-	6.6	6.6	3.4	4.3

Характер распределения кислорода в конце ледостава во многом определяется климатическими факторами. Перед съемкой 20 марта 1989 г. длительное время стояла мягкая погода. На уже бесснежном ледяном покрове озера во многих местах стояла вода. Реки вскрылись и только устье р. Сары еще оставалось скованным ледяным панцирем. Обогащенные кислородом на открытых участках (вплоть до устья)

и более теплые (по сравнению с озерными воды р. Сары постепенно распространялись подо льдом на значительные расстояния, что хорошо прослеживалось по разрезу Сара — Векса. Изначально высокий уровень кислорода (11,1 мг/л) речные воды сохраняли почти до центра озера (ст. 3, 9,1 мг/л), создавая впечатление, что они шли сплошным потоком, почти не перемешиваясь с озерными. Влияние их на газовый состав воды, расположенной далее по тому же разрезу ст. 4, было еще незначительным и ощущалось только в поверхностных пробах; у дна сохранялись полностью анаэробные условия (табл. 2.3). Реки Кучибошь и Ишня вносят свою лепту в обогащение вод кислородом; на станциях, расположенных вблизи их устьевых участков (ст. 11 и 9 соответственно), его концентрации намного превышали зимние величины. Присутствие небольших количеств O_2 в поверхностных пробах было зафиксировано и на всей остальной акватории; они могли быть обусловлены подтоком талых более теплых вод с прибрежных участков.

Таблица 2.3

**Распределение кислорода, рН и щелочности
в глубоководной части озера 30.03.1988**

Станция	Глубина, м	рН	Щелочность, мг-экв/л	Кислород, мг/л
4	1.0	7.13	2.00	5.1
	1.5	7.15	6.48	1.5
	2.5	7.13	6.40	0.3
	3.4 (у дна)	7.12	8.28	0.0
4а	1.0	7.19	4.70	7.5
	1.5	7.22	5.24	3.7
	2.5	7.26	5.24	2.8
	3.0	7.27	5.48	2.5

В мае, по сравнению с мартом, уровень воды в р. Сары поднялся на 50 см. Скорости ее течения уменьшились в несколько раз, вследствие чего ухудшились физические условия насыщения вод кислородом. В то же время процессы деструкции органических веществ, сопровождающиеся потреблением растворенного O_2 , привели к понижению его содержания. Поэтому на фоне почти равномерного распределения и высокой концентрации кислорода на всей акватории озера, где сохранялись благоприятные условия для интенсивного перемешивания, воды р. Сары выглядят относительно бедными.

Пониженные количества O_2 в устье р. Ишни обусловлены теми же причинами. На фоне резкого снижения скоростей течения в режиме кис-

лорода существенную роль начинают играть процессы гниения залежей растительности, в больших объемах накопившихся в предыдущие периоды жизни озера, и количество которых здесь значительно больше, чем в Саре.

Летние и осенние распределения требуют лишь небольших дополнительных комментариев. Можно полагать, что волнение и ветровые течения могут оказывать прямо противоположное влияние на кислородный режим: при сравнительно небольшой интенсивности они будут способствовать аэрации и насыщению воды кислородом, а при очень большой силе, когда в круговорот втягивается и поверхностный слой сапропеля, преобладание может получить процесс потребления O_2 органическим веществом. Нужно также заметить, что небольшой разброс значений может быть связан как с наличием пятен «цветения», так и нестрогой одновременностью отбора проб (утро-вечер). Как и во все сезоны, низкие концентрации приурочены к устью Ишны.

Мягкая зима 1989—1990 гг. обусловила раннее снеготаяние и вскрытие рек; уже в начале марта имелись полыньи, способствующие газообмену озерных вод с атмосферой. Однако эти процессы могли охватывать только небольшие участки и исключительно поверхностные слои, не затрагивая глубинных вод, которые оставались в состоянии анаэробнозиса (табл. 2.4, ст. 4). И у западного (ст. 7), и у восточного (ст. 15) берегов содержание кислорода в 1990 году рано достигло уровня, достаточного для нормальной жизнедеятельности гидробионтов. Сара насыщенные атмосферными газами воды, и в устьевой станции под ледом содержание кислорода было близким к насыщению.

В начале апреля озеро полностью освободилось ото льда и совокупное действие ветрового волнения и массового развития диатомей (весенняя циркуляция не характерна для мелководных озер) к середине месяца привело к перемешиванию водных масс кислородом от поверхности до дна. Только в реках, несколько защищенных от ветров прибрежной растительностью, в том числе водной, и в отсутствие «цветения», содержание кислорода было пониженным. Летом и осенью характер распределения O_2 не отличался существенным образом от аналогичных сезонов предыдущего года (табл. 2.2 и 2.4).

Завершая обзор состояния исследований кислородного режима оз. Неро, необходимо добавить следующее:

1. Многочисленные исследования, проведенные на других водоемах, указывают на наличие суточного хода в динамике кислорода. Различия в содержаниях кислорода в пробах, взятых ночью и середине дня, могут доходить до нескольких мг/л. Для гипертрофного водосма, каковым является оз. Неро, размах суточного варьирования концентрации O_2 может быть очень значительным, и проведение соответствующих исследований может расширить наши представления об интенсивности протекающих в нем процессов.

Таблица 2.4

Распределение кислорода по сезонам 1990 г., мг/л

Станции	6 марта	20 апреля	25 июля	14 октября
1	-	9.5	7.8	9.6
2	11.1	11.8	9.5	10.5
3	-	16.6	11.8	11.2
4 (0.5 м)	7.8	15.9	10.4	11.0
4 (2.0 м)	0	-	-	-
4 (3.5 м)	0	15.9	-	-
5	10.2	15.7	9.9	11.1
6	-	12.5	-	9.6
7	9.6	-	11.1	11.5
8	-	16.0	7.8	11.0
9	-	16.1	-	11.0
10	-	14.6	9.5	10.2
11	-	14.0	8.3	9.9
12	-	13.5	11.0	11.3
14	-	13.2	-	9.7
15	6.6	14.3	10.6	11.0
16	-	7.5	5.9	5.2

2. В представлении местных жителей, особенно рыбаков, нестари бытует мнение, что существует связь между степенью произрастания летом в озере «тарнавы» (рдестов) и последующего зимнего замора рыбы. Вопрос этот требует дальнейших уточнений, хотя несомненно, что разлагающийся ил, который определяет степень анаэробности зимних условий в водоеме, состоит не только из остатков планктонных организмов, но и в большой мере из остатков высшей водной растительности. «Поэтому обогащение донных отложений не вполне разложившимся материалом со стороны погибающих каждую осень макрофитов должно способствовать окислительным процессам и, следовательно, усиленному потреблению O_2 зимой. Следовательно, периоды особенно пышной летней вегетации макрофитов могут сопровождаться зимой сильным замором. Конечно, здесь должен быть учтен ряд метеорологических и гидрологических факторов, таких как время и характер замерзания, толщина

ледяного и снежного покрова, и в первую очередь уровень воды в озере во время ледостава. Если уровень озера подо льдом очень низок или его спускают искусственно, исчезновение кислорода должно быстро достигнуть кульминационного пункта» (Грезе Б. С., 1929). Безусловно, это так.

3. Неизбежное следствие исчезновения кислорода — появление в воде сероводорода или его производных — сульфидов, которые при моделировании анаэробно-аэробных процессов часто даже рассматриваются в качестве «отрицательного кислорода». Впервые наличие крайне ядовитого для большинства гидробионтов H_2S в оз. Неро было обнаружено по «явственно ощущаемому запаху вследствие разложения ила» в прибрежной зоне у городского берега, где имелись все условия для сильного загрязнения; именно в эту часть озера по нескольким водотокам, основным из которых являлась р. Пига, попадали городские сточные воды (Грезе, 1929). Появление неорганических форм серосодержащих компонентов в водоемах не обязательно связано с загрязнением, поскольку они могут образоваться не только в результате анаэробного разложения белковоподобных веществ, которые в особенно больших количествах содержатся в бытовых стоках, но и в результате естественных процессов гниения остатков фито- и зоопланктона, рыб, в меньшей степени высшей водной растительности, а также редукции сульфатов в присутствии достаточного количества лабильных органических веществ. В обескислороженных зимних пробах воды из оз. Неро, за исключением придонных горизонтов пелагиальных станций и районов, прилегающих к городской черте, запах сероводорода чаще всего прямо не обнаруживается, но появляется при подкислении слабым раствором кислоты. Особенно ощутимые количества сероводорода выделяются при аналогичной обработке из богатых органическими веществами илов даже в летний период. Единственный прямой анализ на содержание суммы сероводорода и сульфидов, проведенный зимой 1988 года, показал величину 4 мг/л H_2S . Это несколько выше, чем в соседнем оз. Плещеево, где зимой на глубине 22 м нами были зафиксированы значения 0,2, а летом около 2 мг/л H_2S .

Главным процессом, обеспечивающим столь высокий уровень содержания сульфидов в воде оз. Неро, как ранее нами установлено для оз. Плещеево, очевидно, является хорошо изученный процесс редукции сульфатов. Он особенно сильно развивается в донных отложениях, где имеются большие количества лабильных органических веществ. Обнаруженные количества сероводорода в озерной воде на несколько порядков превышают его предельно допустимую концентрацию, которая принимается равной 1 мкг/л. По этой причине значительную часть зимы основные водные массы оз. Неро остаются непригодными для жизнедеятельности большинства водных организмов, за исключением специфических бактерий.

CO₂ и pH

Нормальное функционирование экосистемы оз. Неро, впрочем как и любой другой, во многом определяется свойствами карбонатно-кальциевой системы. От состояния равновесия между ее элементами зависят такие важнейшие процессы как фотосинтез, растворение и выпадение солей и многие другие. Буферная емкость и тем самым устойчивость озерной воды к внешним воздействиям также являются функциями состояния ее элементов. В стационарных условиях составляющие карбонатно-кальциевой системы (H^+ , HCO_3^- , CO_3^{2-} , CO_2 , H_2CO_3 , Ca^{2+}) находятся между собой в строго определенных количественных соотношениях. Изменения давления, температуры, содержания солей, активности организмов и т.п. немедленно воздействуют на эти соотношения и начавшаяся перестройка системы продолжается до тех пор, пока не установится новое состояние равновесия.

Первые измерения одного из элементов этой системы (газообразной CO_2), проведенные в 1926—1928 гг., показали, что в оз. Неро «свободная угольная кислота в открытой части озера летом отсутствует, по крайней мере в дневные часы; от прибавления фенолфталеина к пробе получается явственно красное окрашивание. Точно также нет свободной CO_2 и в октябре; зимой же картина меняется. 25 марта 1928 года найдены следующие количества CO_2 :

Ст. I	Ст. между 25 и 26
Пов. — 34 мг	Пов. — 34 мг
1 м — 31,5 мг	1,3 м (у дна) — 34 мг
2 м — 36,0 мг	(Гресе, 1929).

Станция I располагалась недалеко от Городского острова, а другая — в мелководной открытой центральной части озера.

Определения pH, проведенные по шкале Кларка, в период интенсивного цветения водорослей (август 1928 г.) дали величины, равные 8,1—8,2, а в июле 1929 г. в юго-западном плесе — 8,6—8,8 единиц. Немногочленные наблюдения над бикарбонатами в центральной части озера выявили сильные межгодовые вариации — от 80 мг в июле 1926 г. до 294 мг в том же месяце 1928 г. В конце подледного периода (25 марта 1928 г.) обнаружено резкое возрастание «полусвязанной» CO_2 (до 1050 мг) по сравнению с летом (Гресе, 1929).

В пробах, взятых в поверхностном слое воды на расстоянии 100 м от поста ГМС 22 апреля и 28 мая 1948 г., содержание бикарбонатов составляло соответственно 110 и 134 мг/л. Исследования, проведенные ИБВВ АН СССР в 1963 и 1965 гг. привели к заключению, что «в озерной воде зимой всегда имеется избыток свободной углекислоты. В поверхностном

слое содержание растворенной двуокиси углерода характеризуется величинами порядка 20—100 мг/л, а в придонном слое нередко доходит до 120—147 мг/л. Концентрация водородных ионов в это время соответствует показателям pH близким к 7,0... Реакция среды в различных участках водоема в течение большей части года остается нейтральной (pH = 7,0—7,2). Летом, в период интенсивной фотосинтетической деятельности водорослей и высших водных растений, в дневные часы реакция становится слабощелочной. Показатели pH повышаются до 8,0—8,2» (Фортунатов, Московский, 1973).

Измерения 1987—1991 гг. показывают, что pH озерной воды может достигать значительно более высоких величин (до 9,3—9,4, июль—сентябрь 1989 г.), указывая не только на полное исчерпание свободной CO₂ (что происходит при pH = 8,39) при интенсивно протекающих в летне-осенний период процессах фотосинтеза, но и на вовлечение в них части бикарбонат-ионов (рис. 2.1, табл. 1. Приложения). С начала мая до глубокой осени реакция среды в дневное время остается щелочной и только в подледный период на большинстве станций значения pH приближаются к точке нейтральности.

Для концентрации водородных ионов весьма характерно наличие естественного суточного хода, вызываемое соответствующими изменениями скоростей фотосинтеза; ночью pH меньше, чем днем. Реакция среды определяется не только временем суток, но зависит и от климатических факторов. Например, летом в июле 1988 г. на большей части озерных станций пробы были отобраны в период с 26 по 29.07 до 14 часов дня; перед этим в течение недели светило яркое солнце и держалась штилевая погода, что создало хорошие условия для протекания фотосинтетических процессов. В результате pH повысилось до значений, превышающих 9 единиц. На станциях 8, 12, 14 пробы отбирали 30.07

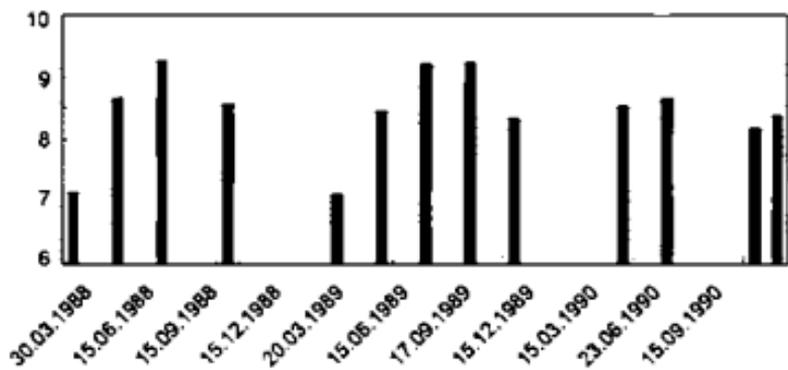


Рис. 2.1. Сезонная динамика pH в центральной части озера (ст. 4)

при небольшом волнении и облачности, а накануне вечером прошел дождь; это привело к некоторому снижению скоростей фотосинтеза и рН снизилось до менее 9 и даже 8 единицы (табл. 1. Приложения).

Вследствие худших условий развития продуцентов в реках в вегетационный период значения рН ниже по сравнению с озерными и вариации выражены слабее. Зимой, наоборот, р. Сара несет воды, менее насыщенные диоксидом углерода, в соответствии с чем они имеют повышенные рН.

В озерной части в больших количествах, до 130 мг/л (март 1989 г.), CO_2 встречается только зимой, когда концентрации водородных ионов и свободного диоксида углерода определяются интенсивностью биохимических, главным образом микробиологических процессов деструкции органического вещества в воде и донных отложениях. Распределение CO_2 по акватории довольно равномерное. С началом вегетации растительных сообществ содержание CO_2 постепенно снижается и к первой половине мая в воде сохраняется не более 10—30 мг/л. Летом свободная углекислота практически отсутствует и вновь появляется осенью с началом массовой гибели фитопланктонных организмов и высшей водной растительности. (табл. 1. Приложения).

Противоположный характер носит сезонная динамика CO_2 в реках. Летом здесь всегда присутствует то или иное количество диоксида, зимой, наоборот, в речных водах содержатся меньшие количества CO_2 по сравнению с озерными.

Глава 4

МИНЕРАЛИЗАЦИЯ И ЭЛЕМЕНТЫ СОЛЕВОГО СОСТАВА

Составляющие водного баланса (см. гл. 1) непосредственно указывают на источники, под влиянием которых происходит формирование химического состава вод озера Неро. Как и для большинства других водоемов суши, в приходной части первостепенную роль играет поверхностный сток (более 70%), складывающийся из основного притока — р. Сары и притока 20 небольших рек и ручьев. Площади водосбора этих рек расположены в Ростовской котловине, где близко к поверхности залегают богатые солями горные породы пермского и триасового возраста, имеющие непосредственные контакты с грунтовыми водами — основой водного питания рек. Почвы в ряде мест представлены солонцами — по местному «кусолами». Поэтому воды оз. Неро характеризуются не только

повышенными количествами растворенных минеральных компонентов, но и своеобразным химическим составом. По этим показателям они заметно отличаются от большинства озер Ярославского Поволжья и среднерусской равнины. Дополнительное влияние на качество озерной воды оказывают антропогенные источники, главные из которых — предприятия пищевой промышленности и неканализованный сток с городской территории. Неоднородности в характере геологического строения водосбора и различия в мощности антропогенных нагрузок обуславливают и своеобразие химического состава вод притоков.

4.1. Притоки

4.1.1. *Малые реки и ручьи.* Относительно большинства из более чем 20 рек и ручьев, питающих оз. Неро, фактически нет гидрохимических и гидрологических сведений. Суммарная боковая приточность, включая вторую по величине объема водного стока р. Ишню, не превышает одной трети стока основной водной артерии — р. Сары. Если исключить из рассмотрения р. Ишню, то на долю малых рек и ручейков, многие из которых летом пересыхают, будет приходиться менее 10—15% общего объема стока. Из них только р. Кучиבוшь, впадающая в юго-западную часть озера, заметно сказывается на формировании химического состава локальной водной массы прилегающего участка.

Немногочисленные прямые и косвенные данные указывают на то, что Кучиבוшь — солоновато-водная река. Летом 1928 г. она несла воды с повышенной, по сравнению с другими притоками, жесткостью и несколько большим (26,5 мг/л) содержанием хлоридов: «жесткость в р. Кучиבוшь достигает максимальной цифры 17,4°, однако эта цифра характерна только для поверхностного слоя, на глубине 2,5 м мы имеем только 6,9°» (Грезе Б. С., 1929). Косвенно о повышенной минерализации вод этой реки свидетельствуют наши данные по ст. 11, расположенной недалеко от ее устья, и где почти во все сезоны года общая жесткость и содержания различных ионов солевого состава выше, чем в пелагической части озерной акватории.

Небольшая речка Романиха (Уница), впадающая в озеро у южного края г. Ростова вблизи Яковлевского монастыря, в настоящее время подвергается сильному антропогенному давлению. Летом 1990 г. ее воды содержали около 1 мг/л битумоидов и 92 мкг/л углеводов, что почти в два раза превышало рыбохозяйственное ПДК (пробы были отобраны у моста по дороге Ростов — Львы). Воды Романихи очень жесткие ($J = 6,5$ мг-экв/л, что соответствует 18,2 немецким градусам: 1 град = 1° = 10 мг CaO = 0,357 мг-экв), содержат много хлоридов (123 мг/л) и более 400 мг/л бикарбонатов (табл. 2.5). Такие воды не могут быть использованы даже для орошения, требования к качеству которых

существенно ниже требований, предъявляемых к источникам питьевого водоснабжения. Меньшей жесткостью они обладали в более ранние годы. В июне 1926 г. жесткость в устье реки составляла 8,0°, а летом 1928 г. — 7,4° (Грезе Б. С., 1929).

Совершенно нет сведений о составе вод других мелких ручьев и речек. Можно полагать, что мелкие водотоки восточного побережья, дренируя аналогичные в почвенно-климатическом отношении участки, в такой же степени как р. Сара обогащены солями. Это может быть справедливым только при условии, что здесь нет локальных источников выхода на поверхность глубинных вод повышенной минерализации, а почвы достаточно хорошо промыты.

Нет сведений и о компонентном составе подземных вод, которые по данным В. Л. Рохмистрова (1970) в озерном питании играют значительную роль (21,2% приходной части водного баланса). Несомненно одно — они должны обладать значительной минерализацией и тем самым увеличивать общее солесодержание озерных водных масс. Противоположное воздействие на минерализацию должны были бы оказать атмосферные осадки, на которые в водном балансе приходится 8,3% от суммы прихода, но испарение (7,4% расходной части) по существу нивелирует эти возможности.

Таблица 2.5

Химический состав (мг/л) воды рек Романиха и Ишня
(расстояние от устья, км)

Река	Na ⁺	K ⁺	Ж, мг-экв/л	Ca ²⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻	pH	Э, мкСм/см
Ишня, 0.5	-	-	7.68	86.0	131	105	328	7.96	460
1.0	43.4	1.8	6.46	70.5	141	105	293	7.60	430
3.0	44.3	1.4	7.78	89.0	142	109	293	7.38	440
7.0	43.9	1.3	7.85	104	147	116	293	7.35	430
13.0	2.52	2.1	3.56	33.6	7.7	21.6	168	7.72	903
Романиха	-	-	6.52	75.4	123	23.6	409	7.16	500

Обобщая вышеприведенные материалы, необходимо указать на то, что широкие различия в химическом составе воды притоков в совокупности с отсутствием гидрографов для многих из них, неизвестность состава подземных вод делают весьма приближенными расчеты нагрузки на водоем даже консервативными компонентами, не говоря о биогенных элементах и органическом веществе, изменчивость которых должна быть выше.

4.1.2. Река Ишня. Наиболее характерной особенностью вод р. Ишня является значительное (до 145 мг/л) содержание хлоридов. В летнюю межень 1990 г. концентрации хлоридов выше ПДК = 100 мг/л были обнаружены на расстоянии 7—10 км от устья, где непосредственное влияние города может быть исключено (табл. 2.5). Пробы, отобранные у деревень Шулец и Ивахно (примерно в 13 км от устья), содержали почти в 20 раз меньше хлоридов, чем у д. Слобода и АТП г. Ростова (7-й км). По мере продвижения вниз по течению довольно ярко выражены и изменения в содержании сульфатов и основных катионов солевого состава. В указанном промежутке (между 7-м и 13-м километрами) имеются близко расположенные к реке и хорошо известные местным жителям выходы на поверхность глубинных вод с высоким содержанием поваренной соли. Помимо NaCl рассолы содержат хлориды и сульфаты кальция и магния. Все эти компоненты обогащают реку, а с нею и озеро, элементами, в больших концентрациях противопоказанными для обитателей пресноводных водоемов. На этом участке содержание натрия — до 45 мг/л — существенно превышает содержание магния. Соотношение главных ионов $Ca > Na > Mg$ и $Cl > SO_4$ резко отличает Ишню от подавляющего числа пресноводных водотоков, в том числе и Сары.

Воды р. Ишни наиболее жесткие из всех притоков. Во время весеннего половодья и осенних паводков жесткость снижается более чем в 2 раза. (рис. 2.2, табл. 2 Приложений).

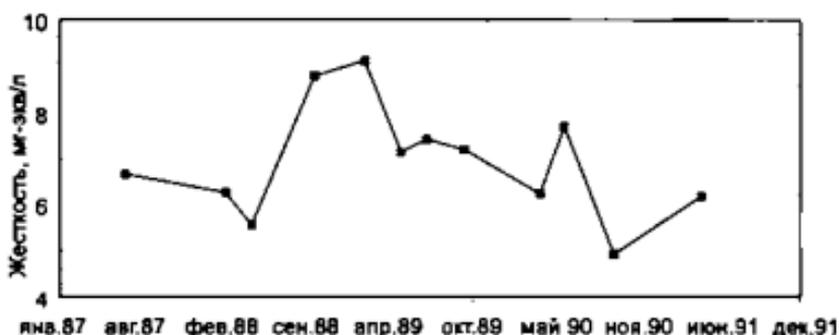


Рис. 2.2. Динамика жесткости воды р. Ишня

4.1.3. Река Сара. Соотношение ионов в р. Саре обычное для большинства поверхностных вод суши, т. е. $Ca > Mg > Na > K$ и $HCO_3^- > SO_4^{2-} > Cl^-$. В течение значительной части года она несет воды более жесткие, чем озерные. Динамике жесткости присущи те же черты, что и для р. Ишни (рис. 2.3, табл. 2. Приложения).

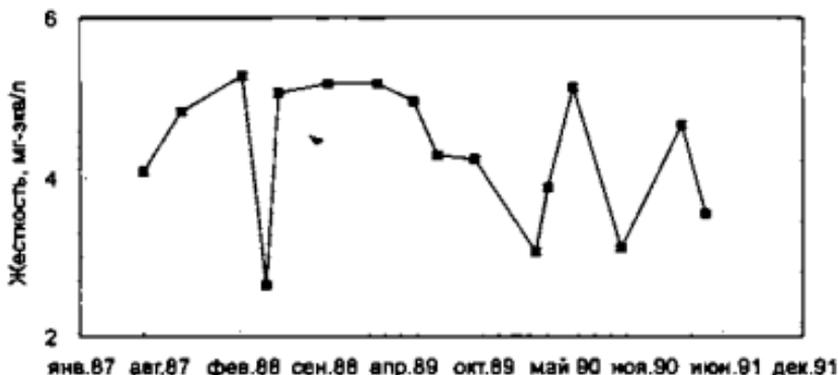


Рис. 2.3. Динамика жесткости воды р. Сары

Сезонные колебания в содержании кальция и других компонентов солевого состава не выходят за пределы общих и санитарно-токсикологических требований, предъявляемых к природным водам, несмотря на то, что река испытывает постоянный антропогенный пресс от пос. Порчье-Рыбное с его предприятиями пищевой промышленности. Межгодовые вариации жесткости в р. Саре невелики.

Высокое содержание солей в периоды летней межени, по-видимому, является характерной чертой этой реки. Анализы, сделанные почти 70 лет назад (12 июня 1926 г.), показали, что р. Сара (Гда) и тогда вносила в озеро очень жесткую воду (14°). Еще большие величины жесткости были обнаружены в устье реки 8 августа 1928 г. В это же время содержание хлоридов ($9,5 \text{ мг/л}$) здесь было минимальным по сравнению с озером ($14\text{--}18 \text{ мг/л}$) и реками Ишя (до 108 мг/л у дна) и Кучибошью (до 123 мг/л в придонном слое). Различия в жесткости и содержании хлорид-ионов между речными и собственно озерными водами быстро нивелировались по мере удаления от устья (Грзе Б. А., 1929).

4.2. Озерные водные массы

Химические анализы воды озера делались в различных точках и в разные сроки, что в совокупности с указанными во введении искусственными и естественными причинами, оказывающими существенное влияние на функционирование экосистемы, сильно затрудняет их сопоставление. Поэтому при рассмотрении пространственного и временного распределения различных элементов приходится в основном опираться на результаты, полученные в комплексных экспедициях 1987—1991 гг.

4.2.1. Ионный состав. Глубокой зимой распределение компонентов по акватории озера довольно равномерное (табл. 2.6). По общей жесткости немного выделяются: придонная вода центральной части озера (ст. 4), воды юго-западного и юго-восточного плесов, а также районы, прилегающие к устьям рек, особенно к наиболее минерализованной р. Ишне (ст. 9), воды которой, возможно, доходят до городской черты (ст. 8). Существенно (в 2—3 раза) пониженные по сравнению с остальными станциями содержания натрия, хлоридов, сульфатов являются характерной чертой практически полностью окруженного высшей водной растительностью и поэтому имеющего весьма малый водообмен участка (ст. 12).

Таблица 2.6

Содержание основных компонентов солевого состава 3—6 февраля 1989 г., мг/л (Э — электропроводность в мкСм/см, Ж — жесткость, мг-экв/л)

№ ст.	Э	Na ⁺	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Ж	Cl	SO ₄ ²⁻
1	-	6.0	2.5	67.8	21.4	5.17	9.5	14.6
2	413	-	-	-	-	-	-	-
3	460	11.6	2.4	55.8	23.8	4.77	35.8	11.9
4 дно	-	19.2	3.7	54.2	18.2	5.23	33.8	28.9
5	454	15.0	3.6	54.8	22.3	4.60	22.0	15.5
6	-	15.4	3.6	70.8	24.5	5.58	25.7	19.3
7	452	16.5	4.2	46.6	25.8	4.48	28.1	28.9
8	480	18.8	4.5	66.4	26.3	5.51	33.2	32.1
9	537	20.4	4.2	69.2	30.8	6.03	41.2	58.9
10	503	15.0	4.1	70.0	26.4	5.70	23.9	15.7
11	441	15.4	4.1	60.0	30.2	5.52	25.4	38.9
12	447	8.4	2.7	61.6	22.7	4.97	11.4	13.1
14	467	12.1	3.6	59.4	25.8	5.12	19.1	18.3
15	-	14.0	4.3	55.6	23.5	4.74	24.5	17.7
16	-	42.1	3.8	109	43.7	9.11	145	86.1

Хорошее представление о пространственном распределении суммы ионов в конце ледостава дает картина электропроводности, полученная со льда 26—28 марта 1988 г. (рис. 2.4). Этот легкодоступный показатель имеет высокую степень корреляции ($r > 0,9$) со многими химическими характеристиками вод верхневолжских водохранилищ, которые в региональном аспекте близки к оз. Неро (Бикбулатов и др. 2001) и можно

надеяться, что аналогичные связи будут свойственны и для этого водоема. Согласно электропроводности зимой наименее минерализованные воды приурочены к приустьевым районам, в том числе и рек юго-восточного региона, что является явным признаком начавшегося ранее снеготаяния и подпитки рек талыми водами с очень малым содержанием солей. Влияние большинства из них (Кучубоши, Ишни и др.) вследствие еще малых расходов обнаруживается не далее 200—300 м от места впадения. Воды же наиболее полноводной Сары, на которой появились обширные промозины и значительно увеличилось расхождение, распространялись далеко во все стороны, а не проходили транзитом узкой полосой в виде определенной струи; ореол рассеяния был вытянут в северо-восточном направлении.

Максимальной электропроводностью, а значит и солесодержанием, обладали воды юго-западного (разрез от д. Львы по направлению к устью Сары) и юго-восточного участков. Выходы более соленой воды проявлялись и на небольшом участке северо-восточной окраины озера. Основная же акватория была занята водами со средним содержанием растворенных неорганических компонентов, эквивалентным 200—230 мг/л KCl (1 мг KCl соответствует 1,71 мкСм/см), (рис. 2.4). Результаты прямых измерений компонентов солевого состава, проведенных всего за 3 дня до измерений электропроводности, в целом подкрепляют представленную картину (табл. 2.7).

По р. Вексе (ст. 6) в этот период течет относительно высокоминерализованная вода, источником которой несомненно являются сформировавшаяся за долгую зиму и обогащенная солями подземных источников придонная вода центральной глубоководной озерной чаши, постепенно выдавливаемая все усиливающимися расходами притоков. Судя по высоким значениям электропроводности, содержанию натрия, хлоридов, сульфатов и их соотношениям (табл. 2.8) на ст. 9 находилась несколько разбавленная вода Ишни, тогда как определения электропроводности спустя всего 3 дня вблизи этого участка (рис. 2.4) привели к противоположным представлениям о солесодержании. Это может быть связано как с существованием высоких градиентов концентрации химических



Рис. 2.4. Распределение электропроводности в зимний период (мкСм/см):
1 — острова

компонентов, которые могли проявиться при отборе проб (станции отбора в рассматриваемых случаях не были строго идентичными, хотя и располагались недалеко друг от друга), так и с резким изменением конкретной ситуации в районах, непосредственно подвергающихся воздействию речных вод, что в весенние дни вполне вероятно.

Таблица 2.7

Распределение основных компонентов солевого состава в конце ледостава (23—26 марта 1988 г.), мг/л
(Э — мкСм/см, Ж — мг-экв/л)

№ ст.	Э	Na'	K'	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Ж	Cl'	SO ₄ ²⁻
1	423	8.7	4.3	69.6	21.7	5.27	11.8	23.8
2	362	8.4	3.9	59.0	21.2	4.70	10.2	20.8
3	408	8.8	2.1	63.8	23.6	5.14	9.7	21.9
4 пов	400	11.3	2.5	34.2	28.1	4.03	12.8	36.5
4 дно	—	17.6	4.4	87.6	36.9	7.43	26.4	34.9
5	387	6.9	1.9	—	—	—	—	—
6	544	16.6	3.7	96.8	28.2	7.17	24.8	26.1
7	480	15.7	3.5	78.0	32.1	6.55	23.3	26.8
8	537	5.6	1.2	21.4	13.4	2.18	7.6	28.0
9	532	20.8	5.1	64.4	20.9	4.95	45.7	57.2
10	296	7.3	1.8	47.6	15.7	3.68	7.6	19.1
11	558	18.6	6.7	80.2	24.7	6.05	33.1	44.9
12	393	8.4	2.1	58.2	20.7	4.62	9.4	13.9
14	417	9.9	2.7	70.4	37.0	5.58	11.2	24.4
15	408	10.2	3.2	81.6	28.7	6.45	13.4	22.5
16	747	32.2	8.7	81.6	26.4	6.26	103	82.1

После вскрытия льда ветры быстро перемешивают озеро и на большей части акватории устанавливается практически однородная водная масса. Хорошей иллюстрацией этого положения служат данные наиболее ранней весенней съемки, проведенной 19—21 апреля 1990 г. (табл. 2.8), а также результаты обследований в начале мая в другие годы (табл. 2. Приложения).

Вариации суммы ионов ($\Sigma_{\text{и}}$) приходится на очень узкий интервал значений (257—267 мг/л), которые укладываются в пределы ошибки эксперимента. Даже в периоды сильных волнений по многим показателям выделяются защищенный от ветрового волнения зарослями камыша юго-восточный (ст. 12) и морфометрически обособленный юго-западный участки (ст. 11); по сравнению с основной частью озера в первом из них вода сохраняется более мягкой, а во втором — более жесткой.

Таблица 2.8

Распределение химических компонентов по акватории озера после вскрытия льда (19—21 апреля 1990 г.), мг/л
(Э — мксм/см, Ж — мг-экв/л)

№ ст.	Э	Na ⁺	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Ж	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻	Σ _c
1	-	6.3	1.9	43.2	20.8	3.88	7.5	15.6	214	309
2	256	6.6	2.2	44.6	14.2	3.41	9.7	7.4	174	257
3	277	-	-	-	-	-	-	-	174	-
4	-	8.5	2.7	44.2	13.0	3.29	14.4	25.8	-	-
5	-	9.4	2.8	43.6	13.8	3.33	15.6	14.4	168	268
6	-	9.3	2.7	44.2	16.4	3.58	16.1	15.6	168	272
7	-	8.9	2.7	43.8	12.2	3.21	15.4	15.6	168	267
8	-	9.0	2.8	41.2	14.8	3.29	15.1	15.6	168	267
9	300	10.0	2.7	45.2	12.2	3.28	16.9	16.4	174	275
10	270	8.1	2.6	43.4	12.7	3.23	12.3	14.2	174	265
11	324	10.2	2.8	51.4	12.5	3.61	17.3	17.2	201	312
12	231	6.2	2.3	40.4	11.5	2.88	8.4	12.8	156	238
14	236	-	-	39.2	9.1	2.71	8.5	15.6	150	-
15	254	8.1	2.5	45.2	10.0	3.09	13.2	15.6	174	267
16	-	36.8	3.7	88.2	22.0	6.24	78.5	19.6	250	499

К наступлению летней межени концентрация компонентов в различных частях озера еще более выравнивается, захватывая даже защищенные и обособленные участки, и только в приустьевых участках рек иногда можно встретить некоторые аномалии (табл. 2.9).

Таблица 2.9

Распределение компонентов солевого состава в летнюю межень (19—21 июля 1989 г.), мг/л (Э — мксм/см, Ж — мг-экв/л)

№ ст.	Э	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Ж	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻
1	-	47.8	22.6	4.27	9.4	30.5
2	251	27.8	20.2	3.07	18.4	32.3
3	220	21.6	16.2	2.43	17.7	33.5
4	213	23.6	15.4	2.46	20.8	32.7
5	227	21.6	17.4	2.53	22.4	40.1
6	-	23.0	16.9	2.56	36.2	55.5
7	-	21.8	16.1	2.43	19.1	32.7
8	220	19.8	15.1	2.25	20.1	28.9
9	-	28.2	17.5	2.87	23.7	43.8

№ ст.	Э	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Ж	СГ	SO ₄ ²⁻
10	-	29.0	16.6	2.83	20.8	31.0
11	-	44.4	19.7	3.86	20.1	31.0
12	253	29.6	15.5	2.77	15.5	31.8
14	220	21.0	16.1	2.39	18.4	29.3
15	227	22.4	17.0	2.54	17.2	31.7
16	-	101.4	28.1	7.41	132	115

К началу ледостава в юго-западной части озера в 1989 г. (ст. 11) начала формироваться водная масса, по своим химическим характеристикам отличающаяся от остальных районов озера (табл. 2.10). Главным образом, по-видимому, это результат снижения ветровой нагрузки в конкретные сроки отбора проб, и в меньшей степени воздействия двух постоянно действующих факторов — давления на этот регион солоноватоводной Кучибоши и поступления дополнительных количеств солей из вскрытых у д. Львы в 60-годах 20-го столетия при масштабных работах по добыче сапропеля более глуболежащих горизонтов донных отложений. Как увидим в дальнейшем, они содержат и отдают в вышележащую водную фазу значительные количества различных компонентов

Таблица 2.10

Распределение компонентов солевого состава перед ледоставом (30 октября — 2 ноября 1989 г.), мг/л. (Э — мкСм/см, Ж — мг-экв/л)

№ ст.	Э	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Ж	СГ	SO ₄ ²⁻
1	321	52.2	19.3	4.22	9.5	24.7
2	346	44.6	19.1	3.82	22.4	39.7
3	307	36.4	18.6	3.37	22.1	39.5
4	337	37.8	20.3	3.58	21.5	42.0
5	309	36.0	18.6	3.35	29.3	47.0
6	374	38.8	22.4	3.81	36.2	59.7
7	300	36.8	16.6	3.22	28.9	43.5
8	297	33.4	18.5	3.21	21.5	42.0
9	734	90.2	28.4	6.89	80.7	86.5
10	321	50.0	11.3	3.44	21.9	42.5
11	415	63.0	23.4	5.10	20.9	46.5
14	281	34.8	17.4	3.19	20.8	41.2
15	312	37.0	17.5	3.31	23.4	41.2
16	749	97.0	28.2	7.20	88.1	109

(см. Внутренняя биогенная нагрузка). Соотношение этих противоборствующих сил, одна из которых постоянно направлена на увеличение минерализации, а другая — на понижение путем перемешивания с менее солеными водами центральной части и определяет конкретную ситуацию в этом районе в тот или иной период.

Таким образом, вся совокупность приведенных выше данных указывает на то, что весь юго-западный район озера от южного края г. Ростова у Яковлевского монастыря до устья Сары подвергается воздействию очень жестких вод. В некоторых случаях (в зависимости от расходов воды в реках и погодных условий) это влияние простирается на довольно значительные расстояния, в других ситуациях — оканчивается в прибрежной зоне. Многочисленные примеры, иллюстрирующие это положение можно подобрать в таблицах приложений.

4.2.2. Количественные связи между компонентами солевого состава. Качественные связи между отдельными химическими показателями водных масс рассматриваемого водоема были подмечены давно. «В озере Неро главная масса CO_2 связана с кальцием и магнием... Поэтому вполне естественно, что изменения в содержании CO_2 , в частности бикарбонатной, идет по сезонам параллельно изменению жесткости воды: жесткость летом минимальна, зимой, наоборот, достигает максимума» (Гресе, 1929). Другим косвенным доказательством наличия связи между компонентами солевого состава является отнесение воды Неро к карбонатно-кальциевому классу. Полученные в ходе многолетних комплексных исследований обширные экспериментальные данные позволяют придать количественный характер не только декларированным связям между указанными выше показателями, но и по многим другим компонентам. Статистическая обработка цифрового материала показывает, что между жесткостью и щелочностью ($r=0,86$), содержанием кальция и суммой карбонатов и гидрокарбонатов ($r=0,89$) действительно существует высокая степень корреляции, которую можно было ожидать на основании вышеприведенных рассуждений. Соответствующие регрессионные уравнения имеют вид:

$$Ж = (0,41 + 1,09 Щ) \text{ и } Ca = 9,10 + 0,30 \text{HCO}_3^-,$$

где Ж — жесткость воды в мг-экв/л, Щ — щелочность, т. е. суммарное содержание бикарбонатов и карбонатов, выраженное в мг/л HCO_3^- .

Аналогичные связи характерны и для многих других компонентов. В очень высокой степени коррелированы естественные пары показателей «кальций — жесткость», «кальций — сумма катионов», «кальций — сумма анионов», «кальций — сумма ионов», «гидрокарбонаты — сумма анионов» и ряд других (табл. 2.11).

Таблица 2.11

Коэффициенты корреляции между характеристиками солевого состава ($\Sigma_{\text{к}}$, $\Sigma_{\text{а}}$, $\Sigma_{\text{и}}$ — сумма катионов, анионов и всех ионов соответственно, Ж — жесткость, Э — электропроводность)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1. Na	1.00	.65	.66	.81	.96	.82	.69	.86	.72	.82	.89
2. Ca	.65	1.00	.69	.96	.62	.52	.89	.92	.96	.82	.93
3. Mg	.66	.69	1.00	.83	.61	.58	.77	.85	.84	.76	.83
4. $\Sigma_{\text{к}}$	.81	.96	.83	1.00	.74	.67	.86	.94	.98	.87	.97
5. Cl	.96	.62	.61	.74	1.00	.87	.67	.88	.68	.79	.90
6. SO_4	.82	.52	.58	.67	.87	1.00	.65	.85	.59	.71	.82
7. HCO_3	.69	.89	.77	.86	.67	.65	1.00	.93	.91	.88	.92
8. $\Sigma_{\text{а}}$	.86	.92	.85	.94	.88	.85	.93	1.00	.96	.98	.99
9. Ж	.72	.96	.84	.98	.68	.59	.91	.96	1.00	.89	.96
10. Э	.82	.82	.76	.87	.79	.71	.88	.98	.89	1.00	.99
11. $\Sigma_{\text{и}}$	.89	.93	.83	.97	.90	.82	.92	.99	.96	.99	1.00

Приведем некоторые полезные регрессионные уравнения при $p = 0,05$:

$$\Sigma_{\text{а}} = -14,5 + 6,84 \text{ Ca} \quad (r = 0,93)$$

$$\Sigma_{\text{а}} = 8,97 + 3,85 \Sigma_{\text{к}} \quad (r = 0,97)$$

$$\Sigma_{\text{а}} = 3,1 + 1,31 \Sigma_{\text{и}} \quad (r = 0,99)$$

$$\Sigma_{\text{к}} = -0,2 + 20,8 \text{ Ж} \quad (r = 0,98)$$

$$\text{Cl} = -15,8 + 3,23 \text{ Na} \quad (r = 0,96)$$

Наличие близкой к функциональной связи между концентрациями натрия и хлоридов ($r = 0,96$) наглядно подтверждает идентичность их источников генезиса. Практически достоверно можно восстанавливать значения суммы анионов ($r = 0,98$) и суммы всех ионов ($r = 0,99$) по электропроводности: это вполне понятно, так как величина электропроводности всецело зависит от количества веществ, находящихся в диссоциированном состоянии. И в целом связи между электропроводностью и другими характеристиками солевого состава воды являются наиболее полезными с практической точки зрения, поскольку по легко измеримому параметру позволяют вести оценку других, менее доступных.

Для более грубой оценки суммы ионов в оз. Неро по величинам электропроводности можно использовать и полученную на основании простой калибровки формулу: $\Sigma_{\text{и}} = 1,25 \Sigma_{\text{и}}$.

Приведенные связи получены на основании обработки цифрового материала по всем станциям и во все сезоны. Если исключить из рассмотрения речные воды, по своим характеристикам отличающиеся от собственно озерных, то корреляции между рядом компонентов оказываются несколько выше.

Приведенные зависимости между указанными компонентами для озера Неро, как и для верхневолжских водохранилищ (Бикбулатов и др., 2001) позволяют:

1. Провести проверку результатов полевых и лабораторных измерений параметров качества воды с высокой степенью надежности, обращая особое внимание на все случаи отклонений значений за пределы вероятной погрешности измерений, которые могут быть вызваны как изменением состава воды в результате локального загрязнения, так и ошибками измерений.

2. С большой вероятностью восстанавливать значения тех характеристик, в наблюдениях за которыми имеются пропуски.

3. При необходимости заменять одни характеристики гидрохимического режима другими, что особенно важно в случаях нерегулярных наблюдений за какими-либо отдельными параметрами.

В заключение этого раздела заметим, что первые немногочисленные анализы по ионному составу воды оз. Неро, хотя ограничивались данными по жесткости, бикарбонатам и хлоридам и были сильно разорваны во времени, позволили получить правильные, в главных чертах, представления о его гидрохимическом режиме (Гресе Б. С., 1929). В 1948 г. постом ГМС в г. Ростове были проведены более обширные наблюдения. Они велись в различные сезоны и по более широкому кругу параметров (табл. 2.12).

Таблица 2.12

Ионный состав воды озера в 1948 году, мг/л

Дата	Катионы			Анионы			Жесткость		Сумма ионов
	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na+K	HCO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	Cl	град.	мг-экв	
26.02	90.2	26.6	-	-	34.9	34.0	18.7	6.69	-
23.03	91.8	26.9	-	-	37.5	48.0	19.0	6.79	-
22.04	30.0	7.4	2.8	110	13.3	5.0	5.9	2.11	168
28.05	33.2	10.7	14.5	134	19.9	18.0	7.1	2.54	231
12.08	34.3	11.2	-	-	29.6	35.0	7.4	2.63	-
11.11	53.7	18.7	-	-	47.6	53.0	11.8	4.22	-

Были получены необычные для пресноводных экосистем средней полосы России соотношения ионов Na + K > Mg (в мае) и Cl > SO₄ в течение большей части года (табл. 2.12). Являлось ли данное положение

справедливым для оз. Неро только в 1948 г. или это характерная особенность его гидрохимического режима?

Не проясняют эту ситуацию и результаты анализов 1963—1965 гг. (Фортунатов, Московский, 1973). В соответствии с ними 13—14 марта 1963 г. «сумма ионов в несложных образцах воды характеризовалась величинами от 468 до 589 мг/л при общей жесткости 5,28—6,57 мг-экв/л (14,8—18,4°). Электропроводность достигала 469—599 мкСм/см. В сентябре 1963 г. сумма ионов равнялась 234 мг/л, жесткость 2,47 мг-экв (6,9°), электропроводность 254 мкСм/см».

В 1982 г. на озере был открыт пункт 4-й категории за контролем качества воды. Имелась одна вертикаль, расположенная в 0,4 км по А164° от озерного гидрологического створа в г. Ростове, где эмалированным ведром отбирались пробы с поверхностного горизонта (0,2—0,5 м). Определение солевого состава проводила Городецкая лаборатория по контролю за загрязнением воды Волжской ГМО (табл. 2.13). Базируясь на приведенных данных, был сделан априори неожиданный вывод: в 1984 г. «вода озера в течение года, кроме осеннего периода, относилась к гидрокарбонатному классу группы кальция; в период осенних паводков — к гидрокарбонатному классу группы натрия» (Ежегодник, 1986). Там же отмечается, что в 1985 г. «вода в озере в течение года относилась к гидрокарбонатному классу группы кальция». Однако при использовании приведенного цифрового материала нужно иметь в виду, что содержание Na + K находилось по разнице между суммой анионов и катионов, вследствие чего на этот показатель падают все аналитические ошибки, допущенные при обработке проб, и поэтому они крайне ненадежны. Соответственно ненадежны и выводы, опирающиеся на такие результаты. По крайней мере, в средней полосе России до сих пор не встречалось водоемов, меняющих свой класс в зависимости от сезона.

Таблица 2.13

Химический состав озерной воды в 1984—1985 гг., мг/л
(Ежегодник, 1986 г.)

Дата отбора	Na-K	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Ж, мг-экв/л	Cl	SO ₄ ²⁻	HCO ₃	Сумма ионов
01.03.84	25,5	97,1	28,2	7,16	28,0	30,0	418	629
06.05.84	40,0	44,2	12,2	3,20	37,5	42,2	178	355
03.08.84	20,5	20,4	11,7	1,98	15,2	33,6	103	205
04.10.84	69,8	48,1	16,5	3,76	59,4	44,5	243	481
05.03.85	19,0	77,0	19,9	5,48	8,2	20,0	341	487
06.05.85	17,8	28,5	10,7	2,30	14,0	25,6	128	227
04.08.85	11,2	13,3	10,1	1,49	2,6	20,6	92	151
06.10.85	0,2	37,4	10,3	2,71	20,0	25,6	101	195

4.2.3. Динамика минерализации. Как и для притоков в самом озере минимальные концентрации всех химических ингредиентов приходится на период весеннего половодья, максимальные — на зимнюю межень; динамика электропроводности, как и динамика жесткости воды, по которым имеется наибольшее число наблюдений, удовлетворительно отражают это положение (рис. 2.5, табл. 2. Приложения).

Среднегодовая величина минерализации близка к 240 мг/л; внутригодовые различия обычно не превышают 2—2,5 раз, но в отдельные годы они могут доходить до 4 раз и более. Например, жесткость воды зимой 1988 г. на многих станциях превышала 6 мг-экв/л, а по р. Вексе вытекала придонная вода с жесткостью даже 7,2 мг-экв/л, тогда как летние значения находились в пределах 2,2—2,9 мг-экв/л. Аналогичная ситуация повторилась в 1991 г. (табл. 2. Приложения).

Такие же и даже еще больше изменения в содержании солей при переходе от лета к осени были зарегистрированы в ранние периоды

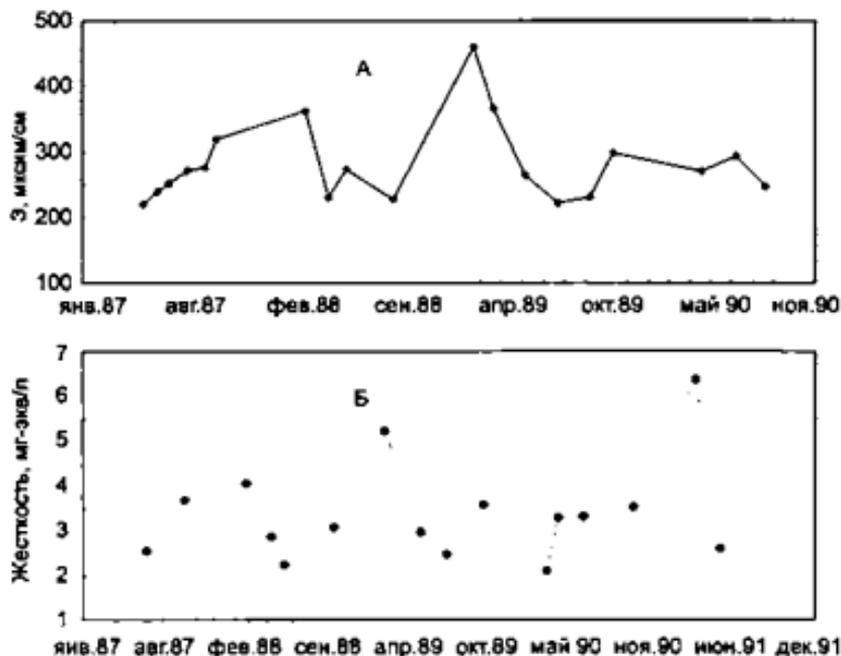


Рис. 2.5. Динамика электропроводности (А) и жесткости (Ж) воды в центральной части озера (ст. 4)

исследований озерной экосистемы. Материалы для «пелагической» части озера 1926—1928 гг. показали, что летом жесткость воды минимальна, зимой достигает максимума; различия превышают 3-кратную величину (табл. 2.14). Немногочисленные наблюдения над содержанием бикарбонатов в открытой части озера 28.06 и 25.07.28 г. привели к малоотличающимся величинам (285—294 мг/л). Резкий рост их концентрации отмечался зимой; единственный анализ в конце ледостава (25.03.28 г.) показал необычайно высокое значение (1050 мг/л). Сезонные колебания ионов хлора в эти годы были невелики.

Таблица 2.14

Динамика жесткости (Ж, градусы) в пелагической части озера в 1926—1928 гг.

Дата	1926		1927		1928			
	11.06	12.07	12.03	28.06	28.06	27.07	1.08	3.08
Ж	5.4	4.9	16.8	8.1	5.9	5.8	6.35	5.5

О резком повышении жесткости свидетельствуют и материалы, полученные в 1948 г. (табл. 2.12). Общая жесткость зимой более чем в 3 раза превышала весенние значения. Вполне естественно, что то же самое относилось к кальцию и магнию. Содержание хлор-иона в течение года менялось более редко — до 10 раз. Минерализация озерной воды в апреле и августе была на уровне, а в конце мая даже ниже аналогичного показателя для верхневолжских водохранилищ.

В 1984 г. минерализация воды оз. Неро менялась в пределах 205—629 мг/л, а в 1985 г. от 151 до 487 мг/л, в обоих случаях достигая максимума в зимний период (табл. 2.13). Необычно велики амплитуды колебаний концентрации кальция — весенние значения отличаются от зимних в 7,3 раза и жесткости — почти в 5 раз. Особенно разительны колебания в данной точке содержания хлоридов — более чем в 14 раз и суммы натрия и калия — более 350 раз! Как мы уже отмечали, для оз. Неро это приводит к крайне неожиданному результату — смене химического класса вод в зависимости от сезона, что крайне маловероятно.

Столь значительные межсезонные вариации вызываются множественным причинами. Вполне очевидно, что весеннее наполнение талыми снеговыми водами приводит к достаточно низким концентрациям основных элементов ионного состава. По мере их вытеснения более минерализованными водами притоков происходит увеличение содержания солей в самом озере, которое продолжается до конца ледостава. На эти присутствующие всем водоемам средних и высоких широт процессам в оз. Неро накладываются и другие, которые по своей значимости в отдельные сезоны года могут принять главенствующее положение. Можно указать

на следующие основные причины резкого увеличения соледержания в зимний период:

1. Вымораживание. Этот процесс для мелководных водоемов, подобных оз. Неро, имеет существенное значение. При наблюдаемой на озере мощности ледяного покрова (60—70 см) и общей средней глубине озера 1,5 м (90% обеспеченность) может приводить к концентрированию всех компонентов в 1,3 и более раз.

2. Вынос солей из донных отложений. Интенсивное разложение богатых органическими веществами илов даже в условиях низких температур приводит к выделению большого количества газообразной CO_2 , которая немедленно вступает в реакцию с твердым осадком CaCO_3 , в результате чего образуется и в заметных количествах поступает в воду хорошо растворимый бикарбонат кальция. Кроме того, создающаяся зимой в илах анаэробная обстановка способствует восстановлению малорастворимых соединений трехвалентного железа и других металлов с переходом их в более подвижные образования, которые, попадая в водную фазу, также пополняют ее химическими компонентами.

3. Приток притокам в озеро более минерализованных вод зимой межени. Однако из-за малых расходов рек в зимнюю межень и соответственно небольшого водообмена они, по всей вероятности, не могут оказать значительного влияния на величину минерализации.

В совокупности первые два процесса способны обеспечить наблюдаемое в озере возрастание минерализации при переходе с осеннего на зимний период. Летнее повышение общего содержания растворенных компонентов, особенно в плевсах, связано, главным образом, с вытеснением образовавшихся весной озерных водных масс более минерализованными водами притоков, расходы которых в мае-июне остаются еще заметными.

Наряду с процессами, ведущими к постепенному повышению соледержания в летне-осенний период, в оз. Неро происходят и процессы, направленные на уменьшение содержания и даже изъятие некоторых компонентов из водной фазы. В первую очередь следует указать на давно подмеченный процесс биогенного декальцинирования. «В озере Неро главная масса CO_2 связана с кальцием и магнием; в течение всего летнего периода идет очень энергичный процесс биогенного декальцинирования, чему служат наглядным свидетельством толстые корки извести, покрывающие листья рдестов... Летом, благодаря интенсивному фотосинтезу водорослей и макрофитов, происходит разложение бикарбоната кальция (и магния), благодаря чему жесткость воды понижается, а кальций откладывается в форме монокарбонатной извести на растениях, возможно, и прямо в воду и на дно.» (Грезе, 1929). Действительно, в зарослях высшей водной растительности, особенно обильной в юго-восточной части, всегда можно встретить стебли и листья живых растений ниже уровня воды

покрытые толстым слоем налета различных оттенков коричневого цвета и даже их целые окаменевшие останки. Несомненно, этот осадок образован очень малорастворимым карбонатом кальция с примесью глинистых частиц. Хорошо известно, что при интенсивном фотосинтезе быстро исчезает легкодоступный растениям газообразный диоксид углерода и они начинают разлагать бикарбонаты (реакция проходит по уравнению: $2\text{HCO}_3^- \rightarrow \text{CO}_3^{2-} + \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$) и для конструктивного и энергетического обмена потребить CO_2 , входящий в его состав. При этом рН может увеличиваться и возрастает до значений, превышающих 9 единиц. Образовавшийся карбонат-ион реагирует с кальцием и по достижении произведения растворимости CaCO_3 начинает выпадать в виде твердого осадка. На поверхности растений продукционные процессы наиболее развиты, вследствие чего заметная часть карбоната кальция остается прямо на местах своего образования в виде налета извести, а другая выпадает на дно водоема. К этому нужно добавить, что прямых экспериментальных доказательств биогенного декальцинирования воды по приведенному механизму в силу трудности количественной оценки масштабов протекания процессов осадки кальция в результате протекания биологических процессов для такой сложной экосистемы, каким является оз. Неро, до сих пор не имеется.

Вторым процессом, обеспечивающим сдерживание повышения минерализации в озере в летний период, следует считать частичное разбавление водами атмосферных осадков. Для зоны небольшого избыточного увлажнения, в которой расположено оз. Неро, превышение осадков над испарением составляет около 10%. В водном балансе эта величина не играет значительной роли, поэтому снижением концентрации солей за счет простого разбавления можно пренебречь.

Глава 5

МИКРОЭЛЕМЕНТЫ

Из множества элементов, входящих в эту группу, особняком стоит железо, концентрация которого нередко не уступает главным ионам. Железо всегда присутствует в природных водах, поскольку широко распространено в природе (кларк = $5,1 \cdot 10^{-4}$), где встречается не только в виде залежей, но и в состоянии повсеместного рассеяния в горных породах. Другие элементы этой группы содержатся, как правило, в микрограммовых концентрациях.

5.1. Железо

Распределение железосодержащих соединений по акватории озера довольно равномерное (табл. 2.15). Выделяются лишь приустьевые участки рек, а также зимние придонные воды центральной части озера, которые почти в 2 раза более богаты железом. В конце марта 1988 г. в поверхностной воде глубоководного участка (ст. 4) содержалось 0,33 мг/л, тогда как на глубине 3,5 м — 0,54 мг/л. Отличий в содержании железа в юго-западном и юго-восточном районах, по сравнению с другими участками, как это было характерно для многих других компонентов, не обнаружено; только летом 1989 г. в пору интенсивной вегетации вышней водной растительности и фитопланктона на ст. 12 встретились повышенные концентрации. Минимальные концентрации приурочены к весне и поздней осени, а максимальные приходятся на межень.

Среднегодовое содержание железа составляет 0,28 мг/л (табл. 2.15), что намного меньше, чем в смеси питающих его речных вод Сары и Ишни. Это означает, что озеро должно было бы задерживать и захоронять в донных отложениях более половины поступающего железа.

Таблица 2.15

Распределение и динамика валового содержания железа, мг/л
(по данным Степановой И. К)

№ ст.	1987 г.						1988 г.				Ср.
	13.04	20.05	15.06	07.07	15.09	06.10	23.03	08.05	07.06	18.10	
1	0.24	0.57	0.69	0.88	0.35	0.40	0.63	2.02	0.54	0.58	0.69
2	1.36	-	-	0.17	0.35	0.26	0.92	0.52	0.82	0.28	0.58
3	0.18	0.90	0.09	0.09	0.39	0.17	0.12	0.36	0.25	0.16	0.27
4	0.25	0.04	0.11	0.14	0.28	0.33	0.33	0.44	0.36	0.13	0.24
5	1.40	0.10	0.09	0.14	0.30	0.25	0.38	0.38	0.44	0.14	0.36
6	2.06	0.25	0.10	0.29	0.27	0.29	0.45	0.37	0.53	-	0.51
7	-	0.04	0.15	0.13	0.22	-	0.13	0.29	1.10	0.19	0.28
8	0.93	0.11	0.12	0.17	0.23	-	0.29	0.40	0.35	0.15	0.30
9	-	0.41	0.18	0.21	0.18	0.12	0.59	0.39	0.46	0.18	0.30
10	-	0.13	0.08	0.16	0.3	0.11	0.26	0.60	0.35	0.16	0.24
11	-	0.58	0.10	0.19	0.19	0.04	0.49	0.36	0.37	0.20	0.28
12	-	0.42	0.20	0.24	0.24	0.09	0.24	0.66	0.69	0.19	0.33
14	-	0.09	0.12	0.07	0.19	0.10	0.24	0.32	0.42	0.16	0.19
15	-	-	0.13	0.18	0.30	0.21	0.17	0.35	0.34	0.19	0.23
16	-	-	0.67	-	-	-	0.74	0.63	0.55	0.54	0.62

Однако существующие в течение продолжительного времени анаэробные условия способствуют растворению оксидов и фосфатов железа и выносу их в водную фазу. Со стоком р. Вексы в среднем уносится немного меньше железа, чем его поступает, и поэтому в озере накопления соединений Fe в ощутимых масштабах, по-видимому, не происходит.

В динамике концентрации железа в р. Саре наблюдаются два характерных пика. Один приходится на раннюю фазу весеннего половодья, другой — на летнюю межень, причем первый значительно превосходит второй (рис. 2.6).

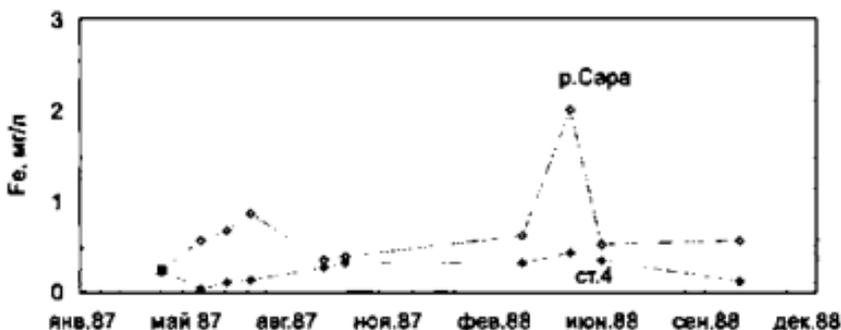


Рис. 2.6. Динамика общего содержания железа в воде р. Сары и в центральной части оз. Неро (ст. 4)

Формы нахождения железа в природных водах разнообразны. При низких pH и отсутствии в среде кислорода, т. е. в условиях характерных для оз. Неро в подледный период, оно должно присутствовать в двухвалентной форме в виде гидрокарбоната или гидрата закисного железа и только отсутствие измерений зимой не позволило констатировать их наличие прямым способом. При достаточной аэрации соединения двухвалентного железа окисляются и превращаются в малорастворимый гидрат окиси железа, поэтому из форм существования трехвалентного железа в озере максимальной величиной обладает взвешенная, на долю которой в весенних водах чаще всего приходилось свыше 90% общего количества (табл. 2.16). Причины, по которым на ст. 5, в отличие от большинства других, весной 1987 г. преобладало растворенное железо, не ясны. Близость этой станции к истоку сказалась и на соотношении растворенных и взвешенных форм в р. Векса, где в виде твердых частичек, размером свыше 0,5 мкм, находилось менее двух третей общего количества (табл. 2.16). Еще более высокие концентрации железа в виде его истинных растворов встречаются в юго-западной части, известная обособленность которой даже весной не способствует быстрому водо-

обмену. Здесь относительно длительное время может сохраняться водная масса, поступающая с солоноватоводной р. Кучиבוшь, дренирующей множество заболоченных участков, в которых железо в значительной своей части может быть связано с органическим веществом и поэтому мигрировать в виде органо-минеральных или хелатных комплексов. Не исключена возможность кратковременного создания в этом районе и особых восстановительных условий, способствующих переходу малорастворимых окисных форм железа в более легко растворимые закисные формы.

Таблица 2.16

Формы нахождения трехвалентного железа в воде оз. Неро
19—22 мая 1987 г., мг/л (по данным Степановой И. К.)

№ ст.	Растворенное	Взвешенное	Общее	Взвешенное/ Общее, %	Взвеси, мг/л	Общее/ Взвеси, %
1	0.05	0.52	0.57	91	11.2	4.6
2	0	0.18	0.15	100	12.2	1.5
3	0.05	0.85	0.90	94	35.2	2.4
4	0.01	0.05	0.05	100	10.7	0.5
5	0.05	0.04	0.10	40	10.5	0.4
6	0.12	0.16	0.25	64	14.8	1.1
7	0.01	0.04	0.04	100	9.1	0.4
8	0	0.10	0.11	91	15.7	0.6
9	0	0.34	0.41	83	17.6	1.9
10	0.01	0.13	0.13	100	11.5	1.1
11	0	0.14	0.58	22	11.6	1.2
12	0.04	0.44	0.42	100	10.7	4.1
13	0.02	0.24	0.25	96	11.5	2.0
14	0.01	0.09	0.09	100	11.3	0.8

В общем количестве взвешенных частиц на долю железа поздней весной 1987 г. приходилось не более 4,6%. Максимальные величины характерны для р. Сары и района заповедника (ст. 12) при примерно равном содержании взвесей на этих и других озерных станциях. Увеличение концентрации взвесей, как это случилось при свежей погоде на ст. 3, расположенной недалеко от песчаного острова, мало влияет на относительное содержание железа в пробах.

В составе растворенной формы могут находиться минеральные и органические железосодержащие соединения. В оз. Неро минеральная

фракция зафиксирована в очень небольших количествах лишь на нескольких станциях (табл. 2.17). Столь низкие концентрации, часто находящиеся на грани чувствительности анализа, заставляют относиться к ним как сугубо ориентировочным. Достоверным является то, что растворенная форма железа в главной своей части представлена органическими соединениями и, скорее всего, в виде хелатов.

Ранней весной 1988 г. как количество взвешенных частиц, так и общее содержание железа в них, почти на всей акватории было ниже, чем в более поздний весенний период 1987 г. Если рассматривать приведенные сроки как последовательные фазы в жизни водосема, то полученный результат будет являться следствием уменьшения скоростей течений при спаде половодья, однако следует помнить, что количество взвешенных частиц в оз. Неро во многом определяется ветровым режимом. В любом случае максимальные концентрации железа содержатся во взвесах речного генезиса, несмотря на то, что воды р. Сары и р. Ишни в отдельные периоды могут существенно различаться по общему количеству взвесей.

Таблица 2.17

Распределение различных форм железа ранней весной (8 мая 1988 г.), мг/л (по данным Степановой И. К). $Fe_{\text{орг}}$ — растворенное в органической форме, $Fe_{\text{мин}}$ — растворенное в минеральной форме, $Fe_{\text{раств}} = Fe_{\text{орг}} + Fe_{\text{мин}}$, $Fe_{\text{обв}}$ — сумма всех форм

№ ст.	$Fe_{\text{орг}}$	$Fe_{\text{мин}}$	$Fe_{\text{раств}}$	$Fe_{\text{обв}}$	$Fe_{\text{мин}} / Fe_{\text{раств}}, \%$	$Fe_{\text{орг}} / Fe_{\text{обв}}, \%$	Взвеш., мг/л	$Fe_{\text{обв}} / \text{Взвеш.}, \%$
1	0.065	0.098	0.163	2.02	40	8	33.4	6.0
2	0	0.052	0.052	0.52	0	10	22.5	2.3
3	0	0.020	0.020	0.36	0	6	18.6	1.9
4	0.013	0.039	0.052	0.44	25	12	19.8	2.2
6	0.025	0.035	0.060	0.37	42	16	15.2	2.4
7	0.014	0.041	0.055	0.29	25	19	16.1	1.8
8	0	0.062	0.062	0.40	0	16	18.0	2.2
9	0	0.103	0.103	0.39	0	26	17.7	2.2
10	0	0.059	0.059	0.60	0	10	21.4	2.8
11	0	0.064	0.064	0.36	0	18	14.9	2.4
12	0.025	0.033	0.058	0.66	43	9	14.9	4.4
14	0	0.038	0.038	0.32	0	12	12.3	2.6
15	0.025	0.029	0.054	0.35	46	15	16.8	2.1
16	0.038	0.042	0.080	0.58	48	11	12.4	4.6

5.2. Другие микроэлементы

Сведения по их содержанию в воде оз. Неро крайне скудны. Литературные данные практически отсутствуют. Имеющиеся в нашем распоряжении материалы, относящиеся к маю и июлю 1987 г., показывают, что их содержание в большинстве случаев не превышает фоновых значений, характерных для данного региона (табл. 2.18).

Таблица 2.18

Тяжелые металлы в воде оз. Неро, мкг/л

Элемент	05.87 г.	07.87 г.	Фон
Медь	1.1	1.0	3.0
Свинец	4.4	3.1	15
Кадмий	0.5	0.3	0.2
Никель	1.4	1.6	3.0
Цинк	8.5	13.0	10.0

Небольшие отклонения по цинку и кадмию трудно связать с каким-либо специфическим загрязнением, к тому же они настолько малы, что не вызывают особой тревоги.

Глава 6

БИОГЕННЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ

Озеро Неро, как и любой другой водоем, являясь средой обитания гидробионтов, должно обеспечивать их достаточным количеством питательных и других необходимых для нормальной жизнедеятельности химических компонентов. Обитателям водных пространств в дополнение к трем основным жизненно важным элементам — углероду, водороду и кислороду — требуются еще не менее 19; многие из них в ничтожно малых количествах. В сравнительно заметных масштабах водоросли и другие организмы потребляют натрий, кальций, магний, кремний, серу, азот и фосфор. Недостаток любого из них ограничивает развитие гидробионтов. В подавляющем большинстве водных экосистем лимитирующими биогенами выступают фосфор и азот (в меньшей степени), поэтому основное внимание мы уделяем этим двум элементам и формам их нахождения в воде.

6.1. Соединения азота и фосфора

6.1.1. Зимний режим. Зимнее распределение общего содержания биогенных элементов, в отличие от консервативных макрокомпонентов солевого состава, даже в основной части акватории озера неравномерное; размах варьирования достигает 2 раз по азоту и превышает 4-кратную величину для фосфора (табл. 2.19). При этом повышенные концентрации приурочены как к участкам, прилегающим к городской черте (ст. 8), так и к районам, находящимся на значительном удалении от города (ст. 10, 11, 15). Такой характер распределения общего азота и фосфора в воде не позволяет связать его с бытовым или промышленным загрязнением. Повидимому, основной причиной заметных пространственных различий в содержании биогенов являются отличия в составе донных отложений, которые в анаэробных условиях, характерных для зимы, отдают в воду разные количества растворимых форм азота и фосфора. Реки Сара и Ишня (ст. 1 и 16) зимой несут воды менее обогащенные биогенными элементами. Причины здесь очевидны: донные отложения этих рек в основном представлены песчанистыми грунтами, которые бедны лабильными органическими соединениями и поэтому не в состоянии поставлять в водные массы значительные количества питательных веществ. Влияние стока р. Сары распространяется только на участки, непосредственно прилегающие к ее устью (ст. 2).

На органические азотсодержащие соединения падает существенная доля (до 50%) общего азота. Необычно велико их содержание (свыше 60%) в районе, почти полностью окруженном «лесом» отмерших остатков высшей водной растительности (ст. 12). Донные отложения здесь в основном представлены различных размеров и форм органоминеральными частицами. Главным образом это частично разрушенные стебли растений, состоящие из лигниноподобных структур, трудно поддающихся бактериальному разложению. Попадая в водную фазу в результате процессов лизиса, эти структуры увеличивают пул органического азота, а большая их устойчивость к микробальной трансформации, в частности аммонификации, создает условия, ведущие к относительно низкому содержанию минеральных форм азота (табл. 2.19). То же относится к фосфорсодержащим соединениям. Несколько повышенная по сравнению с другими озерными участками, частность в этом районе также указывает на наличие относительно больших концентраций гумусовых веществ.

Зимой основную массу азотсодержащей компоненты, за исключением р. Сары и непосредственно примыкающего к ее устью участка (ст. 1,2), составляют неорганические формы. Среди них преобладающая роль принадлежит солям аммония, которые образуются в процессах аммонификации органических веществ в воде и донных отложениях. Анаэробные условия зимнего периода исключают возможность дальнейшей трансформации этой компоненты по классическому пути

с последовательным переходом в нитриты и нитраты, поэтому содержание последних на большей части акватории озера мало (табл. 2.19). Концентрации нитритов находятся на уровне, близком к чувствительности анализа; повышенные их содержания встречаются на относительно обособленных участках в юго-восточной (ст. 12) и юго-западной (ст. 11) частях озера и в районе, расположенном поблизости от городской черты (ст. 8). Примечательно, что даже в начале февраля, когда содержание кислорода сведено до минимума, в центральной глубоководной части озера (ст. 4) активно идут процессы нитрификации (по-видимому, в микроаэрофильных условиях), о чем свидетельствуют закономерные изменения содержания аммиака, нитритов и нитратов с глубиной (рис. 2.7, табл. 2.19).

Таблица 2.19

Распределение азот- и фосфорсодержащих соединений
2—6 февраля 1989 г., мг/л

№ ст	NH_4^+	NO_2^-	NO_3^-	$\text{N}_{\text{ам}}$	$\text{N}_{\text{нр}}$	PO_4^{3-}	$\text{P}_{\text{ам}}$	$\text{P}_{\text{нр}}$	N:P
1	0.18	0.004	0.46	0.83	0.19	0.030	0.041	0.011	20.2
2	0.12	0.005	0.52	0.83	0.18	0.029	0.038	0.009	21.8
3	0.76	0.02	0.22	1.41	0.41	0.024	0.051	0.027	27.6
4 пов	0.72	0.026	0.17	1.47	0.55	0.007	0.026	0.019	56.5
4: 1,2 м	0.75	0.019	0.18	1.47	0.52	0.008	0.026	0.018	56.5
4: 1,7 м	1.02	0.014	0.11	1.50	0.36	0.009	0.033	0.024	45.5
4: 2,2 м	1.28	0.009	0.07	1.60	0.24	0.010	0.042	0.032	38.1
4: 3,0 м	1.84	0.004	0.02	2.30	0.44	0.016	0.057	0.041	40.4
5	1.06	0.004	0.03	2.23	1.16	0.009	0.044	0.035	50.7
6	1.27	0.005	0.02	2.08	0.78	0.023	0.047	0.024	44.3
7	1.16	0.005	0.06	1.96	0.73	0.017	0.071	0.054	27.6
8	1.06	0.017	0.35	2.87	1.44	0.019	0.100	0.081	28.7
9	1.02	0.005	0.06	2.02	0.93	0.014	0.041	0.027	49.3
10	1.72	0.003	0.01	2.42	0.68	0.056	0.064	0.008	37.8
11	0.94	0.015	0.46	2.03	0.61	0.025	0.046	0.021	44.1
12	0.44	0.018	0.13	1.48	0.89	0.033	0.087	0.054	17.0
14	0.90	0.009	0	1.73	0.82	0.069	0.086	0.017	20.1
15	1.28	0.003	0	2.43	1.15	0.009	0.021	0.012	115
16	0.50	0.004	0.16	1.11	0.45	0.045	0.090	0.045	12.3

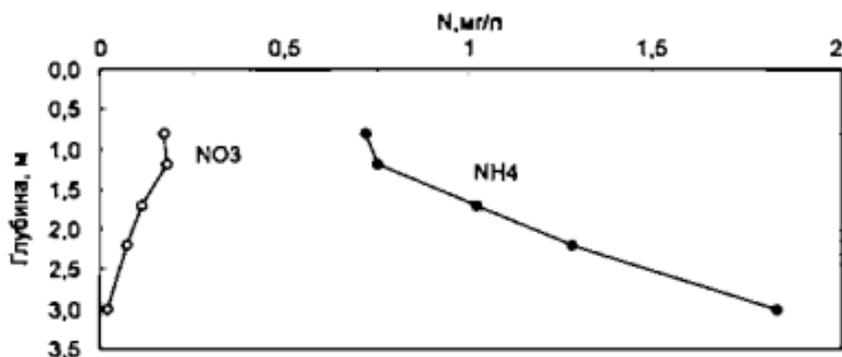


Рис. 2.7. Изменение содержания нитратного и аммонийного азота с глубиной в центральной части озера 5 февраля 1989 года

Постоянно поступающие из донных отложений и диффундирующие в вышележащие слои ионы аммония перехватываются бактериями нитрификаторами и превращаются последовательно в нитриты и нитраты, что ведет к закономерному увеличению их концентраций в зависимости от интенсивности микробных процессов на соответствующих горизонтах. Особенно интенсивно эти процессы идут в верхних слоях воды, где, по всей вероятности, выше содержание кислорода. Процессы нитрификации охватывают значительные объемы воды и прослеживаются до глубин, превышающих 2,2 м, при общей мощности слоя воды 3,5 м (табл. 2.19). Параллельно идут и процессы денитрификации, ведущие к потере азота из водной фазы в молекулярной форме или в форме закиси азота (N_2O): на это указывают большая разница между содержанием аммонийного азота в придонном и поверхностном горизонтах, не компенсируемая прибылью нитритов и нитратов. Наиболее интенсивно денитрификация протекает в глубоководных слоях (от 2,2 до 3,0 м), где убыль азота составляет около 0,5 мг/л. Простой подсчет, основанный на балансе масс в поверхностном и придонном горизонтах, показывает, что таким образом может тратиться до 50% неорганических форм или до трети общего азота. Этот безусловно положительный для оз. Неро процесс, по-видимому, ограничен жесткими временными рамками и имеет место только тогда, когда создаются микроаэрофильные условия. Кроме того, этот процесс должен быть локализован и в пространстве; на литоральных станциях с небольшими глубинами, расположенных над илами с высоким содержанием органического вещества, можно ожидать быстрого (через несколько недель или даже дней после ледостава) исчерпания кислорода во всей водной толще и переходу на полностью анаэробный режим, в котором уже нет места процессам нитрификации и денитрифи-

кации. На станциях с большими глубинами потребление кислорода длится гораздо дольше (по крайней мере до середины февраля в 1989 г. еще сохранялись измеримые количества кислорода) и постепенно создаются условия для нормального протекания обсуждаемых процессов. Процессы нитрификации и денитрификации в подледный период являются весьма характерными для оз. Неро и, по-видимому, в тех или иных масштабах протекают ежегодно. По крайней мере в конце марта предыдущего 1988 г. мы имели ситуацию, очень схожую с описанной выше, т. е. более чем двукратное снижение на поверхности аммонийного и немногим менее 2 раз — общего азота (табл. 3. Приложения). В целом же для выявления масштабов процессов, связанных с круговоротом азота, и установления их значимости для функционирования данной озера экосистемы требуются серьезные дополнительные исследования. Здесь же мы впервые обращаем внимание на само существование подобных процессов в оз. Неро и делаем лишь очень грубые прикидки относительно их масштабов и значимости.

Весной, с увеличением расходов р. Сары, ее более теплые, а потому и более легкие и насыщенные кислородом воды, постепенно продвигаются к центральному району, находящимся еще под ледяным покровом. По мере продвижения они смешиваются с обескислороженными за долгий зимний период другими водными массами и обогащают их, особенно верхние слои, кислородом (см. Кислородный режим). К концу марта происходит заметное увеличение концентрации O_2 в поверхностных слоях пелагиальной части озера, т. е. на горизонтах и в районе, где протекают процессы нитрификации и денитрификации. Дополнительный подток кислорода и повышение температуры должны способствовать усилению этих процессов, а возможно даже распространению их на более обширные области. Об увеличении скоростей обсуждаемых процессов свидетельствует то, что к концу марта в поверхностном горизонте мы имеем почти на 45% меньшую концентрацию общего азота по сравнению с придонным слоем, что заметно выше по сравнению с февральскими данными для той же самой станции (табл. 2.20).

В горизонтальном распределении биогенных элементов можно выделить следующие черты; заметное увеличение общей концентрации азотсодержащих соединений в реках Сары и Ишне (ст. 1, 16) и их притурьевых участках (ст. 2, 9) преимущественно за счет нитратной формы, что может быть обусловлено не иначе как поступлением с талыми снеговыми водами (табл. 2.20). Газообразные окислы азота, в большом количестве образующиеся при сжигании различных видов топлива, в том числе автомобильного, вымываются из воздушного пространства атмосферными осадками и за длительный зимний период концентрируются в виде нитратов в снежном покрове. Весеннее снеготаяние обеспечивает их поступление в водотоки (главным образом!) и далее в озеро.

Таблица 2.20

Распределение форм биогенных элементов перед вскрытием льда
(19—24 марта 1989 г.), мг/л

№ ст.	NH ₄ ⁺	NO ₂ ⁻	NO ₃ ⁻	N _{ам}	N _{орг}	PO ₄ ³⁻	P _{ам}	P _{орг}
1	0.27	0.028	1.32	2.49	0.87	0.090	0.122	0.052
2	0.19	0.008	0.83	1.78	0.75	0.055	0.131	0.076
3	0.37	0.007	0.58	1.49	0.53	0.028	0.053	0.025
4: 0,5м	0.67	0.110	0.37	1.82	0.67	0.020	0.029	0.009
4: 2,0м	1.02	0.110	0.14	2.07	0.80	0.019	0.050	0.031
4: 3,5м	2.00	0.006	0.02	3.33	1.30	0.067	0.107	0.040
5	1.12	0.040	0.22	1.72	0.34	0.021	0.059	0.038
6	1.20	0.027	0.18	2.36	0.95	0.062	0.071	0.009
7	0.62	0.030	0.17	1.94	1.12	0.013	0.048	0.035
8	0.70	0.030	0.09	1.86	1.04	0.018	0.084	0.066
9	0.48	0.016	1.58	2.99	0.91	0.100	0.132	0.032
10	0.78	0.020	0.08	1.44	0.56	0.023	0.055	0.032
11	0.22	0.008	2.15	2.64	0.26	0.028	0.050	0.022
12	0.42	0.020	0.32	1.38	0.62	0.026	0.047	0.021
14	0.64	0.048	0.29	2.23	1.25	0.026	0.042	0.016
15	0.51	0.038	0.18	2.05	1.32	0.014	0.044	0.030
16	0.35	0.026	1.91	3.20	0.91	0.047	0.094	0.047

Ход изменения фосфорсодержащих соединений в речных водах во времени носит аналогичный характер. На закрытом обособленном юго-восточном участке (ст. 12), как и на всей остальной акватории, куда еще не достигают речные талые воды, к концу марта не происходит каких-либо заметных изменений и сохраняется зимний режим. Наиболее поздние (по срокам отбора проб) исследования гидрохимической ситуации в оз. Неро непосредственно перед вскрытием льда относятся к началу апреля 1987 г. Они не только подтверждают сделанные выше выводы, но и наглядно показывают, как р. Сарга постепенно освобождается от основного питания за счет талых снеговых вод и переходит на обычный режим; концентрация в приустьевом участке общего азота в 1,5, а общего фосфора в 3 раза выше, чем в собственно речных водах (табл. 2.21). Кроме того, резкий градиент концентрации нитратного азота на центральной глубоководной станции между придонным и средним слоями и высокий содержание нитратов на поверхности свидетельствуют о том, что масштабы нитрификации могут быть еще более значительными, чем установленное выше.

Таблица 2.21

Распределение биогенных элементов 7—11 апреля 1987 г., мг/л

№ ст.	NO ₂ ⁻	N _{ам}	P _{ам}
1	1.55	1.65	0.095
2	2.20	2.40	0.310
4 пов.	0.80	1.75	0.055
сер.	0.55	1.65	0.075
дно	0.01	2.60	0.175
6	1.65	1.75	0.210
7	1.15	1.55	0.075

6.1.2. Весенний режим. После схода льда обогащенные зимой биогенными элементами озерные воды вытесняются водами половодья и к середине мая общая концентрация азотсодержащих соединений на всей акватории снижается в 1,5—3,7 раза (табл. 2.22). Относительно большим понижением (в 3—7 раза) характеризуются речные и притусьевые участки, в которых водообмен протекает быстрее, чем на собственно озерных

Таблица 2.22

Распределение биогенных элементов 11—16 мая 1989 г., мг/л

№ ст.	NH ₄ ⁺	NO ₂ ⁻	NO ₃ ⁻	N _{ам}	N _{ор}	PO ₄ ³⁻	P _{ам}	P _{ор}
1	0.070	0.014	0.300	0.88	0.50	0.040	0.088	0.048
2	0.045	0.004	0.054	0.88	0.78	0.047	0.080	0.033
3	0.025	0.004	0.026	1.03	0.97	0.028	0.064	0.036
4	0.025	0	0	1.30	1.27	0.010	0.070	0.060
5	0.030	0	0	0.99	0.96	0.005	0.071	0.066
6	0.050	0.008	0.047	1.08	0.97	0.005	0.088	0.083
7	0.030	0	0	1.05	1.02	0.017	0.058	0.041
8	0.026	0	0	1.07	1.04	0.011	0.074	0.063
9	0.025	0	0	0.88	0.86	0.010	0.059	0.049
10	0.025	0.008	0.089	0.95	0.85	0.004	0.039	0.035
11	0.025	0.002	0.004	1.27	1.24	0.003	0.047	0.044
12	0.035	0.001	0.014	0.89	0.84	0.012	0.070	0.058
14	0.025	0.007	0.061	0.90	0.81	0.007	0.062	0.055
15	0.040	0.008	0.057	0.92	0.82	0.007	0.042	0.035
16	0.045	0.004	0.120	0.87	0.70	0.090	0.095	0.005

станциях. Преобладающей формой (до 95%) к этому времени становится органический азот, что является результатом массового развития различных видов фитопланктонных организмов, в первую очередь, диатомовых и зеленых водорослей, которые начинают интенсивно размножаться сразу после вскрытия озера и к первой декаде мая обычно составляют основу живой биомассы (Ляшенко, 1991). Вторым результатом фотосинтетических процессов является практически полное исчерпание из водной среды неорганических форм азота. Без учета рек, где развитие планктонных первичных продуцентов существенно тормозится течениями и мало влияет на распределение форм биогенов, только на отдельных станциях юго-восточного плеса (ст. 14, 15) и вблизи городской черты (ст. 10) сохраняются ощутимые количества нитратов. Концентрации нитритов и аммонийного иона находятся близко к чувствительности методов их определений, которая составляет соответственно 0,002 и 0,02 мг/л по азоту. На всей акватории почти полностью исчерпываются и ортофосфаты (табл. 2.21). Таким образом создается необычная для подавляющего большинства озер мира ситуация — первичная продукция в оз. Неро oxyзывается лимитированной как по азоту, так и по фосфору.

Неслабую роль в создании таких условий должна играть высшая водная растительность, особенно погруженные и полупогруженные формы, которые из-за преобладания в озере мелководных участков и почти полного отсутствия пелагиали развиваются не только вдоль береговой линии, но и в открытых пространствах на большом удалении от берега, занимая большие площади (Довбня, 1991).

6.1.3. Летний и осенний режимы. Вывод о лимитировании первичной продукции сразу по двум биогенным элементам находит полное подтверждение в гидрохимической ситуации, складывающейся в озере в летний период (табл. 3. Приложения) и, более того, такое положение может сохраняться до глубокой осени (табл. 2.23). Как и всегда по содержанию любых компонентов резко выделяются реки и приустьевые участки, что не требует каких-либо дополнительных пояснений. С резким понижением температуры воды обычно происходит массовое отмирание водорослей, тела которых, состоящие из органических веществ, быстро атакуются водной микрофлорой и, подвергаясь бактериальной трансформации, в первую очередь выделяют в окружающую среду азотсодержащие соединения в аммонийной форме, которые легко обнаруживаются на других водоемах. Отсутствие этого продукта в заметных масштабах в воде даже в первой декаде ноября при одновременном отсутствии окисленных форм азота (и фосфатов) свидетельствует о том, что процесс аммонификации, по всей вероятности, наступает позже, возможно даже с началом ледостава. Весовые отношения общего содержания азота к фосфору, которые при незначительных концентрациях минеральных форм по существу являются соотношениями органических азот

и фосфорсодержащих компонентов, варьируют в интервалах от характерных для органического вещества фитопланктона среднего видового состава (8—11) до более бедных азотом видов, но никогда не достигают величин, характерных для чисто гумусового материала, для которого значения N:P обычно превышают 20 единиц (табл. 2.23). Максимальные значения присущи станциям юго-восточной части (ст. 14, 15), куда имеется подток болотных вод и ст. 12, в которой формирующаяся водная масса обогащена органическим веществом распадающейся высшей водной растительности с высоким отношением азота к фосфору.

Таблица 2.23

Распределение биогенных элементов в осенний период
(30.10—2.11. 1989 г.), мг/л

№ ст.	NH ₄ ⁺	NO ₂ ⁻	NO ₃ ⁻	N _{ам}	PO ₄	Робщ	N:P
1	0.060	0.007	0.270	1.60	0.030	0.086	18.6
2	0.035	0	0	1.14	0.003	0.146	7.8
3	0.035	0	0	1.97	0.002	0.155	12.7
4	0.022	0	0	1.80	0.004	0.120	15.0
5	0.050	0	0.014	1.74	0.004	0.157	11.1
6	0.065	0	0.037	1.66	0.004	0.173	9.7
7	0.030	0	0.016	1.97	0.004	0.152	13.0
8	0.035	0	0	2.27	0.004	0.165	13.8
9	0.050	0.007	0.620	1.46	0.102	0.106	13.8
10	0.025	0	0	1.12	0.003	0.126	8.9
11	0.055	0.006	0.200	1.57	0.004	0.118	13.3
12	0.020	0	0	1.90	0.004	0.120	15.8
14	0.015	0	0	2.16	0.004	0.116	18.6
15	0.015	0	0.004	1.92	0.004	0.113	17.0
16	0.070	0.009	0.720	1.12	0.100	0.110	10.2

6.1.4. Азот и фосфор в притоках. В основном притоке — р. Сарс, в отличие от основных озерных водных масс, практически во все сезоны преобладающей формой неорганического азота является нитратная (рис. 2.8). Особенно ярко это проявляется зимой, когда в строго аэробных условиях, всегда имеющих место в этом водотоке, процессы биохимической (в основном бактериальной) трансформации органических азотсодержащих соединений направлены в сторону образования наиболее окисленной формы азота. В это же время мы имеем и максимальные их концентрации, обусловленные не только исключительно описанным процессом, но и преимущественным подземным питанием рек, уже

содержащим азот в высшей степени окисления. Существование иона аммония в период зимней межени, возможно, обусловлено недостаточно высокими скоростями нитрификации при низких температурах, когда выделяющийся в результате аммонификации азот не успевает полностью превратиться в нитраты.

В конце зимы в р. Ишня содержание аммонийного азота значительно выше нитратного (рис. 2.9). Течение ее очень медленное (оно не регистрируется гидрологическими вертушками), донные отложения богаты органическим веществом, поэтому здесь могут создаваться условия, близкие к анаэробным. Непосредственным следствием этого является преобладание процессов аммонификации над нитрификационными, что и приводит к отмеченной ситуации. Весной приток свежих талых вод резко меняет обстановку на противоположную. Летом и осенью при открытой воде река «цветет», обе формы азота поглощаются развивающимся фитопланктоном и их концентрации падают до очень низкого уровня.

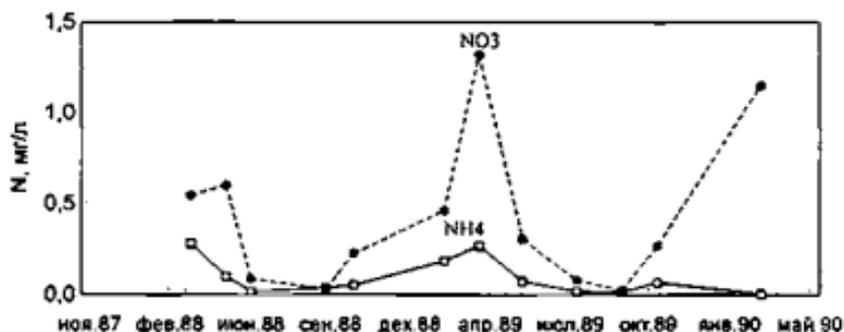


Рис. 2.8. Динамика нитратного и аммонийного азота в р. Сара

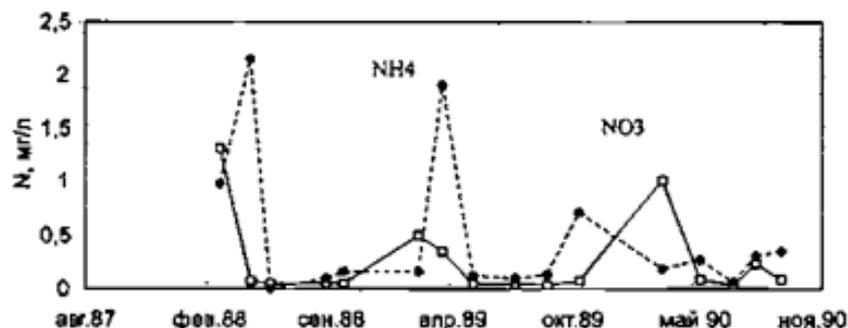


Рис. 2.9. Динамика нитратного и аммонийного азота в р. Ишня

Из фосфорсодержащих соединений во все сезоны года в р. Сары, в отличие от собственно озерных вод, в ощутимых количествах присутствует легкодоступный водным организмам, в первую очередь первичным продуцентам, ортофосфат. (рис. 2.10). Даже летом, несмотря на «цветение» реки, о чем косвенно свидетельствует высокая концентрация органической фракции фосфора (в 2 раза выше неорганической), количество фосфатов не падает ниже 30—40 мкг/л.

В р. Ишне ситуация несколько иная. В первую очередь необходимо отметить более сильные межгодовые вариации в концентрациях основных форм фосфорсодержащих соединений, что может быть вызвано относительно сильной и неравномерной биогенной нагрузкой антропогенного характера, особенно в летний период (рис. 2.11). Напомним, что пробы отбирались у невысокого моста, через который проходит трасса Москва-Ярославль с интенсивным автомобильным движением, а низкие берега в районе моста с удобными подъездными путями часто используются для мойки машин и купанья. Тем не менее, содержание фосфора в 1989 и 1990 гг. не превышало 100—150 мкг/л, что допустимо для многих видов водопользования и не является необычным для речных экосистем.

Биогенная нагрузка, испытываемая озером за счет стока р. Сары при 90% обеспеченности равной 177×10^6 м³/год, при среднегодовых концентрациях азота (2,5 мгN/л) и фосфора (0,1 мгP/л) (оценка в обоих случаях идет сверху), составляет соответственно 450 и 18 т/год. Это существенно ниже отдачи этих элементов донными отложениями, которая по довольно грубым оценкам, основанным на экспериментальном определении скоростей выделения азота и фосфора из илов, может достигать величин соответственно 1400 и 100 т/год (см. Раздел «Донные отложения»). Биогенную нагрузку, обусловленную стоком р. Ишны, из-за отсутствия данных по расходам воды, подсчитать не удастся. Тем не менее относительно существенно меньшие скорости течений, а значит и водной нагрузки, при не очень значительном превышении среднегодовых концентраций азота и фосфора дают основания утверждать, что она будет намного меньше, чем со стоком р. Сары и меньше по сравнению с отдачей донными отложениями.

Таким образом, внутренняя биогенная нагрузка (поступление из илов) на озеро в несколько раз превышает внешнюю (со стоком рек) и это является еще одной характернейшей чертой функционирования данной озерной экосистемы. Здесь не учтено поступление биогенов со сточными водами промышленных предприятий г. Ростова и непосредственный сток с береговой линии, но наш опыт исследования оз. Неро позволяет предположить, что эта часть внешней нагрузки вряд ли превышала нагрузку, испытывавшуюся водоемом за счет поступления биогенов с речными водами.

Значительная доля поступивших биогенов выносится из озера ветхими лаводковыми водами (при максимальных скоростях водообмена)

и не принимает участия в создании первичной продукции. Таким своеобразным, нехарактерным для крупных озер, способом оз. Неро очищается от большого количества легкодоступных продуцентам неорганических форм азота и фосфора и, возможно, по этой причине не происходит прогрессивно возрастающего накопления биогенов в водной массе с последующим вовлечением их в фотосинтез с весьма далеко идущими негативными последствиями. По крайней мере отмечается, что среднегодовые величины биомассы фитопланктона и концентрации хлорофилла «а» удерживаются на приблизительно одинаковом уровне даже в наиболее контрастные по гидрометеорологическим условиям годы, какими явились 1987 (холодный с сильными ветрами) и 1989 (теплый штилевой) годы (Ляшенко О. А., 1991; Сигарева Л. Е., 1991; Сигарева Л. Е., Ляшенко О. А., 1991).

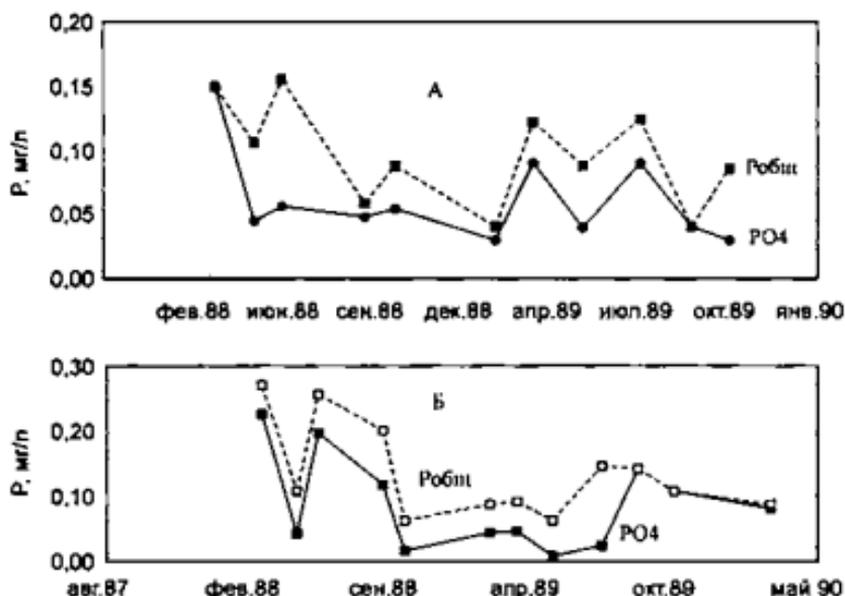


Рис. 2.10. Динамика фосфорсодержащих соединений в речах Сара (А) и Ишля (Б)

В заключение этого раздела следует отметить, что первые сведения о концентрациях биогенных компонентов в оз. Неро были получены 1 октября 1926 г. Аналитической Лабораторией ГСНХ в Ярославле. Результаты анализа единственной пробы показали, что азотистая и азотная кислоты отсутствуют, а фосфорный ангидрид (P_2O_5) присутствует

в количестве 0,75 мг/л, что соответствует 0,33 мгР/л. По поводу этого анализа Гресе Б. С. (1929) замечает следующее: «отсутствие солевого азота в этой пробе — по всей вероятности мнимое: аммиака не определялось вовсе, а так как проба воды хранилась в лаборатории довольно долго нефилтрованной, надо думать процесс денитрификации имел следствием подобный отрицательный результат». В довольно обширной сводке по озерам Ярославской области (Фортунатов, 1973) не приводится никаких сведений относительно биогенных элементов. По данным Синельникова В. Е. в июне—августе 1963 г. концентрация аммонийного азота составляла 0,24—2,46 мг/л, азота нитратов 0,005—0,010 мг/л.

В 1984—1985 гг. в системе Гидрометеослужбы были проведены анализы воды оз. Неро по широкому спектру компонентов, включая биогены. Пробы, как и в случае солевого состава, отбирались в различные сроки на одной станции с поверхностного горизонта недалеко (0,4 км) от г. Ростова. Результаты (табл. 2.24) дали возможность заключить, что «концентрации аммонийного азота систематически превышали ПДК, а нитритного были ниже ПДК» (Ежегодник, 1986). Обращает на себя внимание отсутствие какой-либо закономерности в динамике всех форм азота и фосфора. Мы связываем это, главным образом, с неадекватностью примененных методов анализа, что было весьма характерно для всей системы Гидрометслужбы, а также неопределенным сроком хранения проб до анализа: известно, что допустимый срок хранения для получения правильных результатов при анализе биогенных компонентов не должен превышать 6-часов (Семенов, 1977).

Таблица 2.24

Азот и фосфор в оз. Неро в 1984—1985 гг., мг/л

Дата	Азот				Фосфор	
	NH ₄ ⁺	NO ₂ ⁻	NO ₃ ⁻	N _{св}	PO ₄ ⁻³	P _{св}
1.03.84	1.20	0.015	0.16	0.80	н/о	0.012
6.05.84	0.70	0.004	0.03	2.57	0.256	0.360
3.08.84	0.21	н/о	0.01	2.08	0.001	0.129
4.10.84	0.33	н/о	0.04	0.96	0.390	0.670
4.03.85	0.0	0.002	0.34	2.64	0.097	0.145
13.05.85	0.01	0.005	0.02	1.05	0.026	0.029
1.08.85	0.34	0.004	0.04	0.56	0.044	0.104
1.10.85	0.04	0.004	0.09	1.35	0.204	0.210

6.2. Кремний. Повсеместная распространенность и высокое содержание соединений кремния в породах и почвах определяет его неперенное присутствие и в природных водах. Вследствие малой растворимости в обычных условиях концентрация кремния в водах суши

не превышает нескольких миллиграммов на один литр. В эти пределы укладываются и величины, приводимые аналитиками, работающими в системе Гидрометслужбы (табл. 2.25), для литорали оз. Неро.

Из большого разнообразия форм соединений этого элемента, которые зависят от множества факторов — минерализации, соотношения главных ионов, температуры, pH, окислительно-восстановительных условий среды и т. д., в оз. Неро было измерено только содержание растворенных минеральных форм. Как и в случаях с большинством других химических компонентов, максимальные концентрации кремния характерны для вод притоков (табл. 2.26.). Повышенные содержания присущи и водам юго-западного (ст. 11) и закрытого участка юго-восточного (ст. 12) плесов. Именно здесь в 1987 г. наблюдались аномалии в развитии фитопланктонных организмов — присутствовал специфичный планктон с невысокими количественными показателями. На других станциях весной обильно развивались диатомовые, которые составляли основу (30—50%) биомассы фитопланктона (Ляшенко О. А., 1991). Поскольку они строят свой панцирь почти из чистого кремния, то, очевидно, по этой причине концентрация наиболее доступной для планктонных организмов растворенной минеральной формы кремния на большей части озерной акватории была равной или близкой к аналитическому нулю. Такой неожиданный результат наводит на мысль, что в лимитировании, или, по крайней мере,

Таблица 2.25

Содержание кремния в литоральной зоне оз. Неро, мг/л
(Ежегодник..., 1986)

Годы	1984				1985				
	Дата	1.03	6.05	3.08	4.10	4.03	13.05	1.08	1.10
Содержание	0.8	0.6	0.4	1.1		2.4	1.4	0.7	

Таблица 2.26

Распределение растворенной минеральной формы кремния, мг/л
(по данным Степановой И. К.)

Дата	№ станции							
	1	2	3	4	5	6	7	8
20.05.87 г.	—	0.22	0	0	0.04	0.66	0.04	—
8.05.88 г.	2.6	0	0.04	0.08	—	0.06	0.06	0.10
Дата	№ станции							
	9	10	11	12	13	14	15	16
20.05.87 г.	—	0.10	0.86	0.53	—	0.02	0.06	—
8.05.88 г.	0.30	0	0.27	0.76	—	0.48	0.13	1.8

снижении интенсивности производства первичной продукции на раннем этапе развития водорослей в оз. Неро, наряду с неорганическими формами азота и фосфора, могут принимать участие и соединения кремния. Обычно же принято считать, что содержание кремния в природных водах настолько велико, что он никак не может служить элементом, ограничивающим процесс развития фитопланктона (Алекин О. А., 1970). Однако надо иметь в виду, что такой вывод сделан на основе общего содержания соединений кремния, многие из которых недоступны первичным продуцентам (например, песчаные частицы).

Весной 1988 г. пробы были отобраны в первой декаде мая (в 1987 г. — в третьей), когда пик развития диатомовых мог еще не наступить, поэтому минеральные растворенные соединения кремния присутствовали почти на всей акватории, хотя и в небольших количествах. Формы нахождения кремния и их поведение в пространстве и времени в оз. Неро еще недостаточно хорошо изучены, чтобы с уверенностью утверждать их участие в лимитировании первичной продукции, но имеющиеся данные свидетельствуют в пользу такой возможности.

Глава 7

ОРГАНИЧЕСКОЕ ВЕЩЕСТВО

Оценка экологического состояния озера невозможна без сведений о составе, закономерностях распределения, новообразования и деструкции органических веществ (ОВ) как в водной толще, так и в донных отложениях. Состав органического вещества природных вод крайне разнообразен и сложен. Здесь встречаются белки, жиры, углеводы, фульво- и гуминовые кислоты, аминокислоты и тысячи других соединений как неопределенного, так и известного состава и структуры. Для характеристики всей совокупности ОВ часто используются обобщенные показатели, такие как перманганатная и бихроматная окисляемость, биохимическое (БПК) и химическое (ХПК) потребление кислорода, содержание органического углерода, кислородные эквиваленты, степень восстановленности (окисленности), энергетический запас и некоторые другие. Между многими из них существуют функциональные связи, которые помогают глубже понять природу ОВ и происходящие изменения при его преобразованиях, в том числе при его синтезе из неорганического материала и последующей бактериальной деструкции (Бикбулатов, 1981).

7.1. Распределение и динамика органического вещества

Первые немногочисленные (7 анализов) измерения перманганатной окисляемости, относящиеся к косвенным показателям содержания ОВ, свидетельствовали о том, что ее величина закономерно снижается от лета к осени и далее к зиме. «Сравнительно высокая цифра окисляемости летом обуславливается, главным образом, продуктами жизнедеятельности планктона, очень обильного в это время года; осенью при падении планктонической продукции соответственно понижается и окисляемость, достигая минимума зимой, когда количество планктона ничтожно, а интенсивность разложения ила благодаря низкой температуре воды очень невелика» (Грзе, 1929). Если принять за основу характерный для волжских водохранилищ средний пересчетный коэффициент от кислорода перманганатной окисляемости к массе углерода органического вещества, равный 1,0 (при возможных разбросах от 0,6 до 1,5), то динамику органического углерода в цифрах в педagogической части оз. Неро за 1926—1927 гг. можно представить следующим образом: летом — 17,8—22,4, осенью — 10,4, зимой (март) — 5,6 мгС/л. При этом потеря при прокаливании, показатель, который, по мнению Грзе Б. С., дает более правильное представление о валовом количестве органических веществ, в единственной осенней пробе 1926 г., составила 51,5%. Это кажется маловероятным, поскольку является признаком преобладания ОВ над минеральными компонентами.

Первое измерение истинного содержания органических веществ в центре озера во время обильного «цветения» подолема в августе 1969 г., показало, что оно находится на уровне 10—12 мгС/л, и не превышает величин, характерных для верхневолжских водохранилищ (Бикбулатов, Скопинцев, 1972). Материалы по сезонной динамике ОВ в 1972—1973 гг., представленные Ларионовым (1978), не подтверждают выводов Грзе Б. С. (1929) о серьезном снижении концентрации ОВ при переходе от летнего к зимнему сезонам (табл. 2.27). Более того, приводятся аргументы в пользу прямо противоположного явления — концентрирования ОВ в водной фазе в результате вымораживания, которое может иметь место в неглубоких водоемах. Толщина льда в оз. Неро может достигать 80 см. При его средней глубине 1,5 м степень концентрирования должна была бы достичь к марту двукратной величины и проявиться заметным образом. Однако, судя по приведенным табличным данным, отбор проб производился в декабре, когда мощность ледяного покрова еще не могла достичь значительного размера. Кроме того, валовое содержание органических веществ оставалось практически постоянным (по крайней мере в пределах ошибок экспериментальных измерений) в течение всех сезонов 1972 и 1973 гг., что также не поддерживает гипотезу о значительном концентрировании ОВ путем вымораживания.

Сезонная динамика растворенного ($C_{\text{раств}}$) и взвешенного ($C_{\text{взвеш}} = C_{\text{обм}} - C_{\text{раств}}$) органического вещества в 1972—1973 гг. (Ларинен, 1978)

Дата отбора пробы	Цветность, градусы	$C_{\text{раств}}$, мг/л	$C_{\text{взвеш}}$, мг/л	$C_{\text{раств}}/C_{\text{взвеш}}$	$C_{\text{раств}}/C_{\text{обм}}$, %
1972, август	10	12.6	21.3	0.8	41.0
октябрь	10	14.0	24.5	0.7	42.8
декабрь	10	16.8	21.0	0.6	20.2
1973, апрель	20	21.0	24.1	1.0	12.9
июнь	20	14.2	23.0	1.4	38.2
август	10	11.0	22.4	1.9	51.0
октябрь	10	18.2	21.4	0.5	15.4
декабрь	10	33.0	53.9	0.3	38.2

Исключением являются данные за декабрь 1973 г., когда содержание ОВ в 2 с лишним раза превысило аналогичные данные не только всех летне-осенних месяцев, но и декабря предыдущего года. К сожалению, в обсуждаемой работе не указаны ни конкретные точки, ни точные сроки отбора проб, поэтому не удается оценить насколько образовавшаяся в декабре (начало?, конец?) 1973 г. толщина льда могла привести к столь сильному различию в результатах по сравнению с декабрем же (опять-таки, начало?, конец?) 1972 г. Очень высокие концентрации взвешенных частиц (38,2% от общего органического углерода) в декабре 1973 г. приводят на мысль о возможном чрезвычайно мощном развитии подледного фотосинтеза, но в дальнейшем это явление не удалось подкрепить конкретным фактическим материалом. Более того, обычные крайне малые содержания кислорода в подледный период скорее свидетельствуют об обратном. При переходе от осеннего к зимнему режиму не было также тенденции увеличения цветности — одного из важных показателей органического содержания гумусовой природы. Таким образом, вопрос о концентрировании ОВ путем вымораживания, как и многие другие важные вопросы, связанные с пространственным и сезонным распределением, его продукцией и трансформацией, к началу комплексных работ ИБВВ РАН остались открытыми.

7.1.1. Зимний режим и проблемы вымораживания органических веществ. Глубокой зимой пространственное распределение ОВ в озере довольно однородно. По цветности и содержанию органического углерода, как и по минеральным компонентам, обособляются реки и их приустьевые участки. Если цветность в поверхностных пробах на боль-

шинство станций в феврале находится в пределах 20—30 градусов, то в р. Саря она заметно ниже (15°), а в р. Ишни выше (35°) (табл. 2.28). В то же время содержание органического углерода в обеих реках ниже по сравнению с большинством пелагиальных и литоральных районов, что является свидетельством различного их генезиса.

Таблица 2.28

Распределение органического вещества 3—5 февраля 1989 г.

Ст.	Цветность, градусы	БПК, мг/л O ₂	C _{орг} , мг/л	C _{ин} , мг/л	C _{орг} /C _{ин} , %
1	15	—	2.8	0.6	22
2	20	1.4	4.2	0.9	22
3	20	0.7	3.4	1.0	29
4 пов	25	2.0	4.2	1.2	29
4 дно	35	2.1	10.2	1.4	14
5	20	2.5	10.0	1.8	18
6	25	—	7.8	1.7	22
7	20	3.9	10.6	1.9	18
8	25	7.5	11.6	4.8	42
9	25	2.6	10.5	1.4	13
10	30	4.7	10.1	2.5	25
11	25	2.5	12.0	2.5	21
12	20	2.4	5.8	2.0	34
14	30	2.4	10.2	2.8	27
15	20	2.4	13.3	2.1	16
16	35	—	7.6	0.5	7

Саря и участки, находящиеся под ее непосредственным воздействием (вплоть до ст. 3), содержат ОВ, сформировавшиеся в строго аэробных условиях, тогда как воды р. Ишни в нижнем течении практически лишены кислорода и трансформация ОВ здесь происходит преимущественно в анаэробных условиях, что должно приводить к иным по своим свойствам продуктам разложения. Существенно отличаются по содержанию и составу ОВ придонные воды от поверхностных; по цветности — на 30%, а по C_{орг} — в 2 с лишним раза. Кроме того, постоянный подток гумусового материала с высоким отношением Цв/С из седиментов обеспечивает повышенную цветность у дна, причем она здесь выше не только по сравнению с поверхностными водами той же самой станции (ст. 4), но и других. Закономерное повышенное содержание ОВ в придонном слое воды

на центральной глубоководной станции (возможно и на других) сохраняется до конца ледостава, о чем свидетельствуют соответствующие данные для марта 1989—1990 гг. (табл. 2.29; табл. 4, приложения).

Таблица 2.29

Распределение органических веществ в конце ледостава
(20 марта 1989 г.)

№ ст.	Цветность, градусы	БПК, мг/л	ХПК, мг/л	БПК/ХПК, %	C _{орг} , мг/л	ХПК/С
1	40	1.7	25.1	7	9.5	2.66
2	35	—	19.6	—	7.7	2.55
3	20	2.8	13.5	21	5.2	2.61
4 пов	15	3.8	11.8	32	4.7	2.48
4 дно	—	5.1	31.0	16	10.5	2.97
5	15	3.9	23.3	17	8.6	2.71
6	20	3.7	22.4	17	7.8	2.86
7	20	2.5	18.3	14	7.4	2.48
8	20	5.2	21.5	24	9.5	2.27
9	40	2.4	25.1	10	10.8	2.33
10	20	1.8	13.1	14	5.9	2.21
11	20	1.0	16.9	6	5.8	2.89
12	20	3.2	14.0	23	6.8	2.05
14	20	2.5	13.4	19	5.8	2.29
15	15	3.4	14.4	24	5.2	2.78
16	45	—	23.0	—	9.5	2.43

В этот период начинают ощущаться серьезные изменения в составе вод рек Сары и Ишны; они обогащаются окрашенными в коричневый цвет органическими веществами, которые маломинерализованными талыми водами выносятся с окружающих, частью заболоченных территорий. Эти воды начинают поступать в озеро и на станциях, прилегающих к устьям рек Сары (ст. 2) и Ишны (ст. 9), резко повышаются цветность и содержание органического углерода. В качественном отношении это гумусовые вещества болотного или почвенного происхождения; они трудно поддаются бактериальной атаке (низкое БПК/ХПК), имеют степень окисленности, равную степени окисленности углеводов (для простых углеводов, а также лигнина, целлюлозы ХПК/С = 2,67).

С концом ледостава (обычно в апреле) зимние водные массы в значительной степени вытесняются водами, образовавшимися в результате

таяния снежного и ледяного покрова самого озера и окружающих территорий, а также поступающими в больших количествах водами притоков, которые имеют отличные от предыдущих характеристики (табл. 4 Приложения). См. данные от 20 апреля 1990 г.). В зависимости от фазы половодья, главным образом скорости водообмена в данный конкретный срок наблюдений, содержание органических веществ ранней весной может меняться в ту или иную сторону. В первую очередь довольно быстро должно происходить уменьшение концентраций ОВ, поскольку образующиеся в результате таяния льда воды содержат относительно мало минеральных и органических компонентов, а по объему сравнимы с объемом зимней озерной воды. Такая ситуация сложилась в апреле 1990 г., когда на большей части акватории произошло уменьшение содержания органического углерода по сравнению с мартом (табл. 2.30).

Таблица 2.30

Изменение характеристик ОВ при переходе от подледного режима к открытой воде в 1990 г.

№ ст.	ХПК, мг/л		С _{орг} , мг/л		ХПК/С		С _{орг} , мг/л		С _{орг} /С _{орг} , %	
	март	апрель	март	апрель	март	апрель	март	апрель	март	апрель
1	26.3	17.8	10.8	8.5	2.44	2.1	1.4	0.9	13	11
2	27.9	20.8	10.9	9.5	2.56	2.19	1.3	2.7	12	29
4	18.5	23.3	8.1	6.8	2.27	3.41	1.8	3.4	22	50
5	22.3	25.1	10.6	7.9	2.11	3.17	1.1	4.5	10	57
6	23.9	26.9	11.6	8.6	2.07	3.13	0.9	5.2	8	61
7	21.5	26.9	9.9	8.6	2.17	3.13	1.8	3.1	18	36
15	14.0	25.1	6.2	11.6	2.27	2.18	1.2	3.9	19	34
16	24.5	28.3	12.2	12.5	2.01	2.25	1.7	0.9	14	7

Меняется не только общее содержание органических веществ, но и их состав. При открытой воде начинает сказываться ветровое волнение, которое поднимает со дна большое количество различной формы и размеров твердых частиц. В их структуре содержатся и органические составляющие, которые прошли глубокую трансформацию за длительный период своего нахождения в донных отложениях. Инертность этих взвешенных веществ к бактериальной атаке, а также, вероятно, относительная их устойчивость к химическим воздействиям в условиях аналитического определения органического углерода персульфатным методом в нефилтрованных пробах и в меньшей мере в условиях определения бихроматной окисляемости (ХПК), сказываются на всех общих свойствах валового ОВ (табл. 2.30).

Наблюдения в течение трех лет не выявляют увеличения цветности и содержания органического углерода зимой как в центральной пелагической части озера (рис. 2.11), так и на мелководных станциях (табл. 4 Приложения). В поверхностном горизонте и в марте 1988 г., и в марте 1989 г. зафиксировано даже заметное уменьшение этих показателей по сравнению с осенним периодом. В придонном слое концентрация органических веществ выше и при усреднении с поверхностными слоями получают значения, близкие к осенним. Об этом свидетельствуют показатели органического вещества в р. Векса, по которой сбрасываются воды, имеющие усредненные по всему озеру характеристики (рис. 2.12).

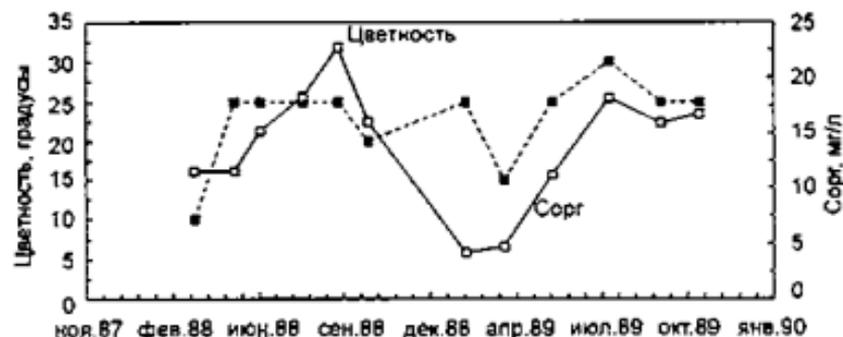


Рис. 2.11. Динамика цветности и органического углерода в поверхностной пробе воды на ст. 4

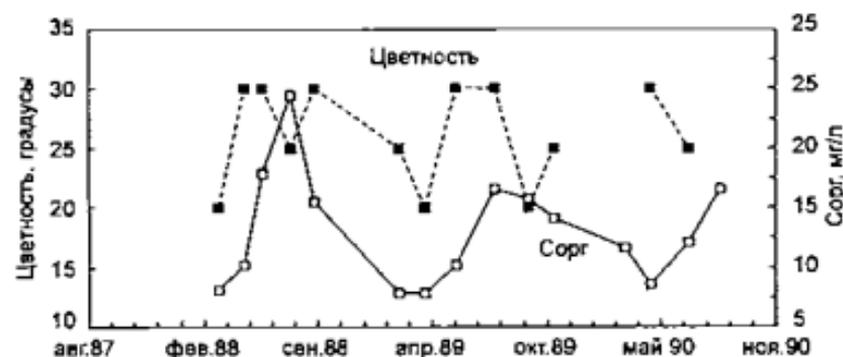


Рис. 2.12. Динамика цветности и органического углерода в р. Векса

Цветность ее воды имеет максимальные значения летом, минимальные — зимой и в начале весны. Такой ход сезонной изменчивости показателя в реке, которая интегрально отражает состав воды хорошо перемешиваемого в безледный период озера, может быть вызван не только питанием озера в отдельные промежутки времени водами различного генезиса, но и методическими особенностями измерения цветности. Опыт показывает, что в периоды интенсивного цветения фитопланктона тон окраски воды приобретает зеленоватый оттенок, который отличается от желтоватого цвета стандартной бихроматно-кобальтовой шкалы. Тогда точное определение величины цветности становится затруднительным даже для квалифицированного исследователя. При таких ситуациях размах колебаний цветности в пределах 10 градусов следует признать не очень значительным.

Таким образом, на основании имеющейся совокупности данных за 1988—1990 гг. мы должны констатировать, что при нарастании толщины льда в оз. Неро не происходит заметного увеличения концентрации ОВ, как не происходит и значительного уменьшения их содержания. Иными словами, зимой в озере устанавливается некое динамическое равновесие между процессами, ведущими к снижению содержания ОВ, и процессами, направленными на пополнение озерной чаши органическими соединениями.

К первой группе процессов относятся:

1) бактериальная деструкция, которая в условиях низких температур должна идти с невысокой интенсивностью;

2) коагуляция высокомолекулярных гумусоподобных частиц с последующим выпадением их на дно водоема, что вполне вероятно, но скорости ее для анаэробных условий, существующих зимой в оз. Неро, неизвестны;

3) маловероятный в широких масштабах для данного водоема процесс прямой сорбции органических частиц донными отложениями.

Противоположно направленные процессы:

1) поступление ОВ с речным стоком;

2) выделение из грунтового комплекса ОВ различного строения, которые в условиях отсутствия кислорода не могут быть окислены до конечных минеральных продуктов типа CO_2 , NH_4^+ , PO_4^{3-} ;

3) обсуждаемый здесь процесс вымораживания.

Результаты наших анализов указывают на некую сбалансированность всех процессов, поэтому можно полагать, что концентрирование ОВ, если оно имеет место в оз. Неро в значимых масштабах, перекрывается бактериальной деструкцией и коагуляцией. Относительно коагуляции (возможно, точнее, «высаливания») следует добавить, что многие бессточные водосмы Сибири промерзают до дна, в результате чего на твердой поверхности ранее отложенных седиментов образуются

коричневого цвета различной интенсивности наплывы, не растворяющиеся в воде при последующем таянии льда (устное сообщение геохимика Кожары В. Л.). Частично к такому же результату может приводить и значительное увеличение (на медководных участках более чем в 1,5—2 раза) соотношения «лед—вода» в оз. Неро в процессе нарастания льда.

7.1.2. Весенний режим. Водные массы с минимальными концентрациями ОВ в оз. Неро формируются во время начальной фазы половодья, которое во всех водоемах верхневолжского региона обычно наступает в апреле; только недостаточность качественного экспериментального материала заставила Гресе Б. С. (1929) отнести соответствующий минимум к зиме. В начале половодья сформировавшиеся за долгую зиму озерные воды постепенно перемешиваются и разбавляются тальми водами, которые содержат мало органических веществ. Во вторую фазу половодья с водосбора в больших количествах начинают выноситься окрашенные болотные воды, и содержание ОВ в озере повышается.

Сразу после вскрытия льда с началом интенсификации деятельности планктонных организмов, главным образом диатомовых и зеленых, начинается синтез нового органического вещества из неорганических форм биогенных элементов. Численность всех видов низших водорослей в оз. Неро, которая зимой была незначительной (от 0,03 до 1,36 млн. кл./л), а биомасса не превышала 0,24 мг/л, весной значительно увеличивается. В мае численность планктонных водорослей составляла: в 1987 г. — 8—46 млн. кл./л, в 1988 г. — 28—115 млн. кл./л (Ляшенко, 1991). Измеренная кислородным методом 21 мая 1987 г. на станциях 4 и 7 суточная величина фотосинтеза фитопланктона равнялась соответственно 2,07 и 3,03 мг/л O_2 (Сыгарева, 1991). Фотосинтез априори ведет к повышению содержания органических соединений в воде как в растворенной (прижизненные выделения, которые могут составлять до 40% синтезированного, плюс продукты лизиса), так и, особенно, во взвешенной (тела живых и отмерших организмов) форме. В результате указанных процессов при переходе от марта (табл. 2.29) к маю (табл. 2.31) увеличивается общее содержание ОВ.

Прирост величин за этот промежуток времени можно практически полностью приписать деятельности фотосинтезирующих организмов, поскольку суточные величины чистой продукции фитопланктона, измеренные Монаковой С. В. в мае 1989 г. в основном фотическом слое (на глубине 0,5 м), доходили до 1,5 мгС/л (табл. 5. Приложения). К такому же выводу можно прийти, если, приняв соотношение Редфилда, в соответствии с которым основные биогенные элементы в органическом веществе фитопланктона находятся в соотношении С:N:P=106:16:1 (в атомном выражении) (Бихбулатов, 1979), рассчитать продукцию фитопланктона по убыли из водной фазы неорганических форм азота.

Распределение ОВ 13—20 мая 1989 г.
(Цв. — Цветность в градусах хромово-кобальтовой шкалы)

№ ст.	Цв.	БПК, мг/л	ХПК, мг/л	БПК/ХПК, %	C_{org} , мг/л	ХПК/ C_{org}	C_{min} , мг/л	C_{min}/C_{org} , %
1	15	1.7	13.1	13	7.6	1.73	1.0	13
2	25	4.0	23.1	17	10.0	2.31	1.8	18
3	25	4.0	18.4	22	10.7	1.72	—	—
4	25	5.4	22.4	24	11.2	1.99	4.0	36
5	—	5.6	—	—	10.6	—	2.3	22
6	30	4.6	21.9	21	10.2	2.14	3.2	31
7	25	4.2	20.3	21	9.5	2.14	3.1	33
8	25	5.0	20.8	24	8.6	2.42	2.8	33
9	30	7.0	26.1	27	12.4	2.10	2.9	23
10	25	6.4	20.1	32	10.3	1.95	2.9	28
11	30	6.2	26.1	24	13.2	1.98	2.6	20
12	30	5.6	24.8	23	11.1	2.23	1.2	11
14	30	6.2	22.5	28	11.0	2.05	2.8	25
15	—	5.6	—	—	10.6	—	2.3	22
16	55	1.4	28.0	5	14.1	1.99	1.1	8

Поскольку эта убыль составляет 1—1,5 мгN/л, то максимальная величина фотосинтеза будет равна 6—8 мгC/л. Она близка, а в ряде случаев выше результатов непосредственных измерений органического углерода во взлесах. По-видимому, значительная часть минеральных форм азота, имевшаяся в марте подо льдом, выносится из озера в начальные периоды половодья и не принимает участия в формировании первичной продукции, а возрастание общей концентрации ОВ от марта к маю в существенной мере осуществляется за счет приноса их с водосборной площади во вторую фазу половодья.

Постепенно начинает изменяться качественный состав ОВ. На большей части акватории, за исключением рек и прилегающих к ним участков, становится больше лабильных соединений (см. данные по БПК, табл. 2.31), несомненно, это сложесинтезированное ОВ, входящее в состав водорослей.

По совокупности свойств ОВ в мае выделяются речные и примыкающие к ним участки, а также район, почти полностью окруженный зарослями высшей водной растительности (ст. 12). На станции № 12 сравнительно небольшое содержание азотсодержащих органических веществ (11% от общего содержания углерода, табл. 2.31) является свидетельством низкой активности фитопланктона в дни, предшествовавшие дню

отбора проб. Замечено к тому же, что «снижение продуктивности фитопланктона южной акватории, возможно, обусловлено обеднением воды биогенными элементами при обильном зарастании высшей водной растительностью» (Сигарева, Дядченко, 1991). Хотя эта гипотеза высказана в отношении положений, складывающегося на станциях 10, 11, 14 за весь вегетационный период, она, по-видимому, частично применима и к данной ситуации, несмотря на то, что в отношении бедности биогенными элементами станция № 12 не отличалась от других. В общем случае конкуренция за источники пищи между представителями высших и низших водорослей неизбежно приводит к распределению имеющегося в воде ресурса биогенов между этими группами организмов. Поэтому в районах с обильным зарастанием на долю фитопланктона приходится относительно меньшее количество азота и фосфора, по сравнению с районами, где такая конкуренция меньше или отсутствует вовсе.

7.1.3. Летний режим. Летом в озере резко возрастает валовая концентрация органических веществ, преимущественно за счет взвешенной фракции, которая в относительно выраженном количестве необычайно велика — более 50% $C_{орг}$ (табл. 2.32); на это же время обычно приходится пик развития фитопланктона (Сигарева, 1991). Нарастание биомассы продуцентов

Таблица 2.32
Распределение ОВ 18—23 июля 1989 г.

№ ст.	Цп,	БПК, мг/л	ХПК, мг/л	БПК/ХПК, %	$C_{орг}$, мг/л	ХПК/ $C_{орг}$	$C_{взв}$, мг/л	$C_{взв}/C_{орг}$, %
1	15	1.0	13.0	8	3.6	3.58	0.5	14
2	35	7.7	46.3	17	—	—	7.7	—
3	30	7.4	46.3	16	—	—	—	—
4	30	>6.8	50.9	—	18.2	2.80	11.8	65
5	25	>7.9	50.9	—	—	—	11.2	—
6	30	>7.7	45.1	—	16.6	2.72	8.2	49
7	30	>9.0	45.4	—	16.7	2.71	10.3	62
8	25	>8.7	48.4	—	17.9	2.70	11.3	63
9	30	4.9	49.8	10	18.2	2.74	10.8	60
10	30	—	43.9	—	17.2	2.56	7.8	45
11	35	3.4	37.6	9	10.3	3.64	5.4	52
12	30	>7.6	41.4	—	14.5	2.85	—	—
14	30	>8.3	51.0	—	17.9	2.84	10.0	56
15	30	>8.5	48.6	—	19.7	2.47	10.4	53
16	60	0.8	40.5	2	15.5	2.61	1.4	9

в условиях образовавшегося еще в мае дефицита неорганических соединений азота и фосфора возможно только за счет существенного подтока биогенов из донных отложений. Значимость этого процесса в жизни оз. Неро будет обсуждаться более детально в главе, посвященной биогенной нагрузке. Практически во всех районах за исключением участков, прилегающих к устьям рек, содержание лабильной фракции в июле настолько велико, что без предварительного разбавления пробы не удается определить пятисуточное БПК. При штилевой погоде столь высокие концентрации легкодоступных микрофлоре и способных к быстрой деструкции ОВ создают реальные предпосылки для быстрого снижения или даже исчерпания кислорода в воде, особенно в придонных слоях, что может неблагоприятно сказаться на рыбном населении. Напомним, что рыбохозяйственное ПДК по кислороду в летний период составляет 6 мг/л, что лишь на 20—30% ниже предела его насыщения при летних температурах.

Если весной пониженные концентрации взвешенного ОВ можно встретить только на станциях с сильной межгрупповой конкуренцией (к ним как раз относится станция № 12, практически полностью окруженная зарослями тростника), то летом похожий результат можно наблюдать и на других, менее зарастающих участках (ст. 2, 10, 11, табл. 2.32).

Неудивительно, что реки содержат минимальные количества взвешенных частиц, имеющих органическую природу, так как движение воды является серьезным препятствием для развития первичных продуцентов, а спокойное их течение летом не создает условий для взмучивания донных отложений.

7.1.4. Осенний режим. Постепенное понижение температуры воды с первой декады августа приводит к снижению скоростей продукционно-деструкционных процессов и параллельному (но не пропорциональному) уменьшению концентрации органических веществ. Уже к середине сентября 1989 г. БПК с 8—9 мг/л летом упала до 5—6 мг/л, а ХПК снизилось с 45—50 до 35—45 мг/л; заметно уменьшилось и количество взвешенной части ОВ (табл. 4. Приложения). Дальнейшее понижение температуры воды и воздуха еще более тормозит протекание продукционных процессов и к концу октября скорости фотосинтеза часто не удается измерить стандартным методом светлых и темных склянок. На большинстве озерных станций к началу ноября происходит заметное, даже по сравнению с сентябрем, понижение значений основных показателей ОВ (табл. 2.33). Только в районах, примыкающих непосредственно к городской черте (ст. 7, 8), содержание лабильных органических компонентов оставалось относительно высоким, примерно равным сентябрьским величинам. Здесь, возможно, сказались дополнительное поступление органических соединений с неканализованными стоками с городской территории во время прошедших обильных осенних дождей.

Распределение ОВ в период с 27 октября по 1 ноября 1989 г.

№ ст.	Цв.	БПК, мг/л	ХПК, мг/л	БПК/ХПК, %	$C_{\text{ср}}$ мг/л	ХПК/ $C_{\text{ср}}$	$C_{\text{ср}}$ мг/л	$C_{\text{ср}}$ / $C_{\text{ср}}$ %
1	15	1.7	21.4	8	8.1	2.63	2.4	29
2	20	3.2	28.3	11	13.6	2.07	2.9	21
3	20	4.8	56.1	9	22.0	2.55	11.9	54
4	25	4.8	43.1	11	16.7	2.58	8.0	48
5	25	4.3	32.0	13	14.7	2.17	3.9	26
6	25	3.5	33.3	11	14.1	2.36	1.3	9
7	20	6.8	39.6	17	15.6	2.54	5.7	36
8	20	6.0	42.5	14	18.8	2.26	6.7	36
9	40	3.6	23.3	15	11.9	1.96	0.7	6
10	30	4.7	36.3	13	16.9	2.14	5.5	32
11	30	5.5	16.5	33	8.1	2.03	1.1	14
14	20	4.4	35.1	13	14.2	2.48	7.0	49
15	—	4.5	32.8	14	14.4	2.27	5.4	37
16	60	1.4	28.6	5	13.3	2.15	1.6	12

На большинстве участков, особенно в центральной части озера (ст. 3, 4), еще отмечалось «цветение» воды, поэтому связанные с продукцией фитопланктона показатели оставались довольно высокими. При анализе результатов химических измерений в осенний период особенно важно четко представлять конкретную гидрометеорологическую ситуацию в водоеме. Опыт исследований на оз. Неро и других мелководных водоемах показывает, что даже при небольшой разнице во времени (не говоря уж о суточных и более длительных интервалах) отбора проб на двух соседних станциях и обычно имеющих близкие показатели, направление и скорость ветра могут изменить коренным образом и радикально изменить содержание и состав компонентов ОВ. Особенно это касается взвешенной органики, которая в зависимости от силы волнения в разной степени пополняется относительно трудноразлагаемой «кислой» фракцией, что должно вносить серьезные коррективы в непосредственно определяемые исходные величины и тем самым в оценку ее свойств. Эти трудности могут быть преодолены лишь путем отбора и анализа проб при нескольких характерных для данного сезона гидрометеорологических условиях, возможности чего исследователи водоемов, как правило, не имеют. Поэтому ряд выводов неизбежно носит предположительный характер и с этим приходится считаться.

7.1.5. Динамика ОВ в притоках. Динамика органических веществ в питающих озеро реках существенно отличается от озерной (рис. 2.13). В первую очередь необходимо отметить значимую степень корреляции ($r=0,76$) между цветностью и содержанием органического углерода, которая для всей озерной системы существенно меньше ($r=0,45$). Высокая продуктивность фитопланктона в открытой озерной части, как отмечалось ранее, может существенно исказить результаты определения цветности, что косвенно подтверждается и приведенными данными.

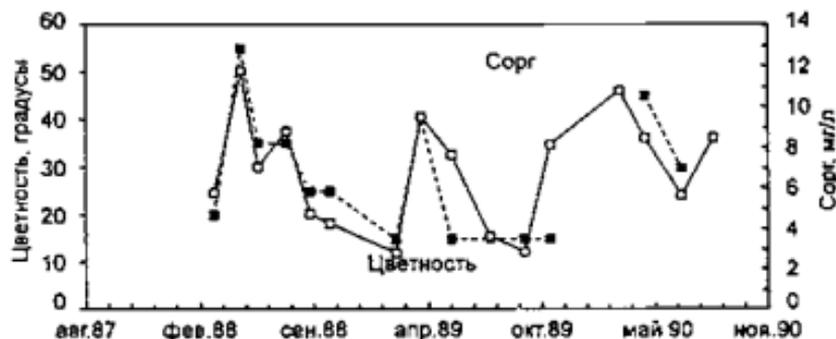


Рис. 2.13. Динамика цветности и органического углерода в р. Сара

Во-вторых, ход изменения цветности в реке опережает во времени аналогичные изменения в озере. В третьих, существует относительно высокая корреляция ($r=0,81$) между содержанием лабильной фракции (БПК) и степенью окисленности органического вещества, оцениваемой по соотношению $X_{ПК}/C_{орг}$, и которая близка к степени окисленности углеродов. Такая связь для озерной экосистемы отсутствует. И, наконец, в р. Саре нет никакой связи между общим содержанием органического углерода и углерода во взвешенной фракции, которая для озера в целом велика ($r=0,92$) и несомненно связана с наличием первичных продуцентов. Аналогичный характер носит и динамика органических компонентов в другом притоке — р. Ишне.

7.2. Продукция и деструкция органического вещества

7.2.1. Фотосинтез фитопланктона. В ходе микробиологических исследований ряда озер Ярославской области радиоуглеродным методом были получены первые единичные данные по продукции низших водорослей (Липтева Н. А., Монакова С. В., 1976), которые показали, что оз. Неро является высокотрофным водоемом. В 1987 г. первичную про-

дукцию фитопланктона определяли кислородным скляночным методом на двух станциях (на общей схеме № 4 и № 7) ежемесячно в течение всего безледного периода непосредственно в натуральных условиях (Сигарева Л. Е., 1991). Опыты ставились на 4—6 горизонтах таким образом, чтобы выявить возможности фитопланктона к фотосинтезу не только в области светового насыщения, но и на глубинах, превышающих среднюю глубину озера. Было показано, что вследствие сходства фитопланктона по составу доминирующих групп водорослей и близости их биомасс, литоральная (ст. 7) и пелагиальная (центральная, ст. 4) зоны озера существенно не различаются по величине максимального фотосинтеза в течение всего периода наблюдений. «Сходство особенностей сезонных изменений биомассы, концентрации хлорофилла «А», интенсивности максимального фотосинтеза позволило выбрать для оценки продуктивности фитопланктона наиболее просто определяемый индикатор — содержание хлорофилла и рассчитать по нему первичную продукцию в разных участках озера в 1987 г. и по всей акватории водоема в 1988 и 1989 гг.

...В среднем для всех станций озера первичная продукция составляла 7,34, 9,46 и 9,17 гО₂/м² за сутки в 1987, 1988 и 1989 гг. соответственно. Межгодовые различия были невелики и сходные по гидрометеорологическим условиям (1988 и 1989 гг.) и достигали лишь 25% от наименьшей величины в контрастные (1987 и 1989 гг.)» (Сигарева, 1991) (табл. 2.34).

Таблица 2.34

Первичная продукция фитопланктона, гО₂/м² сут (по Сигаревой, 1991)

№ ст.	Годы наблюдений		
	1987	1988	1989
2	8.18	9.49	6.96
3	7.90	12.0	10.4
4	8.23	10.6	11.2
5	6.47	11.1	9.29
7	7.79	10.5	8.95
9	9.47	10.4	7.48
10	6.42	9.47	7.53
11	6.99	5.51	10.9
14	5.17	6.38	9.86
15	6.80	9.17	9.11
Среднее	7.34	9.46	9.17

Средневзвешенная первичная продукция фитопланктона на различных участках водохранилища изменялась не более, чем в 2,2 раза в 1988 г., а в другие годы — еще меньше. Концентрации хлорофилла, измеренные в усредненных по всей глубине пробах или пробах из верхнего полуметрового слоя, распределялись по акватории озера неравномерно, чем и обусловлены вариации приведенных в таблице величин продукции фитопланктона. «Минимальное количество пигмента наблюдалось в Левском заливе, на ст. 11, а в отдельные годы — на ст. 10 и вблизи устья р. Пига (ст. 14). Максимальные (и близкие к наиболее часто наблюдаемым) концентрации хлорофилла характерны для центральной части озера (ст. 4) и районов северного побережья у г. Ростова» (Сигарева, Ляшенко, 1991).

В 1988 и 1989 гг. параллельно с работами по измерению концентрации хлорофилла Монаковой С. В. были проведены определения скоростей фотосинтеза стандартным методом темных и светлых склянок. Прямое сопоставление этих результатов указывает на отсутствие тесной корреляционной связи ($r = 0,54$, при $p = 0,05$, $N = 66$) между этими параметрами, поэтому под знак вопроса могут попасть выводы, сделанные в предположении существования такого рода зависимостей. Однако проведенный нами подсчет средневзвешенной за 1988 г. величины первичной продукции для внутриозерных станций по исходным данным Монаковой С. В. привел к величине $5,8 \text{ гO}_2/\text{м}^3 \text{ сут}$ или (при средней глубине водоема 1,5 м) $8,7 \text{ г/м}^2 \text{ сут}$, что только на 9% ниже результата ($9,46 \text{ г/м}^2 \text{ сут}$), полученного для этого года Сигаревой Л. Е. (1991) на основании измерений концентрации хлорофилла. При расчете принималось, что интенсивности продуцирования водорослей в июле—августе и июне—сентябре 1988 г. были попарно равны друг другу, а вегетационный период длится 6 месяцев. Температурные условия в водоеме и прямые измерения ряда характеристик фитопланктона в соответствующие месяцы предыдущего года (Ривьер, 1991) оправдывают принятие этих допущений. Практическое совпадение результатов может оказаться случайным, но при столь грубых допущениях, которыми вынуждены пользоваться исследователи сложных водных экосистем, близость величин, полученных независимыми способами с использованием различных наборов экспериментальных данных, вселяет надежду на то, что сделанные ранее выводы относительно среднегодовых значений ПП за 1987 и 1989 гг. недалеко от истины, несмотря на плохую корреляцию между интенсивностью фотосинтеза и содержанием хлорофилла в первичных продуцентах.

В соответствии с данными прямых наблюдений по интенсивности фотосинтеза фитопланктона, выполненных скляночным кислородным методом на стандартной для такого рода измерений глубине 0,5 м, весной притоки (ст. 1 и ст. 16) характеризуются наименьшими скоростями

продуцирования, где неблагоприятные гидродинамические условия (сильное течение) препятствуют нормальному развитию планктонных организмов (табл. 2.35, табл. 6 Приложения). Максимальная скорость продуцирования характерна для глубоководной центральной зоны озера (ст. 3, 4). К этому моменту в жизни водоема (начало — середина мая) маломинерализованные и содержащие относительно меньшие количества биогенов воды половодья еще не успевают полностью перемешаться с более минерализованными основными озерными водными массами, сформировавшимися в анаэробных условиях за зимний период. Сохранившиеся здесь с зимы высокие концентрации аммонийного азота и фосфатов могут способствовать созданию благоприятной в питательном отношении среды для первичных продуцентов и тем самым привести к высоким значениям ПП.

Таблица 2.35

Первичная продукция (ПП) и деструкция (Д) в оз. Неро в 1988 г., мгО₂/л сут (по данным Монаковой С. В.)

№ ст.	7 мая		10 июня		27 июля		15 октября	
	ПП	Д	ПП	Д	ПП	Д	ПП	Д
1	0.03	0.34	7.30	1.10	0.70	0.70	0	0
2	-	0.18	7.90	2.50	14.9	5.00	0.60	0.70
3	4.95	0.98	6.10	1.70	12.1	4.40	-	0.70
4	3.62	0.52	9.00	2.20	11.9	6.60	2.60	0.70
5	1.35	0.31	6.90	2.90	10.9	4.50	3.80	1.30
6	2.15	1.11	5.90	2.80	17.2	5.70	-	-
7	1.60	0.68	4.40	2.10	6.40	4.90	2.80	0.80
8	2.06	1.14	12.8	4.20	9.40	3.80	2.00	0.60
9	1.41	0.52	3.90	3.30	8.10	4.00	1.20	0.50
11	2.92	0.77	2.80	3.90	7.10	4.30	0.90	0.80
10	-	-	1.20	2.50	5.00	3.30	0.70	0.70
12	1.81	0.25	5.70	1.70	7.00	3.10	0.90	0.70
14	-	0.77	5.00	2.10	7.90	3.40	1.00	0.70
15	1.75	0.74	4.70	2.20	7.40	4.60	2.80	1.20
16	0.37	0.25	10.0	2.90	1.10	0.60	0	0

Большие различия в химическом составе вод на мелководных участках, охватывающих большую часть акватории озера, создают пеструю картину распределения продуктивности на литорали; вариации здесь могут превышать двукратную величину (от 1,3 на ст. 5 до 2,9 мг/л на ст. 11), а различия между литоралью и глубоководной частями еще больше.

Летом, несмотря на значительно более высокий уровень ПП, в характере распределения интенсивности фотосинтетических процессов не происходит больших изменений. Притокам, как всегда, присущи минимальные величины. В несколько раз меньшей, по сравнению с центральным плесом, продуктивностью обладает юго-западный район (ст. 10, 11), который во все гидрологические фазы отличается по многим гидрохимическим и гидробиологическим показателям. Сюда поступают солоноватые воды р. Кучибовь и из-за морфометрической обособленности региона надолго здесь задерживаются, создавая специфические условия для развития гидробионтов. Еще Гресе Б. С. (1929) указывал на то, что «С. М. Вислоух, исследовавший только донную флору диатомовых озера Неро, обнаружил там значительное количество типичных солоноватоводных видов». Несмотря на солидную давность лет на указанное обстоятельство до сих пор не обращалось пристального внимания. В наиболее поздней работе по видовому составу и структуре фитопланктонного сообщества без увязки с химическим составом воды отмечается, что на ст. 11 «присутствовал специфичный фитопланктон с невысокими количественными показателями... Наряду с диатомовыми и зелеными, вегетирующими по всей акватории, существенную долю фитопланктона на ст. 11 составляли золотистые и криптофитовые водоросли» (Ляшенко, 1991).

В пору наиболее массового развития планктонных организмов несколько меньшей, но довольно высокой продуктивностью обладают и области, прилегающие к юго-восточному берегу (ст. 14, 15). Более низкая продуктивность фитопланктона на всей южной акватории может быть обусловлена «обеднением воды биогенными элементами при обильном зарастании высшей водной растительностью» (Сигарева, Ляшенко, 1991). При всей вероятной справедливости этой гипотезы нельзя забывать и о возможном влиянии на продуктивность юго-западной части более высокой минерализации и специфического химического состава ее вод.

Относительно низкие, по сравнению с центральной частью озера, показатели продуктивности характерны и для приустьевых участков рек Сары и Ишни (ст. 2, 9). Заметные колебания величины фотосинтеза (и многих других показателей), как летом, так и в другие сезоны, на приустьевых участках могут быть вызваны чисто техническими причинами. Отбор проб в точках, отстоящих друг от друга всего на несколько десятков метров, из-за высоких градиентов в параметрах качества воды может кардинально изменить состав пробы как в гидрохимическом, так и гидробиологическом планах. Поэтому, хотя в целом на приустьевых участках притоков мы имеем более низкие показатели продуктивности, иногда случаются обратные ситуации.

Осенью характер распределения величины фотосинтеза также не претерпевает существенных изменений. Только на ст. 15, расположенной

в самой крайней точке юго-восточного плеса, первичная продукция в 1988 и 1989 гг. оставалась на уровне величин, присущих центральной части, тогда как на большей части акватории она была в 2—3 раза меньше.

По характеру сезонной динамики интенсивности фотосинтеза и деструкции пелагиальные и литоральные озёрные участки практически не отличаются от речных (рис. 2.14): здесь и там внутри года они имеют кулолообразный вид, что было замечено ранее (Сигарева, 1991).

Следует указать на некоторые полезные связи между различными характеристиками продуктивности, которые позволяют оценить ПП в оз. Неро с несколько иных позиций.

Априори можно полагать, что если в водоеме взвешенные вещества представлены в основном активно вегетирующими низшими водорослями, то концентрация хлорофилла в фитопланктоне может быть оценена по содержанию органического углерода во взвешенном веществе. Корреляционный анализ показывает, что между значениями этих показателей (табл. 5 Приложения) в оз. Неро существует достоверная связь, отражаемая регрессионным уравнением:

$$X_l = (9,7 \div 10,8 C_{\text{орг}}), \text{ мкг/л } (r = 0,84, p = 0,05, N = 64),$$

где $C_{\text{орг}}$ — в мгС/л.

При среднем значении $C_{\text{орг}}$ на ст. 4 в 1988—89 гг., равном ~ 7 мгС/л, расчет по этому соотношению приводит к величине $X_l = 36$ мкг/л, что только на 12% ниже соответствующего результата, полученного путем усреднения данных прямых измерений хлорофилла.

Наличие более высокой корреляции ($r > 0,84$) между этими параметрами характерно для глубоководных водоемов, где летом основная часть взвешенных частиц действительно представлена активно вегетирующими водорослями. Относительная грубость оценки одного из этих параметров по измеренным значениям другого в мелководном оз. Неро вызвана тем, что здесь в составе взвешенного материала в заметных количествах могут присутствовать частицы сапропелевых отложений, поднятые со дна даже при ветрах небольшой силы, которые вносят меняющийся во времени и пространстве вклад в формирование органической составляющей ивзесей.

Обобщение результатов параллельных определений ПП по хлорофиллу и кислороду позволило Бульону В. В. (1993) предложить уравнение:

$$ПП_{\text{орг}} = 30 C_{\text{хл}},$$

связывающее средние величины скорости фотосинтеза при оптимальном освещении ($ПП_{\text{орг}}$, мкгС/л сут) с содержанием хлорофилла a ($C_{\text{хл}}$, мкг/л) в озерах планктонного и детритного типов. В соответствии с этим уравнением при среднегодовом уровне хлорофилла на двух рассматриваемых

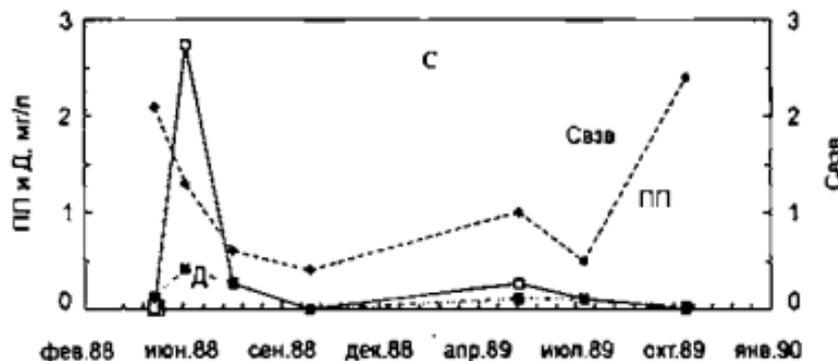
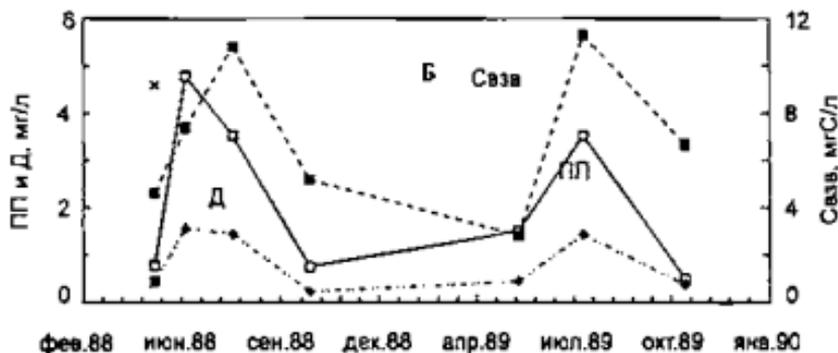
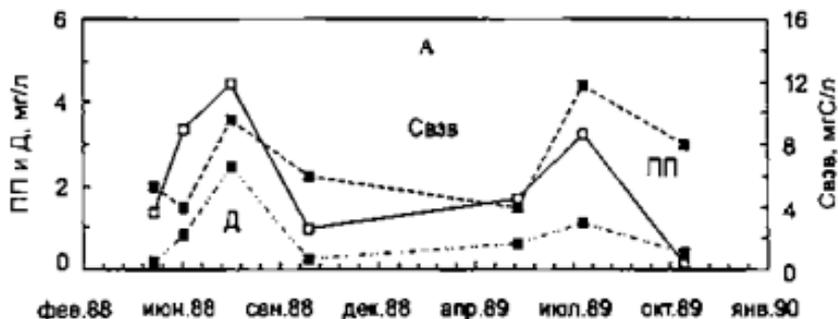


Рис. 2.14. Динамика интенсивности перифитной продукции и деструкции в пелагиали (А), литорали (Б) оз. Неро (ст. 4,8) и р. Сарс (С)

станциях оз. Неро в 1987 г., равном 67 мкг/л (Сигарева, Ляшенко, 1991), получим $ПП_{\text{орг}} = 2,0 \text{ мгС/л сут}$ или с учетом коэффициента перехода (2,67) от углеродных единиц в кислородные (Винберг, 1960, Романенко, Кузнецов, 1974; Бикбулатов, 1979, 1981) — $5,4 \text{ мгО}_2/\text{л сут}$ и далее с учетом средней глубины (1,5 м) водоема — $8,1 \text{ гО}_2/\text{м}^2 \text{ сут}$. Близость расчетных величин ($8,1$ и $8,7 \text{ гО}_2/\text{м}^2 \text{ сут}$), полученных двумя независимыми методами, позволяет расширить область применения уравнения Бульона В. В. и распространить его на мелководные гипертрофичные озера. Отсюда же следует вывод, что оз. Неро относится к планктонному типу водоемов.

Необходимо указать на то, что для оз. Неро неприменимы любые уравнения, связывающие ПП или содержание хлорофилла с прозрачностью воды по диску Секки, поскольку при одном и том же уровне прозрачности глубина эвфотной зоны и зоны прекращения фотосинтеза в этом водоеме различаются более чем в 3 раза (Сигарева, 1991). Дополнительным аргументом в пользу этого вывода служит отсутствие достоверной корреляции между указанными параметрами, значения которых приведены в табл. 5 Приложения.

При средней интенсивности фотосинтеза фитопланктона оз. Неро, равной $5,8 \text{ гО}_2/\text{м}^3 \text{ сут}$, среднем вегетационном периоде $T_v = 180$ суток и общем объеме водной массы озера $V = 90 \times 10^6 \text{ м}^3$ годовая ПП низших водорослей в кислородных единицах будет равна $94000 \text{ тО}_2/\text{год}$. С учетом известных коэффициентов, переходя к органическому углероду ($K = 0,375$) и органическому веществу ($K = 0,75$), получим соответственно 35000 тС/год и 70000 тОВ/год .

7.2.2. Продукция высшей водной растительности. До 1989 г. было принято считать, что почти 80% акватории оз. Неро зарастает высшей водной растительностью (ВВР) (Фортунатов, Московский, 1973; Довбня, 1991). При таких условиях основным источником пополнения водоема органическими веществами должны были быть макрофиты. Однако здесь отмечены сильные колебания как общей площади зарослей, так и отдельных сообществ гидрофитов (Довбня, 1991, 1995). Последующие измерения показали, что общая площадь гидрофильной растительности лишь немногим превышает 20% акватории (Довбня, 1991). Столь разительные изменения, если они действительно имели место, могли произойти вследствие повышения уровня воды в связи с постройкой новой плотины на р. Вексе. В пользу этого предположения свидетельствует сильное сокращение площадей погруженных растений, особенно рдестов (Довбня, 1991).

Отмеченные большие временные вариации ареалов расселения макрофитов в водоеме, находящемся под пристальным вниманием общественности, делают необходимым проведение частых наблюдений за их распределением по акватории, флористическим составом и другими важными характеристиками, в том числе продукционными. Чтобы в даль-

нейшем иметь возможность легче оценивать вклад ВВР в общее производство органического материала необходимо найти связи между количеством ОВ и другими более доступными показателями фитомассы.

Для сравнительного анализа продукция макрофитов должна быть измерена или представлена в сухом беззольном органическом веществе. В практике исследований часто ограничиваются такими характеристиками как воздушно-сухая (ВСМ) и абсолютно сухая (АСМ) масса растений (Белавская, 1975; Довбня, 1979, 1991, 1995; Папченко, 2001). Априори можно полагать, что между этими показателями существуют достаточно репрезентативные связи, которые могут позволить перейти от менее трудоемкого определения ВСМ к АСМ. Действительно, статистический анализ, опирающийся на исходные данные Довбни И. В. (1979) по различным видам растительности трех верхневолжских водохранилищ — Ивановского, Угличского и Горьковского, в региональном отношении близких к оз. Неро, показывает, что между указанными параметрами существует близкая к функциональной связь:

$$АСМ = 0,9 ВСМ \quad (N = 54, r = 0,998 \text{ при } p = 0,05).$$

Для 22 доминирующих в средней полосе европейской части России видов водной растительности это уравнение приводит к ошибке в расчетах, не превышающей 5%. Расчет АСМ по приведенному соотношению для ВВР оз. Неро дает несколько худший результат (ошибки доходят до 10%).

Из-за вариаций зольности препаратов абсолютно сухой вес обычно не позволяет прямо перейти к содержанию органического вещества. Давно замечено (Грезе, 1929), что относительно высокая минерализация гидрокарбонатно-хальциевых вод оз. Неро при высоких скоростях фотосинтеза приводит к осаждению на поверхности листьев и стеблей твердого карбоната кальция. Последний жестко связывается с телами растений и трудно поддается удалению при обычных способах их подготовки для измерения фитомассы (Белавская, 1975). Косвенным подтверждением этому может служить обнаруженное (Довбня, 1995) низкое (60 и 75%) содержание органического вещества соответственно в *Sagittarium demersum* и *Stratiotes aloides*. Без учета двух отмеченных сообществ, занимающих в сумме менее 0,2% площади зарастаний, соотношение между содержащим ОВ и абсолютно сухой массой остальных 12 исследованных видов растительности оз. Неро может быть записано в виде:

$$ОВ = 0,89 АСМ \quad (N = 12, r = 0,9 \text{ при } p = 0,05),$$

использование которого приводит к ошибке, не превышающей 8%. Отсюда же следует, что средняя зольность основных видов макрофитов, высушенных при 70 °С, составляет 11%.

Комбинируя вышеприведенные уравнения получим: $ОВ = 0,8 ВСМ$,

т. е. содержание ОВ в надземных частях сообществ высшей водной растительности средней полосы России, в том числе и оз. Неро, развивающейся в нормальных условиях (при отсутствии декальцинирования вод), составляет около 80% воздушно-сухого веса. Можно также полагать, что применимость вышеприведенных уравнений шире, чем для растительности исследованных регионов.

Годовая продукция органического вещества макрофитами (ПП_м, тОВ/год) была рассчитана Довбней И. В. (1995) по интенсивности производства фитомассы отдельных видов гидрофитов (Ф, г/м² год) и занимаемых ими площадей (S, км²) по простой формуле:

$$ПП_m = 1,2 \times \Phi \times S,$$

где 1,2 — поправочный коэффициент на опад листьев, выедание беспозвоночными и выделение растворенных ОВ в окружающую водную среду в процессе роста (Белавская, 1975; Довбня, 1995).

В 1989 г. она составляла 10000 тОВ/год (табл. 2.36), что в 7 раз меньше среднегодовой продукции фитопланктона.

Таблица 2.36

Продукционные характеристики надземной части макрофитов оз. Неро (по Довбне, 1995. С небольшими поправками)

Формация	S, км ²	Фитомасса, г/м ²			Продукция, т/год		
		ВСМ	АСМ	ОВ	ВСМ	АСМ	ОВ
<i>Typha angustifolia</i>	5.53	1420	1220	1130	9420	8100	7500
<i>Potamogeton perfoliatus</i>	2.76	180	159	131	596	527	434
<i>Nuphar lutea</i>	1.39	273	233	205	456	389	342
<i>Phragmites australis</i>	1.33	1250	1090	1020	2000	1740	1630
<i>Carex acuta</i>	0.037	581	527	495	25.8	23.4	22.0
<i>Scirpus lacustris</i>	0.030	863	753	707	31.1	27.1	25.5
<i>Ceratophyllum demersum</i>	0.018	413	361	217	8.9	7.8	4.7
<i>Butomus umbellatum</i>	0.018	560	509	431	12.1	11.0	9.3
<i>Polygonum amphibium</i>	0.013	230	200	186	3.6	3.1	2.9
<i>Sagittaria sagittifolia</i>	0.012	490	428	363	7.1	6.2	5.2
<i>Myriophyllum spicatum</i>	0.010	417	365	217	5.0	4.4	2.6
<i>Glyceria maxima</i>	0.003	695	612	572	2.5	2.2	2.1
<i>Stratoides aloides</i>	0.002	760	638	481	1.8	1.5	1.2
Сплавнины	0.001	1440	1210	1060	1.7	1.5	1.3
Прочие	0.085	228	200	170	23.3	20.4	17.3
Всего	11.2	-	-	-	12600	10900	10000

Учет корневой системы заметно снижает различия в оценках средних по озеру продукционных возможностей низших и высших растений. Измерения последних лет продукции корней луговой растительности с применением стабильных изотопов углерода и азота показывают, что она равна или превышает продукцию надземных частей (Milchaus, Lawenloth, 2001). В водных растениях соответствующие соотношения варьируют в широких пределах: у рогоза широколистного (*Typha latifolia* L.) в условиях выращивания на экспериментальной прудовой базе биомасса надземных частей (НЧ) превышала подземные (ПЧ) на 30—35% (Трусов, 1988). В зрелом сообществе *Typha domingensis* наоборот НЧ в 1,4 раза была ниже ПЧ (Pflaenzels Fraga, 1981).

В ассоциациях погруженных растений Хоперского заповедника продуктивность подземных и надземных органов была близка по величине, а в воздушно-водных ассоциациях наблюдалось преобладание НЧ над ПЧ (соотношение 1.2 : 1) (Красовская, 1966). Столь широкие вариации рассматриваемого соотношения в водных биоценозах позволяют только грубо оценить продукцию корневой системы. Если в первом приближении принять, что в водных растениях, как и в наземных, НЧ : ПЧ = 1, то общая продукция макрофитов составит 20000 тОВ/год, что в 3,5 раза ниже годовой продукции фитопланктона.

На участках с большой плотностью растений, таких как заросли *Potamogeton australis* и *Typha angustifolia*, надземные части ВВР продуцируют ОВ со скоростью 1020—1130 гОВ/м² год (табл. 2.35). Если учесть, что такое количество ОВ создается за 100 суток вегетации (укосы произведены в конце июля — начале августа), то суточный прирост надземной части фитомассы составит 10,2—11,3 гОВ/м² сутки, а общей — примерно в два раза больше. По скорости прироста органической массы макрофиты на отдельных участках могут существенно превосходить летний фитопланктон. Например, низшие водоросли в июле 1988 г. синтезировали ОВ со средней по озеру скоростью 9,6 мгО₂/л сутки (табл. 2.35), что равносильно 14 гО₂/м² сутки или, в других единицах, около 11 гОВ/м² сутки.

7.2.3. Продукция альгоценозов эпифитона. Сырая биомасса сообщества водорослей на макрофитах (эпифитон) за период с июля по август 1987 г. в среднем за месяц составляла 14,6 г/м², при вариациях от 0,8 до 61 г/м² (Метелова, 2001). В сумме за вегетационный сезон (6 месяцев) она, видимо, не превышала 90 г/м². Обычно в сыром планктоне пресноводных водоемов содержится около 85% воды, но основная доля образований в оз. Неро приходится на диатомовые водоросли (Метелова, 2001), которые в среднем на 50% (Бикбулатов, 1979) состоят из соединений кремния, поэтому доля воды в них может быть меньше. Поскольку, как будет видно из дальнейшего изложения, вариации содержания твердого вещества и воды в эпифитоне не могут решающим образом сказаться на оценках соотношения их продукции с продукцией фитопланктона от-

крытой части водоема и макрофитов, то для простоты расчетов примем, что содержание воды в диатомовом эпифитоне составляет 70%. В таком случае за вегетационный сезон продукция эпифитона оз. Неро в расчете на сухую биомассу составит $0,3 \times 90 = 27 \text{ г/м}^2 \text{ год}$. С учетом 50%-го содержания соединенной кремния в сухом весе диатомовых водорослей, составляющих основу эпифитона этого водоема, получим среднюю величину продукции органического вещества, равную $14 \text{ гОВ/м}^2 \text{ год}$. Такое распределение продукции ОВ имеет место на площади 12 км^2 (20% общей площади озера) и, в соответствии с этими выкладками, общая продукция альгоценозов эпифитона не должна существенно отличаться от 170 тОВ/год , что составляет менее 1% от продукции ВВР. Таким образом, в оз. Неро учет альгоценозов эпифитона практически не сказывается на соотношении продукций фитопланктона и макрофитов.

7.2.4. Деструкция органического вещества. Значительная часть синтезируемого фитопланктоном и макрофитами вещества обычно подвергается трансформации непосредственно в самих водоемах. Наиболее масштабными из процессов преобразования ОВ в водоемах являются осуществляемые бактериями деструкционные процессы. Применение стандартного кислородного метода (темные склянки) приводит к величине общей деструкции (Д), т. е. установлению суммарной траты O_2 на окисление аллохтонных и автохтонных ОВ и не существует приемлемых путей разделения ее на естественные составляющие (поступающих с притоками, синтезируемых фитопланктоном и макрофитами). В то же время при определении продукции в светлых склянках выделение O_2 осуществляется исключительно за счет деятельности низших водорослей и по этим причинам, на первый взгляд, между ПП фитопланктона и Д не должны наблюдаться какие-либо связи. Однако существенное преобладание в водной массе оз. Неро лабильных ОВ планктонного генезиса (табл. 5 Приложения) в совокупности с качественной схожестью сезонной динамики интенсивностей деструкции и ПП (рис. 2.14), делает оправданной попытку связать эти параметры. Для вегетационных сезонов 1988—1989 гг. взаимозависимость между ними характеризуется регрессионным уравнением:

$$D = 0,50 + 0,36 \times \text{ПП} \quad (r = 0,82 \text{ при } N = 66, p = 0,05),$$

которое во многих случаях может быть использовано для оценочных расчетов.

Интенсивность продуцирования ОВ водорослями в период вегетации в подавляющем большинстве случаев превышает интенсивность деструкции всего пула ОВ. Ситуация, при которой отношение Д/ПП больше 1,0 встречается весной и летом только в р. Саре и на станциях юго-западного плеса (табл. 2.35; ст. 10 и 11). Осенью зона с превышением деструкции ОВ над его продукцией начинает охватывать более широ-

кие области, в том числе перекидывается и на пелагиальные участки, хотя на многих станциях еще сохраняется обратное положение. Отдельные случаи превышения скоростей деструкционных процессов над интенсивностью первичного продуцирования отмечались ранее и на самой глубоководной станции. «Примечательно, что такое превышение деструкции над продукцией отмечалось в весенний период при наиболее высоких показателях степени развития зоопланктона... Однако вклад зоопланктона в планктон оз. Неро в остальные периоды снижался и, по-видимому, не играл существенной роли в потреблении кислорода» (Сигарева, 1991). Несбалансированность процессов синтеза и распада органического вещества во все продолжительное время вегетации, проявляющаяся в практически постоянном превышении продукции над деструкцией, ведет к накоплению избыточного количества ОВ не только в волной толще, но и, главным образом, в доинных отложениях. При продолжительной штормовой погоде в придонных слоях начинается дефицит кислорода (Гресе, 1929). Зимой, когда запасы кислорода, уходящие под лед, быстро расходуются, наступают заморные явления (Ривьер, 1991; Фортианов, Московский, 1973).

Потенциально способная к быстрой деструкции часть органических соединений в июле—августе может доходить до 30% общего количества ОВ (табл. 2.28—2.29). Столь высокие концентрации лабильной фракции в указанный период в значительной мере определяются преобладанием в составе свежесинтезированных фитопланктоном ОВ углеводов, которые легко подвергаются атаке сообщества микроорганизмов. К этому времени приурочены и максимальные количества взвесей, основу которых в подавляющем числе случаев в оз. Неро составляют низшие водоросли.

Динамика двух показателей интенсивности деструкционных процессов — потребления кислорода за 1 сутки при температуре водоема (D) и биохимического потребления кислорода за 5 суток при фиксированной температуре 20 °С (BPK_5) в озерной воде (за исключением притоков) имеет схожий вид. Между ними существует регрессионная зависимость:

$$BPK_5 = 3,4 + 1,3 D, \text{ мгО}_2/\text{л} \quad (r = 0,83; \text{ при } N = 84, p < 0,05).$$

Несмотря на относительно высокий коэффициент корреляции, использование этого оценочного уравнения в ряде случаев может приводить к значительным ошибкам. Действительно, в общем случае при среднем значении $D/BPK_5 = 0,32$, это отношение варьирует в довольно широких пределах: от 0,03 до 0,80. В то же время для июня—июля, когда колебаниями температуры воды в первом приближении можно пренебречь, подобная связь становится заметно теснее; среднее отношение D/BPK_5 становится близким к 0,45 при существенно меньших вариациях (от 0,3 до 0,8). Последнее означает также, что в летние месяцы разложение значительной части лабильной фракции ОВ проходит довольно

быстро: от 30 до 80% ее распадается за 1 сутки при существующей температуре водосема.

Суммируя сказанное выше, можно заключить, что хотя в водной массе оз. Неро летом идет довольно интенсивная микробальная деструкция, бактерии не в состоянии разложить всю синтетизированную биомассу. Расчеты, проведенные при тех же предположениях, что и в случае вычисления ПП, показывают, что в период открытой воды 1988 г. при средней продукции фитопланктона $5,8 \text{ гО}_2/\text{м}^3$ за сутки, интенсивность деструкции всего ОВ не превышала $2,6 \text{ гО}_2/\text{м}^3$ за сутки. Это равносильно 31000 т ОВ/год. В то же время суммарная продукция первичных продуцентов (фитопланктона и макрофитов), как мы видели выше, составляла 90000 т ОВ/год (продукцию элифитона из-за малых ее значений можно не принимать во внимание). Таким образом, за 6 месяцев вегетационного периода деструкции в водной массе могло подвергнуться менее 35% новообразованного органического материала.

К сожалению, для оз. Неро нет прямых сведений относительно деструкции в донных отложениях и анаэробной деструкции зимой в его водной массе. Поэтому не удается составить полный баланс и тем самым указать на масштабы возможных ежегодных накоплений ОВ в водосеме.

7.3. Углеводороды, битумоиды и проблемы оценки нефтяного загрязнения

Значительный интерес среди большого разнообразия органических веществ природных вод представляют алифатические углеводороды (УВ), которые часто используются в качестве индикатора нефтяного загрязнения, и битумоиды (БТ) — сумма веществ, извлекаемых из воды при экстракции четыреххлористым углеродом и применяемые для оценки гидрофобных соединений.

Давно и хорошо документировано, что в природных водах могут присутствовать как УВ естественного генезиса, так и попадающие извне со сточными водами аналогичные по составу продукты нефтепереработки (Семенов, 1977). При выборе на водосеме заведомо незагрязненного участка и одновременного измерения на нем содержания углеводородов и органического вещества (в любом надежном и доступном выражении — ХПК, $C_{\text{орг}}$) получают фоновые значения $\text{УВ}^{\text{фон}}$ и $\text{ОВ}^{\text{фон}}$. Их отношение рекомендуется принять за естественный маркер отсутствия нефтяного загрязнения воды в данном водоеме (Matsumoto, 1982). Умножение полученной величины на общую концентрацию органических веществ в загрязненных зонах, приводит к величине естественной ($\text{УВ}_{\text{ест}}$) составляющей на этих участках, а разность между общим количеством углеводородов ($\text{УВ}_{\text{общ}}$) и ($\text{УВ}_{\text{ест}}$) дает оценку антропогенной составляю-

шей ($УВ_{\text{кф}}$), что можно выразить формулой (Ершов, 1983). В наших обозначениях это выглядит следующим образом:

$$УВ_{\text{кф}} = УВ_{\text{обц}} - ОВ_x * УВ^{\text{фон}} / ОВ^{\text{фон}},$$

где $ОВ_x$ — содержание органических веществ в любой точке вне фоновой зоны.

При оценках антропогенной составляющей $УВ$ с использованием индикаторного соотношения большая роль должна отводиться выбору фонового участка, о котором заведомо можно было бы сказать, что здесь не содержатся $УВ$, связанные с продуктами переработки нефти. Далее можно использовать средние величины по фоновому участку, что в общем случае надежнее, или ограничиться данными по единственной точке, что вполне достаточно для не слишком больших и не очень различающихся по характеристике водных масс водоемов. К их числу можно отнести и оз. Неро.

Выше мы уже отмечали, что 20% акватории водоема занято зарослями высшей водной растительности. Самые крупные массивы зарослей сосредоточены в районе заказника в юго-восточной части озера. Здесь многие заливы сплошь покрыты и пронизаны растениями. Сосредоточенные здесь мощные куртины тростника, камыша и рогоза, соединенные между собой лишь небольшими протоками, отгораживают несколько небольших открытых водных участков. Стоящие почти сплошной стеной заросли препятствуют быстрому перемешиванию вод этих участков с основными водными массами озера. Даже при сильном ветровом волнении сюда в больших количествах не могут проникать воды, загрязненные нефтепродуктами и развите первичных и других продуцентов происходит без существенного влияния различных загрязнителей, что определяет наибольшее фитоценоотическое разнообразие и видовую насыщенность сообществ (Дамская, 1921, Довбня, 1991). Таким образом, ст. 12 расположена в районе с наименьшим поступлением загрязняющих веществ и наиболее труднодоступное и ограниченное для посещения рыбаками и охотниками место.

Кроме того, наблюдения в течение всего 1989 г. по ряду гидрофизических и гидрохимических характеристик (электропроводность, температура, минерализация, солевой состав и др.) показали, что на большей части акватории содержание консервативных компонентов (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Cl^- , SO_4^{2-}) в безледный период мало отличается при переходе от одной станции к другой, в том числе и расположенной в юго-восточном плесе ст. 12. Например, жесткость воды на ст. 12 в 1989 г. изменялась от 4,97 мг-экв/л зимой до 2,77 мг-экв/л летом; соответствующие показатели для центральной части озера (ст. 4) были 4,77 и 2,46 мг-экв/л. Исключением являлись основные притоки — реки Сара и Ишня (ст. 1, 16) и небольшие участки, непосредственно прилегающие к их устьям (ст. 2, 9), а также солоноватоводный юго-западный участок (ст. 10, 11).

Указанные обстоятельства — высокая изолированность вод от прямого попадания загрязнений в совокупности с незначительными отличиями в минерализации и солевом составе от основных озерных водных масс позволяют выбрать ст. 12 в качестве фоновой. Только при описании зимней ситуации, в отсутствие необходимых данных по этой станции, в качестве фоновых использованы материалы по станции № 15. Она расположена на восточном побережье вдали от прямых источников загрязнения. Вследствие значительного уменьшения водообмена и отсутствия ветрового перемешивания в подледный период сюда, очевидно, не могли попадать загрязненные нефтепродуктами стоки. Кроме того, динамика минерализации и солевого состава на этой станции весьма схожа с соответствующими показателями воды на ст. 12.

По данным Ершова Ю. В., использовавшего методы экстракции и колоночной хроматографии с ИК — спектрофотометрическим окончанием, в подледный период 1990 г. в оз. Неро максимальные концентрации УВ сосредоточены в северо-западной (ст. 5) и центральной (ст. 4д, дно) частях озера, откуда они сразу попадают в Вексу (ст. 6), которая, протекая по открытой местности до с. Белогостицы (место отбора проб), еще более обогащается углеводородами (табл. 2.37). Содержание их, в целом невысокое, может достигать до 3% от суммы органических веществ.

Таблица 2.37

Пространственное и сезонное распределение суммы органических веществ (ОВ), углеводородов (УВ) и битумоидов (БТ) в подледный период (6 марта) 1990 г, мг/л

№ ст.	УВ _{сум}	БТ	ОВ	УВ _{сум} /ОВ, %	БТ/ОВ, %	УВ _{сум}	УВ _{сум}	УВ _{сум} /УВ _{сум}	УВ _{сум} /11/К
1	0.013	0.45	21.6	0.06	2.1	0.049	—	—	0.3
2	0.083	0.67	21.8	0.38	3.1	0.050	0.033	0.7	1.7
4 п	0.028	0.80	16.3	0.17	4.9	0.037	—	—	0.6
4 д	0.350	0.28	25.1	1.40	1.1	0.057	0.293	5.1	7.0
5	0.400	0.43	21.1	1.89	2.0	0.048	0.352	7.3	8.0
6	0.740	0.68	23.1	3.20	2.9	0.053	0.687	13.1	14.8
7	0.025	1.14	19.8	0.13	5.8	0.045	—	—	0.5
15	0.028	0.38	12.3	0.23	3.1	0.028	0.000	0.0	0.6
16	0.210	0.43	24.4	0.86	1.8	0.056	0.154	2.8	4.2

Проведенные в соответствии с вышележащим расчеты показывают, что на станциях № 5, 6, 4 д содержания углеводородов антропогенного происхождения во много раз превышают естественный фон. Таким образом можно полагать, что на северо-западной окраине оз. Неро (ст. 5) имеется или, по крайней мере, существовал в 1990 г. заметный точечный источник нефтяного загрязнения, влияние которого распространилось

вплоть до центральной зоны. Загрязнена нефтепродуктами и р. Ишля (ст. 16). На всех указанных станциях содержание углеводородов во много раз превышало санитарные нормы — вплоть до 15 раз на р. Вексе (последний столбец табл. 2.37). Здесь необходимо отметить, что при оценке уровня превышения ПДК не имеет значения источник их происхождения; как естественные, так и искусственные УВ вследствие идентичности их состава и строения воздействуют на биоту одинаковым образом. В придонной воде как зимой, так и летом углеводородов больше, чем на поверхности (ст. 4 п и 4 д); выше здесь и концентрация органических веществ, но неравенство соотношений $УВ_{общ} / ОВ$ в указанных точках свидетельствует о серьезных преобразованиях состава ОВ за время продвижения придонных вод к поверхности. Насколько и как это связано с метанообразованием из углеводородного сырья и с другими процессами трансформации ОВ в анаэробных условиях — предстоит выяснить. Неожиданный характер носит вертикальное распределение битумидов — в поверхностной пробе их почти в 3 раза больше, чем у дна.

Весной, ближе к концу половодья, характер пространственного распределения углеводородов значительно меняется: максимальные концентрации начинают встречаться в притоках (ст. 1 и 16) и прилегающих к ним участках (ст. 2 и 9), а также в южных районах, где превышение ПДК достигает 7 и более раз (табл. 2.38). Как и зимой относительно высокие

Таблица 2.38

Распределение углеводородов, органического вещества и битумидов в осенний период (20 апреля 1990 г.), мг/л.

№ ст	УВ _{общ}	БТ	ОВ	УВ _{общ} /ОВ, %	БТ/ОВ, %	УВ _{прт}	УВ _{дн}	УВ _{прт} /УВ _{дн}	УВ _{общ} /ПДК
1	0.120	0.21	16.9	0.71	1.2	0.090	0.030	0.3	2.4
2	0.320	0.41	18.9	1.69	2.2	0.101	0.219	2.2	6.4
3	0.050	0.23	18.0	0.28	1.3	0.096	-	-	1.0
4	0.019	0.23	13.6	0.14	1.7	0.072	-	-	0.4
5	0.110	0.25	15.8	0.69	1.6	0.084	0.026	0.3	2.2
6	0.051	0.26	17.2	0.30	1.5	0.091	-	-	1.0
7	0.150	0.23	17.2	0.87	1.3	0.091	0.059	0.6	3.0
8	0.028	0.31	24.9	0.11	1.2	0.132	-	-	0.6
9	0.140	0.16	24.4	0.57	0.7	0.130	0.010	0.1	2.8
10	0.150	0.15	17.4	0.86	0.9	0.092	0.058	0.6	3.0
11	0.010	0.30	18.5	0.05	1.6	0.098	-	-	0.2
12	0.110	0.21	20.7	0.53	1.0	0.110	0.000	0.0	2.2
14	0.370	0.16	19.6	1.89	0.8	0.104	0.266	2.6	7.4
15	0.350	0.18	23.1	1.52	0.8	0.123	0.227	1.9	7.0
16	0.098	0.42	25.1	0.39	1.7	0.133	-	-	2.0

Таблица 2.39

Распределение углеводов, органического вещества и битуменов
в летний период (1990 г.), мг/л.

№ ст	УВ _{обс}	СТ	ОВ	УВ _{обс} /ОВ, %	БТ/ОВ, %	УВ _{обс}	УВ _{обс}	УВ _{обс} /УВ _{обс}	УВ _{обс} /ЦДК
июль									
1	0.019	0.15	11.2	0.17	1.3	0.013	0.006	0.4	0.4
2	0.017	0.40	22.4	0.08	1.8	0.027	—	—	0.3
3	0.035	0.40	24.9	0.14	1.6	0.030	0.005	0.2	0.7
4	0.018	0.45	31.5	0.06	1.4	0.038	—	—	0.4
5	0.028	0.50	35.9	0.08	1.4	0.043	—	—	0.6
6	0.026	0.50	24.2	0.11	2.1	0.029	—	—	0.5
7	0.024	0.55	30.8	0.08	1.8	0.037	—	—	0.5
9	0.044	0.50	29.0	0.15	1.7	0.035	0.009	0.3	0.9
10	0.038	0.50	25.7	0.15	1.9	0.031	0.007	0.2	0.8
11	0.038	0.45	21.8	0.17	2.1	0.026	0.012	0.5	0.8
12	0.034	0.48	28.4	0.12	1.7	0.034	0.000	0.0	0.7
15	0.035	0.40	26.0	0.13	1.5	0.031	0.004	0.1	0.7
16	0.051	0.40	28.2	0.18	1.4	0.034	0.017	0.5	1.0
август									
1	0.140	0.28	16.9	0.83	1.7	0.028	0.112	4.0	2.8
2	0.078	0.25	19.6	0.40	1.3	0.032	0.046	1.4	1.6
3	0.032	0.68	39.4	0.08	1.7	0.065	—	—	0.6
4 п	0.031	0.65	33.9	0.09	1.9	0.056	—	—	0.6
4 д	0.065	0.70	36.7	0.18	1.9	0.060	0.005	0.1	1.3
5	0.036	0.68	33.0	0.11	2.1	0.054	—	—	0.7
6	0.038	0.50	33.4	0.11	1.5	0.055	—	—	0.8
8	0.049	0.45	41.6	0.12	1.1	0.068	—	—	1.0
9	0.063	0.45	33.9	0.19	1.3	0.056	0.007	0.1	1.3
10	0.070	0.75	33.7	0.21	2.2	0.055	0.015	0.3	1.4
11	0.038	0.40	23.8	0.16	1.7	0.039	—	—	0.8
12	0.039	0.40	23.8	0.16	1.7	0.039	0.000	0.0	0.8
14	0.093	0.75	39.2	0.24	1.9	0.064	0.029	0.4	1.9
15	0.042	0.45	32.6	0.13	1.4	0.053	—	—	0.8
16	0.026	0.23	30.1	0.09	0.8	0.049	—	—	0.5

величины присущи северо-восточному участку (ст. 5 и 7). На этих же участках, за исключением р. Ишни и ст. 12, выбранной в качестве фоновой, присутствуют в заметных количествах и УВ, входящие в состав нефтепродуктов. Почти повсеместное небольшое превышение санитарных норм по углеводородам позволяет считать оз. Неро в этот период слабо загрязненным водоемом. В то же время некоторые его участки, такие как северо-восточный и устье р. Сары, имеют повышенную степень загрязнения.

Летом оз. Неро освобождается от большей части углеводородов. Содержанке их во время обильного «цветения» водорослей и параллельно развитых деструкционных процессов, за редчайшим исключением, ни в июне, ни в августе не превышает допустимых норм (табл. 2.39). Почти на всей акватории естественная природная составляющая преобладает над антропогенной. Только р. Сара и прилегающий к ее устью небольшой район испытывают заметный антропогенный пресс. По этому показателю лето, пожалуй, наиболее благополучный период в «жизни» водоема.

Осенью ситуация меняется в худшую сторону. Осенние паводочные воды вносят в озеро дополнительные количества углеводородов различного происхождения, которые в условиях пониженной фотосинтетической активности водорослей и снижения интенсивности деструкционных процессов не успевают трансформироваться в другие формы и накапливаются в водоеме. В результате концентрация УВ начинает превышать ПДК почти на всей акватории (табл. 2.40). Санитарное состояние озера в этот период можно считать не совсем благополучным.

Таблица 2.40

Распределение углеводородов, органического вещества и битуменов в осенний период (20 октября 1990 г), мг/л.

№ ст.	УВ _{лет}	БТ	ОВ	УВ _{лет} /ОВ, %	БТ/ОВ, %	УВ _{ос}	УВ _{ос}	УВ _{ос} /УВ _{лет}	УВ _{лет} /ПДК
1	0.075	0.40	28.4	0.26	1.4	0.143	-	-	1.5
2	0.150	0.60	27.9	0.54	2.1	0.141	0.009	0.1	3.0
3	0.058	0.45	29.9	0.19	1.5	0.151	-	-	1.2
4	0.058	0.60	29.5	0.20	2.0	0.149	-	-	1.2
5	0.090	0.60	31.2	0.29	1.9	0.158	-	-	1.8
6	0.240	0.30	29.3	0.82	1.0	0.148	0.092	0.6	4.8
7	0.070	0.35	28.6	0.24	1.2	0.144	-	-	1.4
8	0.038	0.35	31.2	0.12	1.1	0.158	-	-	0.8
9	0.180	0.45	29.5	0.61	1.5	0.149	0.031	0.2	3.6
10	0.058	0.25	24.6	0.24	1.0	0.124	-	-	1.2
11	0.088	0.30	23.1	0.38	1.3	0.116	-	-	1.8
12	0.120	0.30	23.8	0.51	1.3	0.120	0.000	0.0	2.4

№ ст.	УВ _{об}	БТ	ОП	УВ _{об} /ОВ, %	БТ/ОВ, %	УВ _{ст}	УВ _{ст} /УВ _{об}	УВ _{ст} /УВ _{ст}	УВ _{ст} /ЦДК
14	0.053	0.30	30.8	0.17	1.0	0.155	—	—	1.1
15	0.080	0.20	—	—	—	—	—	—	1.6
16	0.018	0.25	35.0	0.05	0.7	0.176	—	—	0.4

Таким образом, при оценках антропогенной составляющей, помимо хорошо обоснованного выбора фоновой станции, важное значение нужно придать и времени отбора проб, поскольку сезонные изменения в жизнедеятельности гидробионтов накладывают ощутимый отпечаток на рассматриваемые соотношения на любом участке, в том числе и выбранном в качестве фона.

Иногда в качестве альтернативы в отсутствие данных по общему содержанию органических веществ за одну из составляющих меры оценки генезиса УВ принимают отношение УВ/БТ (Ершов, 1983). Применение этого критерия к зимним данным по оз. Неро приводит к качественно согласующимся с вышеизложенными результатами по осеннему сезону.

Таблица 2.41

Содержание углеводов антропогенного происхождения (УВ_{ант}) в оз. Неро в 1990 г., рассчитанных с использованием критериев УВ/ОВ (по ОВ) и УВ/БТ (по БТ), мкг/л

№ ст.	Март		Апрель		Июнь		Август		Октябрь	
	по ОВ	по БТ	по ОВ	по БТ	по ОВ	по БТ	по ОВ	по БТ	по ОВ	по БТ
1	0	0	30	0	6	0	112	96	0	0
2	33	34	219	0	0	0	46	13	9	0
3	—	—	0	0	5	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0	0	0	4	0	0
5	352	368	26	0	0	0	0	0	0	0
6	687	690	0	0	0	0	0	0	92	0
7	0	0	59	0	0	0	—	—	0	0
8	—	—	0	0	—	—	0	12	0	0
9	—	—	10	0	9	17	7	21	0	8
10	—	—	58	40	7	8	15	50	0	0
11	—	—	0	0	12	23	0	0	0	0
12	—	—	0	0	0	5	0	17	0	28
14	—	—	266	250	—	—	29	71	0	0
15	0	0	227	219	4	19	0	18	—	—
16	154	178	0	0	17	35	0	1	0	0

Существенная рассогласованность результатов применения двух индикаторов нефтяного загрязнения (УВ/ОВ и УВ/БТ) к природным водам как в количественном, так и в качественном отношении наглядно проявляется при обработке материалов весенней и более поздних съемок (табл. 2.41). Причины этого очевидны: само содержание гидрофобных компонентов в природных водах, составляющее не более 6% от суммы органических веществ, сильно варьирует как в пространстве, так и во времени и поэтому не может служить надежным критерием отделения естественной составляющей углеводородной компоненты от вносимой в водоем с продуктами человеческой деятельности. Поэтому следует с крайней осторожностью относиться к выводам, полученным с применением критериев, подобных битуминодному. Они могут привести к неоправданным затратам при планировании конкретных мероприятий по улучшению качества воды. Наиболее надежными с точки зрения приближения к истине, по всей вероятности, являются результаты, опирающиеся на данные по общему содержанию органических веществ, хотя и они не свободны от критики.

Глава 8

БИОГЕННАЯ НАГРУЗКА

Нагрузка на водоемы и водотоки, будь то водная, токсическая, биогенная, энергетическая или любая иная складывается из двух составляющих — внешней, т. е. поступления соответствующих компонентов из всех внешних источников, включая притоки, и внутренней — поступления их со стороны донных отложений. Соотношение между ними является не только важной классификационной характеристикой первого уровня, поскольку позволяет отнести водоем к одному из двух известных типов — с преобладанием или внешней, или внутренней нагрузки, но и, что особенно ценно, делать обоснованные заключения о направленности развития экосистем и намечать практические пути к их оздоровлению.

8.1. Внутренняя биогенная нагрузка

Для оценки этой составляющей общей нагрузки необходимы сведения как по составу донных отложений на различных участках озера, так и по скоростям выделения различных форм биогенных элементов из илов в воду.

8.1.1. Краткая химическая характеристика донных отложений.
Донные отложения оз. Неро представлены сапропелями (в переводе с греческого — «гниющими влаями»). В основной своей массе они состоят из остатков мелких водорослей и животных, свободно плавающих в воде, т. е. планктонных организмов. В формировании сапропеля принимают участие также остатки высшей водной растительности и поступающие с водосбора органические и минеральные взвешивные и коллоидные частицы. Озерные сапропели чрезвычайно интересны не только с точки зрения общего представления о круговороте веществ и энергии в водоемах. Поскольку их возраст нередко исчисляется многими тысячами лет, то в них можно обнаружить растительные и животные останки, а также предметы материальной культуры давно ушедших времен, поэтому они представляют богатый и благодатный материал для ботаников, зоологов, палеонтологов, климатологов и представителей других научных дисциплин. Широкое и разнообразное применение сапропели получили в народном хозяйстве. Они используются в качестве ценных комплексных удобрений, кормовых добавок в рацион животных, сырья для химической промышленности, лечебных грязей, а в некоторых случаях могут служить в качестве топлива (Сукачев и др., 1943)

Известная с давних пор исключительная разносторонность полезных свойств озерных донных отложений привела к созданию в СССР Сапропелевого комитета, а впоследствии и Сапропелевого института, в трудах которого можно найти множество сведений об этом продукте. Кроме того, ряд ценных статей по сапропелю имеется в трудах различных лимнологических станций. Не остались в стороне от этих обширных исследований и донные отложения оз. Неро. Еще в 1928 г. Молчановым И. В. было заложено 50 основных скважин до глубины 5,2 м с точным определением их местоположения и послойным сбором образцов и почти столько же дополнительных скважин для установления пространственного или вертикального распределения разных видов отложений (Отчет, 1929). Всего было собрано около 200 проб. Анализ 6 из них показал, что ввиду высокого содержания минерального остатка (59,8—62,2%) они не могут быть отнесены к числу ценных в практическом отношении видов сапропеля. Исследования Молчинова И. В. дали возможность составить 5 карт озера Неро:

- 1) карту с указанием местоположения буровых скважин;
- 2) батиметрическую карту;
- 3) пелабагметрическую карту;
- 4) карту с указанием залегания темноватных слоев сапропелита;
- 5) карту с указанием площади распределения светло-серого слабо-зеленоватого глинистого сапропелита (Отчет, 1929).

Исключительно большое внимание уделялось донным отложениям и в дальнейшем (Смирнов, 1957, 1965). Было установлено, что средняя

толщина сапропелевого слоя составляет 4,9 м (на отдельных участках до 20 м), а его объем — $250 \times 10^6 \text{ м}^3$, причем $170 \times 10^6 \text{ м}^3$ из них представляют отложения, достаточно богатые органическим веществом. Химический состав сапропеля варьирует в широких пределах. Обобщенные Фортунатовым и Московским (1973) данные показывают, что для илов оз. Неро характерны повышенная зольность, преобладание фосфора над азотом и высокое содержание кальция (табл. 2.42).

Таблица 2.42

Химический состав сапропеля оз. Неро, % воздушносухого вещества (Фортунатов, Московский, 1973)

Содержание	Зольность	Азот общий	Фосфор	Калий	Кальций	Гумус
Минимум	57.0	0.18	0.25	0.61	0.98	3.0
Максимум	84.6	1.7	2.30	2.15	40.0	25.5
Типичное содержание	70—80	0.4—0.7	0.3—0—8	—	10—30	7—17

Сапропель содержит многие микроэлементы, которые представляют особый интерес с точки зрения ценности кормовых добавок для сельскохозяйственных животных, качества вносимого на поля удобрения и т. п. В поверхностном слое илов (толщина 0,4 см) на разных участках озера по данным эмиссионного спектрографического анализа, выполненных в июне 1963 г. сотрудником ИБВВ АН СССР Кольцовым Г. В., концентрации редких и рассеянных элементов варьировали в довольно широких пределах (табл. 2.43).

Таблица 2.43

Микроэлементы в илах оз. Неро, мкг/кг воздушносухого ила (Фортунатов, Московский, 1973)

Содержание	Cu	Ni	Cr	Pb	V	Mn	Ba
Минимум	28	20	18	14	4	190	330
Максимум	47	78	44	24	67	600	540
Типичные величины	32—34	40—60	30—40	17—23	32—43	250—500	400—500

Им же было установлено, что галлий встречается в ничтожно малых количествах, а содержание титана варьирует в пределах 0,36—2,83 мг/кг сухого ила, поэтому последний следует относить к макрокомпонентам. Содержат илы оз. Неро и кобальт в концентрациях до $9 \times 10^{-4} \%$ от веса сухого ила (Ковальский, Летунова, 1961). Этот элемент входит в состав витамина B_{12} , одного из важнейших стимуляторов роста домашних жи-

дотных, поэтому на него должно быть обращено особое внимание при оценке его кормовой ценности. Содержатся материалы по микроэлементам и другим компонентам в труднодоступных отчетах различных организаций, производивших разведку и оценку запасов сапропеля.

В зависимости от глубины залегания и удаленности от берега илы весьма разнообразны (Корда, Виноградова, 1956). Проведенные в 1990 г. в рамках комплексных исследований ИБВВ РАН анализы поверхностных слоев илов показали, что в пробах, отобранных на открытых участках водоема, содержание органического вещества, определенное методом прокаливания, варьировала в пределах 15—60%, объемная масса сухого вещества от 0,07 до 0,23 г/см³. Наибольшее число частиц (от 25 до 80%) приходилось на размерный интервал менее 0,01 мм. Частицы размером более 0,1 мм составляли лишь около 10%. В приустьевых участках рек встречается черный песчаный ил, в котором содержание ОВ не превышает 15%. Вблизи песчаных берегов широко распространен илистый (заиленный) песок с количеством ОВ не более 3% и объемной массой 1,0—1,4 г/см³; до 80% вещества в них находится в виде фракций размером более 0,1 мм и только 1,5—10% — менее 0,01 мм. Содержание влаги в донных отложениях также подвержено сильным вариациям — от 20% в заиленных песках до 90% и более в черных жидких илах.

Потеря при прокаливании высушенных при 105 °С проб — показатель, который обычно принимается за содержание органических веществ в илах, по акватории озера меняется почти в 2 раза (рис. 2.15). Минимальные значения приурочены к районам, прилегающим к устьям рек Сары и Ишки, максимальные — характерны для ст. 12, расположенной в заповедной зоне и со всех сторон окруженной зарослями высшей водной растительности. Высоко содержание ОВ и в илах, отобранных на глубоководных станциях (ст. 3 и 4), где накапливаются остатки различных организмов.

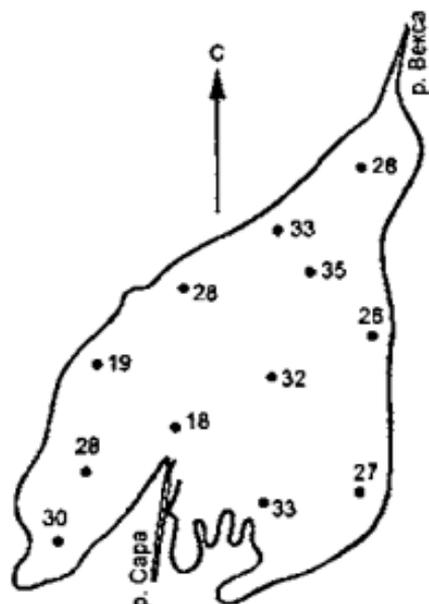


Рис. 2.15. Содержание органического вещества (%) в донных отложениях. Приведены средние значения за май, июль, октябрь 1989 г.

Поверхностные слои на большей части акватории озера представляют собой довольно однородную темную массу с относительно высоким содержанием органического вещества (10—16% органического углерода или 20—32% ОВ в расчете на воздушносухую массу) (табл. 2.44). Различия в величинах, определенных по потере при прокаливании и по органическому углероду, безусловно вызваны тем, что в первом случае под определение органического вещества попадает и часть неорганических соединений, которые улетучиваются при высоких температурах.

Небольшие вариации (1—5%) в составе поверхностных илов в сезонном аспекте, по-видимому, обусловлены некоторой «пятнистостью» в их распределении, которая сказывается при отборе проб. Однако, в отдельные периоды не исключена возможность убыли ОВ из-за преобладания процессов минерализации в поверхностных слоях грунтов над их поступлением из водной массы.

Таблица 2.44

Содержание углерода в илах, % от веса ила (данные Горбенко П. П.)

№ станции	1989 г.			1990 г.	
	мал	июль	октябрь	март	апрель
2	3.5	7.9	—	—	3.5
3	15	12	—	—	9.3
4	13.5	11.5	12.5	—	13.7
5	12	—	10	10	12.9
7	13	12	12	—	12.1
8	12	10	—	—	12
9	11	—	—	—	13.7
10	15	—	—	—	10.1
11	16	—	—	—	10.1
12	—	13	—	11.9	13.4
14	16	11	11	16	13.6

Илы, залегающие на более глубоких горизонтах, обычно содержат меньшее количество ОВ по сравнению с вышележащими слоями вследствие неизбежного протекания процессов их деструкции как в аэробных, так и анаэробных условиях (табл. 2.45).

Однако эта закономерность может быть нарушена вследствие особенностей предшествовавших, в основном, гидрофизических процессов. В годы с относительно повышенным ветровым волнением на ст. 3 происходит более сильный размыв расположенного вблизи этой станции острова, сложенного песком, и перенос относительно тяжелых минеральных

частиц на небольшое расстояние, способствующее перекрытию сапропелевых слоев и соответствующему уменьшению содержания органических компонентов в верхнем горизонте (табл. 2.45).

Таблица 2.45

Содержание углерода в различных слоях илов в апреле 1990 г.
(данные Горбенко Н.П)

№ станции	Горизонт, см	Углерод, % от веса
3	0—5	12.5
	30—35	18.8
	75—80	13.4
4	0—5	13.9
	30—35	11.3
	75—80	9.0

Исследования группового и фракционного состава гумуса выявили некоторые сезонные тренды. За летний период содержание углерода во фракции гуминовых кислот, обычно считающейся относительно стабильной частью ОВ донных отложений, снизилось почти в 2 раза. В то же время содержание ОВ, извлекаемого из илов пирофосфатно-щелочным раствором и представляющего собой сумму гуминовых (ГК) и фульвокислот (ФК), а также неспецифической части гумуса, сохранялось практически неизменным (табл. 2.46). Вероятно высокая активность донной микрофлоры в летний период, непосредственно связанная с температурой, способствует вовлечению в круговорот трудноокисляемых соединений; интенсификация микробиологических деструкционных процессов ведет к увеличению доли «соокисляющихся» стабильных продуктов и одновременно к накоплению фрагментов гуминовых кислот с меньшим

Таблица 2.46

Сезонная динамика качественного состава гумуса на ст. 14,
% воздушносухого веса ($C_{гк}$ и $C_{фк}$ — соответственно содержание
углерода в гуминовых и фульвокислотах. Данные Горбенко Н. П)

Время отбора проб		$C_{гк} + C_{фк}$	$C_{гк}$
1989 г.	май	2.4	1.0
	июль	2.3	0.8
	октябрь	2.5	0.6
1990 г.	март	1.8	0.4
	апрель	2.6	1.0

молекулярным весом. Постоянно происходящее пополнение поверхностных слоев ила органическими веществами планктонного происхождения в вегетационный период также может способствовать поддержанию как общего уровня ОВ, так и количества фракций, извлекаемых раствором пирофосфата натрия.

Распределение белков, точнее белковоподобных соединений, в поверхностных слоях сапропелевых отложений довольно равномерное (табл. 2.47). Максимальные их концентрации, как правило, приурочены к осени, когда на дно попадает большое количество отмерших остатков фитопланктона, содержащих в своем составе лабильные легкодоступные микроорганизмам соединения, к которым относятся и белки. Весной их содержание минимальное, что можно полагать результатом прошедших за длительный зимний период процессов бактериального разложения органических веществ.

Таблица 2.47

Содержание белковоподобных компонентов в илах, мгС/г сухого ила (данные Горбенко Н. П.)

№ станции	1989 г.		1990 г.
	июль	октябрь	апрель
2	30.0	—	18.6
3	38.4	—	24.0
4	41.0	44.7	28.3
7	30.0	46.3	42.0
8	35.6	—	36.5
12	30.6	—	40.5
14	37.0	35.5	36.0

Содержание органических веществ в иловой воде, полученной центрифугированием при 5000 об/мин, указывает на значительную пространственную вариабельность этого показателя (табл. 2.48). Максимальная величина приурочена к илам на ст. 9, расположенной в 100—150 м от устья р. Ишня, которая в течение всего года несет более цветные воды по сравнению с остальными водотоками. Сезонная динамика не выявляется, по всей вероятности, не только из-за некоторой пятнистости иловых отложений, но и из-за относительно высокого постоянного фона, на котором разыгрываются естественные физико-химические и биологические процессы и которые могли бы вести к сдвигу динамического равновесия в ту или иную сторону. Приведенные опорные характеристики иловых отложений позволяют подойти к оценке необходимого объема и характера работ для выяснения их роли в жизни водоема.

Сезонные изменения биохроматной окисляемости
в иловой воде, мг/л

№ станции	1989 г.		1990 г.	
	июль	октябрь	апрель	июнь
2	15.6	—	27.6	21.2
3	18.6	—	—	27.2
4	—	15.9	—	23.4
5	—	14.6	18.6	19.8
7	21.2	17.6	—	—
9	—	—	53.1	43.7
10	—	—	18.3	19.9
12	14.4	—	17.1	21.1
14	14.1	14.3	17.3	33.4

8.1.2. Скорости выделения ОВ и биогенных элементов из донных отложений. Большие трудности определения потока веществ из донных отложений в водную массу в природных условиях приводят к необходимости постановки лабораторных экспериментов, позволяющих выявить наиболее существенные стороны протекающих процессов и дающих возможность перенести полученные результаты на реальную экосистему. Поскольку на большей части акватории озера поверхностные слои или однородны по составу (различия наблюдаются в основном по профилю колонки), то для приближенной оценки внутренней биогенной нагрузки, которая существенным образом должна сказаться на качестве воды, достаточно провести экспериментальные работы на небольшом числе станций на нескольких горизонтах. Для решения этой задачи в 1989 г. были поставлены опыты в двух основных модификациях — краткосрочные (3—6 сут.) в стеклянных трубках небольшого объема и долгосрочные (более 30 сут.) в стеклянных сосудах объемом 0,5 л (анаэробные условия) и 3,0 л (аэробные условия). Опыты проводились с илами из различных горизонтов (0—5 и 120—125 см), отобранных в различные сезоны года, и при разных температурных условиях.

В условиях, имитирующих зимнюю ситуацию в водоеме (анаэробность среды, температура, близкая к нулевой), из поверхностных слоев донных отложений центральной части озера ежесуточно с постоянной скоростью в водную среду поступало 62—63 мг органического углерода с каждого квадратного метра площади дна (табл. 2.49, опыт № 1). В расчете на весь водосом это составляло 1,5 т/сутки, а с учетом длительности существования анаэробных условий (3—4 месяца) 130—180 тонн.

Таблица 2.49

Выделение органических веществ и биогенных элементов из донных отложений ("— опыты проведены в открытых системах с нарушенной структурой ила, " — дефицит кислорода на 2—3 суток эксперимента)

№ опыта	Время и место отбора проб			Условия опыта	Экспозиция, сутки	Интенсивность, мг/м ² сут		
	№ ст.	месяц, год	слой, см			NH ₄	PO ₄	C _{орг}
1	4	02.1989	0—5	анаэробные, 4°	8	—	—	62.8
					17	—	—	62.0
2	4	03.1990	0—5	анаэробные, 4°	10	—	0.09	25.6
					18	3.3	—	—
					22	3.6	0.53	—
					59	2.4	0.49	—
3	4	03.1991	0—5	аэробные, 20°		101	11.6	
4'	3	04.1990	0—5	аэробные, 20°	1	55.5	-0.9	364
					7	13.4	-0.5	0
5'	4	04.1990	0—5	аэробные, 20°	1	73.6	2.18	0
					7	28.0	-0.3	0
6'	4	04.1990	75—80	аэробные, 20°	1	430	0.39	564
					7	110	-0.2	28.6
7	3	06.1989	0—5	аэробные, 20°	3	—	—	117
8	3	10.1990	0—5	аэробные, 20°	1	144	0.22	—
					5''	81.3	5.73	—
9	3	10.1990	100—120	аэробные, 20°	1	105	-0.2	—
					5''	45.9	1.4	—
10'	3	10.1990	100—120	аэробные, 20°	1	260	2.27	297
					5	95.6	0.67	0
11		05.1991	0—5	аэробные, 20°	1	99	1.5	—
12	3	07.1991	0—5	аэробные, 20°	1	169	1.4	—
13	10	07.1991	0—5	аэробные, 20°	1	123	3.4	—
14	15	07.1991	0—5	аэробные, 20°	1	146	2.2	—
15	9	04.1990	0—5	аэробные, 16°	6	—	—	156

Пробы, взятые на той же станции в марте 1990 г. отдавали в воду в 2,5 раза меньше органического вещества, что может быть связано главным образом с климатическими и гидрофизическими особенностями предшествующего летне-осеннего периода, приводящего, как известно, к существенно различным накоплениям в донных отложениях свежесинтезированного ОВ.

Выделение аммонийного азота в процессе аммонификации в условиях анаэробии также практически идет с постоянной скоростью (около $3 \text{ мг/м}^2 \cdot \text{сутки}$) вплоть до 60 суток экспозиции (опыт № 2). В итоге за трехмесячный срок существования анаэробных условий со всей площади озерных илов в воду может поступать около 15 тонн азота в хорошо усвояемой фотосинтетиками форме. Этот пул азота создает базу для весеннего развития водорослей и высшей водной растительности.

Отдача дном фосфатов в зимний период обусловлена другими механизмами. По мере прохождения биохимических деструкционных процессов происходит уменьшение окислительно-восстановительного потенциала в илах и надилловой воде и все более интенсивное восстановление малорастворимых фосфатов трехвалентного железа до легко растворимых фосфатов двухвалентного железа. Следствием этого процесса является появление в водной массе, наряду с другими продуктами, ортофосфатной формы фосфора. Параллельно с этим процессом при значительном содержании в воде диоксида углерода, образующегося при разложении органических компонентов илов, происходит растворение осадков карбоната кальция и переход их в бикарбонаты. При этом освобождаются фосфаты, сорбированные или окклюзированные на таких частицах. Кроме того, при имеющихся восстановительных условиях могут растворяться и минеральные соединения фосфора типа гидроксипатита, фосфорита и др., наличие которых в донных отложениях озер всегда констатируется при подробном химическом анализе. Все эти процессы ведут к постоянному выносу растворимых форм фосфора в водную фазу.

Измеренные нами для оз. Неро скорости перехода в водную фазу фосфатов (опыт № 2) за 60 суток возросли с 0,09 до $0,53 \text{ мгР/м}^2 \cdot \text{сут}$. Непостоянство скоростей регенерации создает значительные трудности при расчете внутренней нагрузки по фосфору. На основании полученных данных (табл. 2.49) в первом приближении можно принять, что средняя скорость выделения фосфатов при 4°C составляет около $0,5 \text{ мгР/м}^2 \cdot \text{сутки}$. Тогда суммарный вынос фосфатов со всей площади донных отложений за 90 дней анаэробного периода будет близок к величине 2,5 т.

Соотношение неорганических форм азота и фосфора, выделяющихся зимой в анаэробных условиях из донных отложений в водную фазу $\text{N}:\text{P} = 6$ ($15 \text{ т N} / 2,5 \text{ т P}$), указывает на хорошую сбалансированность основных питательных веществ в поступающем «бульоне», что может быть залогом будущего нормального развития и функционирования сообщества фитопланктона и высшей водной растительности, среднее весовое отношение $\text{N}:\text{P}$ в клетках которых по данным многочисленных измерений должно быть близким к 7.

В аэробных условиях, имитирующих весенне-летне-осеннюю ситуацию в озере, направленность, масштабы и скорости процессов существ-

венно ниже, чем в анаэробных. Независимо от времени и места отбора проб биогенные элементы и органические вещества с максимальной скоростью выделяются в начале экспозиции (табл. 2.49), а затем интенсивности процессов резко снижаются. Такой ход динамики процессов может быть обусловлен быстрым истощением запасов кислорода в экспериментальных трубках и переходом условий среды в микроаэрофильную, а затем и в анаэробную, что неизбежно сопровождается перестройкой всего бактериального ценоза и ведет к снижению скоростей или полному подавлению аэробных процессов. В мелководном оз. Неро ветровое волнение обеспечивает непрерывное обновление и насыщение придонной воды кислородом, в результате чего химический состав среды над илом, в том числе и ее аэробности, сохраняются практически неизменными в течение длительного времени. Возможные кратковременные периоды наступления температурной и химической стратификации при сохранении штилевой погоды в течение нескольких суток, приводящие к снижению содержания кислорода у дна, не могут существенным образом сказаться на масштабах аэробной отдачи химических веществ илами в период открытой воды. В таком случае для оценки потоков органического вещества и биогенных элементов в рассматриваемый период можно обоснованно принять результаты экспериментов за первые сутки, когда гарантированно сохраняются аэробные условия (кислород полностью исчезает только на пятые сутки экспозиции). В экспериментах, проведенных с практически ненарушенной природной структурой илов (опыты 3, 7, 8, 9, 11—15), скорости выдсления $ОВ$ и аммонийного азота в первые сутки варьируют в небольших пределах и составляют $117—156 \text{ мгС/м}^2 \times \text{сутки}$ и $105—144 \text{ мгN/м}^2 \times \text{сутки}$ соответственно. Приняв, что в оз. Неро в течение 90 дней в среднем температура воды близка к $18—19^\circ\text{C}$ (см. Термический режим) и, учитывая приведенные выше цифры по интенсивности отдачи дном илов аммония при этой температуре, можно установить, что за лето из илов в водную массу озера при соответствующих условиях переходит около 700 т органического углерода и примерно столько же аммонийного азота. Средняя температура воды в оставшиеся 90 весенне-осенних дней (при открытой воде) близка к $8—9^\circ\text{C}$. Подобные предыдущему расчеты с учетом температурного коэффициента по Вант-Гоффу, равного 2,5, приводят к величине возможной внутренней нагрузки и по органическому углероду и по аммонийному азоту за этот период приблизительно в 250 т. В целом за безледный вегетационный период внутреннюю нагрузку по этим двум элементам можно оценить величиной около 950 т (оценка сверху), а по фосфору — в 30 тонн. В итоге за безледный период, да и в целом за год, из доинных отложений в озерную водную массу поступают биогенные элементы в соотношениях ($N:P=32$), значительно отстоящих от необходимых для сбалансированного питания фотосинтезирующих организмов, и они должны были бы

испытывать острую нехватку фосфора, если единственным источником биогенов вдруг оказались бы илы.

Динамика соотношения неорганических форм азота (суммы аммонийного, нитритного и нитратного) и фосфора в основном притоке озера показывает, что большую часть года р. Сара несет воды с довольно высоким относительным содержанием фосфора (рис. 2.16). Летом аналогичная ситуация характерна и для Ишны, где с июня по август рассматриваемое отношение сохраняется в пределах 1,3—1,8 и лишь к концу октября повышается до 6. Пока нет оснований считать, что в других притоках оно будет иным. Таким образом, притоки оз. Неро, по крайней мере в 1990 г. способствовали заполнению озерной чаши водами с повышенным содержанием фосфатов, что при отсутствии надежных регуляторов отношения N:P в экосистеме должно было бы приводить к лимитированию первичной продукции по азоту. Именно таким регулятором, обеспечивающим «нормальное» соотношение питательных элементов в среде обитания первичных продуцентов, выступают донные отложения, которые способны компенсировать отмеченную несбалансированность внешней нагрузки, при избытке сорбируя тот или иной элемент, при недостатке — отдавая его в воду.

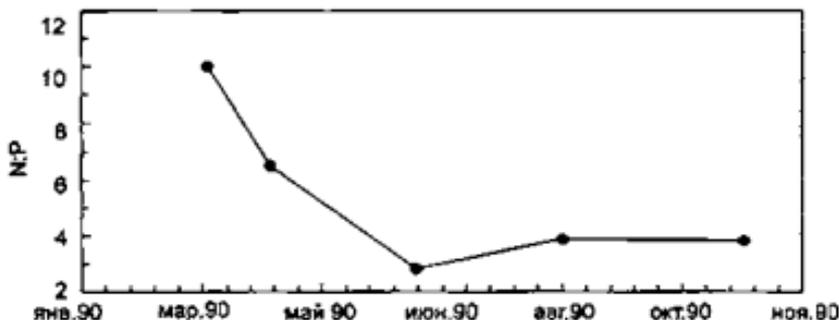


Рис. 2.16. Динамика соотношения неорганических форм N:P в водах р. Сары

Для оценки масштабов возможного влияния донных отложений на качество воды при нарушении их структуры в процессе добычи различными механизмами были проведены специальные опыты. Из определенных горизонтов колонок илов, отобранных стратометром, вырезали слои толщиной 5 см, перемешивали и ровным слоем помещали на дно широких стеклянных сосудов. Сосуды заполняли озерной водой, отобранной на тех же станциях. При этом илы взмучивались и в течение нескольких часов над илом сохранялись взвешенные частички. За начало эксперимента принималось время после существенного осветления водной

суспензии (4 часа после постановки эксперимента). Анализы проводили в фильтрованных пробах. В динамике десорбции проявляются характерные для экспоненциальной или гиперболической кривой участки. Максимальные скорости выделения аммонийного азота, как и в предыдущих опытах, приурочены к первым суткам (табл. 2.49). В последующем запасы азота в илах сокращаются, процессы аммонификации не компенсируют его убыли в иловой воде и суммарные скорости заметно падают. В начальные периоды подобным же образом ведут себя и фосфаты, но по мере увеличения времени экспозиции начинается обратный процесс сорбции фосфатов из водной фазы, причем он приобретает необратимый в данных условиях характер. Естественно, что при этом суммарные скорости выделения принимают отрицательные значения.

В более глубоко лежащих слоях озерного сапропеля (на глубине 80 и 120 см) запасы неорганических форм биогенных элементов превышают их содержание в поверхностном горизонте в 2—3 раза. Это результат глубоко происшедших в течение многих десятков и сотен лет и идущих по настоящее время процессов трансформации захороненных остатков высшей водной растительности, фито- и зоопланктона, рыб и привнесенных с водным стоком органических веществ иного происхождения. Диффузия биогенных и других компонентов в вышележащие горизонты в естественных условиях крайне медленна и они надолго сохраняются в местах своего образования. При выработке илов до соответствующих глубин все эти компоненты неизбежно и с высокими скоростями будут поступать в озеро и сказываться негативным образом на качестве его воды. Увеличение глубины выемки сапропеля как на литоральных станциях (ст. 10, 15) с различной структурой и составом илов, так и на «пелагиальных» (ст. 3, 4) приводит к возрастанию доли поступления захороненных биогенных элементов в 2—7 раз (табл. 2.49). Особенно опасно попадание в воду аммонийных соединений. Летом, в условиях значительного повышения pH среды в результате интенсивно протекающих процессов фотосинтеза, ионы аммония переходят в газообразную форму. У рыб, обитающих в условиях повышенных концентраций аммиачной формы азота, повреждаются жабры, нарушается дыхание, что часто ведет к их массовой гибели. Особенно чувствительны в этом отношении окуны. Все эти обстоятельства должны быть учтены при разворачивании широкомасштабных работ по добыче сапропеля.

8.2. Внешняя биогенная нагрузка

Эта составляющая общей биогенной нагрузки складывается из поступления в озеро соединений азота и фосфора с речным стоком, атмосферными осадками, промышленными и бытовыми сточными водами

г. Ростова, а также из рассеянных источников с окружающей территории. Для оценки вклада каждого из перечисленных источников необходимы, в первую очередь, данные по расходам воды. Наиболее значимую водную нагрузку озеро испытывает от своих притоков, причем главенствующая роль принадлежит р. Сары. В 1990 г. сток р. Сары составил 195 млн. м³ или 65,2% приходной части баланса, боковая приточность, включая Ишню, — 60 млн. м³ (20%), осадки на зеркало — 30 млн. м³ (10%) и подземный приток, т. е. та часть подземных вод, которая поступала в озеро непосредственно через его дно — 14 млн. м³ (4,8%). Результаты измерений расходов воды р. Сары у пос. Поречье-Рыбное в течение 1989—1990 гг. показывают, что водности этих двух лет различаются между собой не только величиной стока за год, но и характером его внутrigодового перераспределения (табл. 2.50). Первый из них был маловодным, имел отчетливый пик весеннего половодья и слабо выраженный пик осенних паводков. В 1990 г. сток был намного выше (выше среднесноголетнего), а гидрограф имел два почти равнозначных пика — весенний, обусловленный талыми водами, и осенний, вызванный обильными и продолжительными дождями. В то же время летний межень сток в этот многоводный год был ниже, чем в предыдущий маловодный. В 1989 г. на долю весеннего половодья пришлось около 58% общего стока реки, а в следующем — только 45%, т. е. примерно столько же, сколько и на долю осенних паводков. На зимний период в среднем приходилось около 15—16% годового стока.

Таблица 2.50

Сток реки Сары, млн. м³

Год \ Месяц	I — VI						Сумма за год
	I	II	III	IV	V	VI	
1989	4.9	4.4	19.1	37.4	19.7	5.7	—
1990	5.5	18.4	42.2	30.0	7.9	3.9	—
Год \ Месяц	VII — XII						Сумма за год
	VII	VIII	IX	X	XI	XII	
1989	4.3	4.1	5.4	9.9	9.9	5.5	130
1990	2.6	4.0	14.5	36.9	19.0	9.8	195

Приведенные материалы по распределению водного стока р. Сары в совокупности с измеренными концентрациями азот- и фосфорсодержащих компонентов дают возможность оценить биогенную нагрузку на озеро, вносимую ее главным притоком. В 1989 г. концентрации биогенных элементов в р. Сары измерялись 6 раз (в середине февраля, 23 марта, 12 мая, 22 июля, 18 сентября, 2 ноября). Для остальных месяцев при рас-

четах использовались интерполированные величины. Полученные оценочные величины соответствующих нагрузок на озеро составляют: по сумме неорганических азотсодержащих соединений — 94,2 т/год и фосфатам — 8,2 т/год (табл. 2.51).

Таблица 2.51

Водная (млн. м³) и биогенная (тонны) нагрузка на озеро, вносимая р. Сары в 1989 г.

Дата	Вода	NH ₄ ⁺	NO ₃ ⁻	N _{дон}	PO ₄ ³⁻	P _{дон}	C _{дон}
январь	4.9	0.1	2.3	4.1	0.1	0.2	14
февраль	4.4	0.1	2.0	3.7	0.1	0.2	12
март	19.1	0.4	25.2	47.6	1.7	2.3	180
апрель	37.4	0.4	49.4	93.1	3.4	4.6	350
май	19.7	<0.1	5.9	17.3	0.8	1.7	150
июнь	5.7	<0.1	0.5	2.7	0.5	0.7	21
июль	4.3	<0.1	0.3	2.0	0.4	0.5	15
август	4.1	<0.1	0.1	3.2	0.2	0.2	15
сентябрь	5.4	<0.1	0.1	4.2	0.2	0.2	20
октябрь	9.9	<0.1	2.7	15.8	0.3	0.9	80
ноябрь	9.9	<0.1	2.7	15.8	0.3	0.9	80
декабрь	5.5	<0.1	2.0	6.6	0.2	0.4	15
Сумма	130	1.0	93.2	216	8.2	12.7	952
Все притоки	170	1.3	121	281	11	17	1240

Близость расположения водосборов всех рек, питающих оз. Неро, позволяет с уверенностью говорить о примерном равенстве соотношений водного стока р. Сары и других рек (включая р. Ишю) в 1989 и в 1990 гг. (соответствующие цифры для 1990 г. приведены выше). Тогда, принимая, что среднее содержание биогенов и их динамика в других водотоках не очень отличаются от характерных для р. Сары, получим величину притока биогенных элементов с этими реками. Суммарное поступление с речным стоком неорганических форм азота в 8 (950 т/122 т), а фосфора почти в 3 (30 т/11 т) раза ниже значений внутренней нагрузки по этим формам элементов. Такие большие различия в масштабах внутренней и внешней нагрузок не могут быть объяснены недостаточностью экспериментального материала, так как выходит за рамки возможных ошибок расчетов, связанных с введением различных гипотез.

Существенно не меняют положения и имеющие место дополнительные нагрузки с атмосферными осадками и неучтенными источниками

загрязнения антропогенного происхождения. В первом случае характерные для осадков низкие концентрации биогенных элементов, а главное, их небольшая доля в общем водном балансе, практически сводят на нет биогенную нагрузку на озеро за счет этой компоненты. Это утверждение станет тем более справедливым, если учесть удаление части биогенов с площади поверхности озера при испарении воды, объем которого для данного региона лишь немногим ниже объема выпадающих осадков. К сожалению, нам неизвестны масштабы антропогенного загрязнения, однако характер распределения азот- и фосфорсодержащих в озере, не обнаруживает каких-либо особенно заметных отклонений от средних величин ни в районах, непосредственно примыкающих к городской черте, хотя наличие такого рода загрязнений не только нельзя исключить, но они прямо обнаруживаются по ряду микробиологических показателей, ни в других частях озерной акватории.

Таким образом, мы должны констатировать, что в оз. Неро внутренняя нагрузка легкодоступными для первичных продуцентов формами азота и фосфора значительно превышает внешнюю. Отсюда непосредственно следует, что усилия, которые могут быть предприняты для устранения или уменьшения поступления биогенов из внешних источников с целью снижения продукции фитопланктона («цветения»), при наличии мощных слоев сапропелевых отложений не дадут должного эффекта в близком будущем. Тем не менее сказанное не означает, что такие усилия не должны предприниматься вовсе; на основании приведенных фактов мы лишь полагаем, что главным направлением в оздоровлении экосистемы оз. Неро (если под оздоровлением понимать устранение угрозы возникновения анаэробных условий и заморов рыбы, улучшение условий рекреации и т.п.) должно быть изъятие донных отложений, но... при полном выполнении такой программы это будет уже другая экосистема! Возможно, похожая на соседнее озеро Плещеево.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Существенную роль в формировании качества вод оз. Неро играют морфологические особенности строения котловины озера и обусловленные им характеристики гидрологического режима. Мелководность озера и связанный с ней относительно небольшой объем водной массы обеспечивают достаточно высокую интенсивность водообмена, свойственную проточным озерам. Большая площадь озера способствует развитию интенсивного волнения, обеспечивающую хорошее перемешивание его водной массы.

Одной из важных особенностей гидрологического режима озера является возможность поступления достаточно больших объемов воды, формирующихся за пределами его водосборного бассейна, а также части воды, уже прошедшей трансформацию в его чаше; они поступают в периоды развития противотечений в р. Векса, несмотря на существование водорегулирующей плотины. Объем этих вод практически не поддается количественному учету, что создает большие трудности при составлении баланса любых химических компонентов.

Весьма характерным для вод оз. Неро является их разная степень насыщенности кислородом в летний и зимний периоды. В мелководных озерах в безледный период вследствие частого ветрового перемешивания обычно сохраняется почти полная гомотермия, которая препятствует образованию зон с пониженным содержанием кислорода. Для оз. Неро это положение справедливо лишь отчасти: даже кратковременная штормовая погода приводит к образованию в придонных слоях микроаэрофильных или анаэробных зон, биохимические процессы в которых имеют иное направление и протекают с другими скоростями. Если летом, за исключением отмеченных выше кратковременных периодов штормовой погоды, содержание кислорода находится на уровне, достаточном для поддержания нормальной жизнедеятельности зоопланктона, бентосных организмов и рыб, то с полным покрытием акватории озера льдом ситуация меняется на противоположную. Кислород интенсивно расходуется на окисление органических веществ, находящихся в воде и донных отложениях, и большая часть водных масс быстро переходит в анаэробное состояние; в них появляется крайне ядовитый для всего живого сероводород и наступают заморные явления. Только на небольших участках, прилегающих к устьям рек или продолжающих оставаться под их непосредственным влиянием, сохраняются остатки кислорода, где и сосредотачивается жизнь.

Для оз. Неро характерна высокая изменчивость и неоднородность ионного состава в различных частях акватории, связанная с большими различиями химического состава вод отдельных притоков, которые дренируют почвы разной степени засоленности. Особенно соленые воды

несет р. Ишля, содержание NaCl в которой может превышать 200 мг/л. Большую часть года ее воды непригодны не только для питья, но и для орошения. Источником повышенной солености вод юго-западной части является река Кучубошь.

Особенности морфометрии озера способствуют предотвращению выравнивания концентраций консервативных химических компонентов по всей акватории даже при ветрах большой силы и продолжительности; воды юго-западного плеса в вегетационный период всегда остаются более минерализованными, чем на открытых участках. Это еще одна особенность, присущая оз. Неро, и отличающая его от других относительно небольших мелководных водоемов.

Крайне интересной особенностью оз. Неро является практически полное отсутствие в его водах в течение всего вегетационного сезона неорганических форм основных биогенных элементов — азота и фосфора. Нет и растворимых форм кремния. Таким образом создается необычная для подавляющего большинства озер мира ситуация — первичная продукция фитопланктона в оз. Неро оказывается лимитированной сразу по трем элементам — азоту, фосфору и кремнию. С этой точки зрения оз. Неро должно рассматриваться как уникальный водоем, детальное изучение которого может внести принципиально новый вклад в лимнологию.

В исследовании основного пула неорганических форм биогенных элементов основная роль принадлежит фитопланктонным организмам, продукция которых почти в 4 раза превышает продукцию макрофитов. Но немалую роль в создании таких условий должна играть и высшая водная растительность, особенно погруженные и полупогруженные формы, которые из-за преобладания в озере мелководных участков и почти полного отсутствия пелагиали развиваются не только вдоль береговой линии, но и в открытых пространствах на большом удалении от берегов, занимая большие площади.

Для оз. Неро характерна сильно развитая литоральная зона, которая занимает более 80% акватории. Да и остальную часть (с глубинами 2—4 м) лишь условно можно принять за пелагиальную. Мелководность (средняя глубина 1,5 м) способствует зарастанию озера высшей водной растительностью: макрофиты занимают более 20% акватории. Их обычно рассматривают в качестве природного барьера, препятствующего распространению эвтрофирующих и загрязняющих веществ в основную водную массу водоемов и водотоков. В оз. Неро большая часть огромной биомассы (20 тыс. т), создаваемой макрофитами, не выносится за его пределы, здесь же подвергается биохимической трансформации, продукты которой служат не только ценным источником органического вещества, обеспечивающего жизнедеятельность гетеротрофных водных организмов, но и причиной значительного вторичного загрязнения. Продукционная деятельность высших водных растений создает условия для образо-

вания карбонатов кальция и магния, которые в силу своей малой растворимости выпадают в осадок и многие растения ниже поверхности воды оказываются покрытыми твердыми оболочками, состоящими в основном из кальцита. Таким образом из оборота выводится часть элементов, ответственных за жесткость воды. При отмирании растений они захороняются на дне и способствуют увеличению зольности сапропеля и тем самым ухудшению его потребительских качеств. Сапропель оз. Неро представляет интерес не только как ценное удобрение, но и как лечебный агент. К его промышленной добыче приступали неоднократно и из-за отсутствия сиюминутной коммерческой выгоды также неоднократно прекращали.

Дошлые отложения играют огромную роль в формировании качества воды оз. Неро. Внутренняя биогенная нагрузка (поступление из илов) на озеро в несколько раз превышает внешнюю (со стоком рек) и это является еще одной характернейшей чертой функционирования данной озерной экосистемы.

Значительная доля поступивших из донных отложений биогенов выносится из озера весной (при наибольших интенсивностях водообмена) и не принимает участия в создании первичной продукции. Таким своеобразным, нехарактерным для крупных озер, способом оз. Неро очищается от большого количества легкодоступных продуцентам неорганических форм азота и фосфора и, возможно, по этой причине не происходит прогрессивно возрастающего накопления биогенов в водной массе с последующим вовлечением их в фотосинтез с весьма далеко идущими негативными последствиями.

Из сказанного должно быть ясно, что в условиях оз. Неро с чрезвычайной осторожностью следует относиться к любому вмешательству в жизнь создававшегося в течение тысячелетий природного комплекса.

Большая часть приведенных оценок состояния экосистемы получена на основании материалов, добытых во время относительно краткосрочных экспедиционных обследований озера, когда многие важные механизмы трансформации химических соединений могли остаться незамеченными. Для существенного пополнения наших знаний о механизмах и масштабах протекающих в озере процессов необходимы длительные непрерывные наблюдения за состоянием экосистемы по более широкому спектру параметров, чем использованы до сих пор. В частности, в планы мониторинга в дополнение к обязательным стационарным наблюдениям за гидрофизическими и гидрохимическими параметрами необходимо включить наблюдения за состоянием и активностью микрофлоры, зоо- и фитопланктона, бентоса, рыб. Отсутствие в надлежащем объеме знаний в этих областях затруднит проведение экосистемного математического моделирования и не позволит с достаточной для практических целей точностью прогнозировать будущее состояние озера при различных схемах водопользования и выемки сапропеля.

ЛИТЕРАТУРА

- Алексин О. А., Семенов А. Д., Скотинцев Б. А.* Руководство по химическому анализу вод суши. Л.: Гидрометеиздат. 1973. 270 с.
- Алексеевский Н. И., Михинов А. Е.* Формирование и динамика наносов в речной сети и береговой зоне водоемов // Итоги науки и техники. Сер. Гидрология суши. М.: ВИИТИ, 1991. Т. 8. 183 с.
- Афанасьев С. Ф., Рянжин С. В.* Численное моделирование горизонтальной турбулентной диффузии в мелком озере // Водные ресурсы. 1986. № 1. С. 87—94.
- Баканов А. И.* О бентосе оз. Церо // Инф. Бюлл. ИБВВ РАН. 1989. № 83. С. 22—25.
- Белинская А. П.* Высшая водная растительность. // Методика изучения биоценозов внутренних водоемов. М.: Наука. 1975. С. 117—122.
- Бикбулатов Э. С.* О методе определения общего фосфора в природных водах // Гидрохим. матер. 1974, т. 60. С. 167—173.
- Бикбулатов Э. С.* Простой способ окисления органического вещества природных вод для определения углерода // Гидрохим. матер. 1974. Т. 60. С. 174—178.
- Бикбулатов Э. С.* Влияние pH на оптические свойства органических соединений природных вод // Инф. Бюлл. ИБВВ АН СССР. 1976. № 31. С. 60—62.
- Бикбулатов Э. С.* Химический состав органического вещества фитопланктона. // Микробиологические и химические процессы деструкции органического вещества в водоемах. Л.: Наука. 1979. С. 151—158.
- Бикбулатов Э. С.* Функциональные связи между элементарным составом и показателями свойств органического вещества природных вод // Водные ресурсы. 1981. № 1. С. 164—182.
- Бикбулатов Э. С.* Применимость оптических методов определения органического вещества в природных водах // Гидрохимические исследования волжских водохранилищ. Рыбинск. 1982. С. 113—120.
- Бикбулатов Э. С., Верещагин В. М.* Простой реактив для определения нитритов в природных водах. // Океанология. 1979. № 2. С. 341—343.
- Бикбулатов Э. С., Бикбулатов Е. М., Григорьева Е. Р.* Определение содержания общего фосфора во взвешенном веществе природных вод. // Информ. бюл. ИБВВ АН СССР. 1978. № 38. С. 83—86.
- Бикбулатов Э. С., Скотинцев Б. А.* Метод определения органического углерода в природных водах. // Проблемы аналитической химии. Т. 5. Методы анализа природных и сточных вод. М.: Наука. 1977. С. 171—176.
- Бикбулатов Э. С., Скотинцев Б. А., Бикбулатова Е. М.* Валовый органический углерод в водах некоторых водоемов Московской и Ярославской областей. // Информ. бюл. ИБВВ АН СССР. 1972. № 14. С. 55—58.
- Бикбулатов Э. С., Лебедев Ю. М., Литвинов А. С., Бикбулатова Е. М., Рошупко В. Ф., Еринов Ю. В., Цельмович О. Л.* Гидрохимический режим

верхневолжских водохранилищ в межлетний период 1997 г. // Водные ресурсы. 2001. № 4. С. 606—614.

Бикбулатова Е. М. Сезонная динамика органического вещества в воде оз. Неро. // Информ. бюл. ИБВВ АН СССР. 1989. № 84. С. 46—50.

Богданов Ю. А., Григорьев Ю. А., Шатошникова М. Г. Определение белка в водной взвеси. // Океанология. 1968. Т. 8. № 6. С. 123—140.

Богословский Б. Б. Озероведение. М.: Изд-во МГУ, 1960. 335 с.

Богословский Б. Б. Морфология и морфометрия озер и водохранилищ. Л.: Изд-во ЛПИ, 1977. 31 с.

Бушлов В. В. Первичная продукция и трофическая классификация водоемов. // Методические вопросы изучения первичной продукции планктона в внутренних водоемах. С.-Пб. Гидрометеониздат. 1993. С. 147—157.

Винберг Г. Г. Первичная продукция водоемов. Минск. Наука. 1960. 329 с.

Виноградова Е. А. Минералогическая характеристика отложений озера Неро. // Труды лаб. сапропеллевых отложений. 1956. Вып. 6. С. 161—167.

Воронков Н. В., Декбах Н. К., Лещева С. Г. Отчет о гидробиологических исследованиях Ярославской губернии в 1914—1916 годах. // Труды Ярославского естественно-исторического общества. 1921. Т. 3. Вып. 1. С. 8—25.

Гапеева М. В., Разгулин С. М., Скопинцев Б. А. Ампульный метод определения общего азота в природных водах. // Гидрохим. матер. 1982. Т. 87. С. 24—28.

Гидрометеорологический режим озер и водохранилищ СССР. Водохранилища Верхней Волги // Под ред. Викудиной З. А., Знаменского В. А. Л.: Гидрометеониздат, 1975. 290 с.

Грезе Б. С. Исследования оз. Неро в гидробиологическом и рыбохозяйственном отношении. Ч. 1. Гидрология. // Ростовский краевед. 1929. Вып. 1. С. 9—36.

Грезе Б. С. Исследования оз. Неро в гидробиологическом и рыбохозяйственном отношении. Ч. 2. Бентос. // Ростовский краевед. 1930. Вып. 2. С. 3—27.

Григорьев С. Озера Ростовского уезда. // Землеведение. 1903. Кн. 2—3. С. 163—192.

Дамская С. А. Очерк зарослей оз. Неро и их фауны. // Труды Ярославского естественно-исторического общества. 1921. Т. 3. Вып. 1. С. 90—103.

Дитмир А. Б. Ярославский край в географических словарях XVIII века // Краеведческие записки. Ярославль, 1956. Вып. 1. С. 167—181.

Довбин И. В. Фитомасса гидрофильной растительности волжских водохранилищ. // Труды ИБВВ АН СССР. 1979. Вып. 42 (45). С. 140—154.

Довбин И. В. Высшая водная растительность оз. Неро. // Современное состояние экосистем оз. Неро. 1991. Вып. 65 (68). С. 62—73.

Довбин И. В. Продукция гидрофильной растительности озера Неро. // Инф. бюл. ИБВВ РАН. 1995. № 98. С. 13—16.

- Ежегодные данные о качестве поверхностных вод суши. 1985—1986 гг. Горький. 1986.
- Еринов Ю. В.* Содержание углеводородов в воде и грунтах оз. Плесецкое. // Функционирование озерных экосистем. Рыбинск. 1983. С. 27—38.
- Заварзина Н. Б.* Распределение микроорганизмов в иловых отложениях озера Неро. // Труды лаб. сапропелевых отложений. 1956. Вып. 6. С. 168—172.
- Караушев А. В.* Стогно-нагонные явления на водохранилищах и озерах. Л.: Гидрометеониздат. 1960. 216 с.
- Китаев С. П.* Экологические основы биопродуктивности озер разных природных зон. М.: Наука, 1984. 207 с.
- Климанов В. А.* Климат Ярославской области в позднеледниковые и голоцене // Тр. Всероссийской научн. Конф. «Когда Россия молодая мужала с гением Петра», Переславль-Залесский, 1992. Вып. 3. С. 10—15.
- Климанов В. А., Хотинский Н. А.* Природные изменения в Ярославской области за последние 1700 лет // Тр. Всероссийской научн. Конф. «Когда Россия молодая мужала с гением Петра», Переславль-Залесский, 1992. Вып. 3. С. 3—10.
- Ковальский В. В., Летунова С. В.* Роль озерного фито- и зоопланктона в миграции кобальта. // Зоологический журн. 1961. Т. 40. Вып. 6. С. 809—817.
- Козловская Л. С.* История озера Неро по данным изучения животных остатков. // Труды лаб. сапропелевых отложений. 1956. Вып. 6. С. 173—180.
- Кордо Н. В.* История микрофлоры и микрофауны оз. Неро. // Труды лаб. сапропелевых отложений. 1956. Вып. 6. С. 181—200.
- Красовская С. А.* Сезонная динамика продуктивности высшей водной растительности водоемов Хоперского заповедника. // Труды Хоперского заповедника. 1966. Вып. 2. С. 5—56.
- Кудерский Л. А.* Малые озера как база нагульного рыбоводства // Антропогенные изменения экосистем малых озер (причины, последствия, возможность управления). СПб.: Гидрометеониздат, 1991. Книга 1. С. 40—45.
- Кузьмин Г. В., Ларионов Ю. В.* Количество и состав взвесей озер разной степени трофии // Информ. бюл. ИВВВ АН СССР. 1980. № 45. С. 24—27.
- Кузелин А. А.* Ростовское озеро (Неро). // Рыбное хозяйство Ивановской промышленной области и его перспективы. 1933. ОГИЗ. Москва-Иваново. Вып. 1. С. 10—14.
- Лавровский Н. А.* Расчет элементов воли в озерах и водохранилищах // Тр. Гос. гидрол. ин-та. 1976. Вып. 231. С. 126—143.
- Лантева Н. А., Минакова С. В.* Микробиологическая характеристика озер Ярославской области // Микробиология. 1976. Т. 15. Вып. 4. С. 717—723.
- Ларионов Ю. В.* Сезонная динамика содержания растворенного и взвешенного органического вещества в озерах разной степени трофии. Информ. бюл., ИВВВ АН СССР. 1978. № 39. С. 72—78.
- Ларионов Ю. В., Скопичев Б. А.* Выделение взвешенного вещества природных вод на порознке двуокиси кремния // Гидрохим. измер. 1974. Т. 60. С. 192—196.

Ласточкин Д. А. Основные элементы гидрологического режима ряда озер Волжско-Клязьменского водораздела // Тр. Ивановского политех. ин-та. 1928. Т. 12. С. 3—13.

Лицанова Н. А. Озера Ярославской области. Указатель литературы // Озера Ярославской области и перспективы их хозяйственного использования. Ярославль, 1970. С. 184—207.

Литвинов А. С., Рощупко В. Ф. Многолетние изменения элементов гидрометеорологического режима Рыбинского водохранилища // Актуальные проблемы экологии Ярославской области: Материалы Второй науч.-практич. Конференции. Том 2. Ярославль: Издание ВВО РЭА, 2002. С. 33—38.

Литвинов О. А. Фитопланктон оз. Неро // Современное состояние экосистемы оз. Неро. 1991. Вып. 65(68). С. 10—32.

Мельников В. Л., Хохлов Б. Н. Клады озера Неро. Использование сапропеля на удобрения. Ярославль. Верхне-Волжское из-во, 1988. 175 с.

Метелева Н. Ю. Эпифитон озера Неро. // Биология внутренних вод. 2001. № 4. С. 32—45.

Многолетние данные о режиме и ресурсах поверхностных вод суши. Т. 1. Ч. 2. Вып. 23. Бассейн Волги (верхнее течение). Л.: Гидрометеониздат, 1986. 174 с.

Московский Б. Д. Ландшафты литорали некоторых озер Ярославского Поволжья // Доклады на науч. Конф. Ярославского гос. пед. ин-та. 1984. Т. 2. Вып. 4.

Новский В. А. Геологическая история озер Ярославского Поволжья // Озера Ярославской области и перспективы их хозяйственного использования. Ярославль, 1970. С. 208—234.

Орлов Д. С., Гришина Л. А. Практикум по химии гумуса. М.: Изд-во МГУ. 1981. 168 с.

Отчет о деятельности Ростовского Научного Общества по изучению местного края за 1928 год // Ростовский краевед. 1929. Вып. 1. С. 59—64.

Панченко В. Г. Растительный покров водоемов и водотоков Среднего Поволжья. 2001. Ярославль. 214 с.

Поддубная Т. Л. Фауна дна и зарослей оз. Неро // Биология и экология водных организмов. Труды ИБВВ АН СССР. 1986. Вып. 53(56). С. 137—153.

Поддубный С. А., Бычкова М. Б. О методе выделения областей влияния ветрового волнения и течения в прибрежной зоне водохранилищ // Водные ресурсы. 1998. Т. 25. № 6. С. 730—737.

Поддубный С. А., Литвинов А. С., Кудряков С. В., Бычкова М. Б. Влияние образования подводных карьеров на циркуляцию вод и экосистему водоема // Энергетическое строительство. 1994. № 12. С. 77—81.

Попов Е. Г. Гидрологические прогнозы. Л.: Гидрометеониздат, 1979. 256 с.

Потапов А. А. Роль химизма донных илов в распространении и смеси типов водной растительности в озерах лесной полосы // Труды Сапропел. Лаборатории. 1951. Вып. 5. С. 166—184.

Распопов И. М., Доценко О. Н. Методика измерения суммарной величины движения водной массы // Гидробиологический журнал. 1987. Т. 23. № 2. С. 77—79.

Ривьер И. К. Физико-географическая и краткая лимническая характеристика. // Современное состояние экосистемы оз. Неро. 1991. Вып. 65 (68). С. 3—9.

Роль волнения в формировании биоценозов бентоса больших озер / Распопов И. П., Воронцов Ф. Ф., Слепухина Т. Д. и др. Л.: Наука, 1990. 114 с.

Рохмистров В. Л. Водный баланс озер Неро и Плещеево // Озера Ярославской области и перспективы их хозяйственного использования. Ярославль, 1970. С. 235—253.

Ряжкин С. В., Терзевик А. Ю., Афанасьев С. В., Шер М. Э. Моделирование гидродинамического режима оз. Сестрорецкий разлив (в современном состоянии и прелюдии) // Изв. Всес. геогр. о-ва. 1984. Т. 116. № 2. С. 144—156.

Семенов А. Д. (ред.). Руководство по химическому анализу поверхностных вод суши. Л.: Гидрометеондат, 1977. 540 с.

Сигарева Л. Е. Первичная продукция фитопланктона оз. Неро // Современное состояние экосистемы оз. Неро. 1991. Вып. 65 (68). С. 53—61.

Сигарева Л. Е., Ляшенко О. А. Пигментные характеристики фитопланктона оз. Неро // Современное состояние экосистемы оз. Неро. 1991. Вып. 65 (68). С. 32—53.

Смирнов А. В. Озерные сапропели, их добыча и использование в сельском хозяйстве. М.: Колос. 1965. 157 с.

Смирнов А. В. Сапропели — ценное удобрение. Ярославль. 1957. 27 с.

Современное состояние экосистемы оз. Неро / Ред. И. К. Ривьер. Рыбинск, 1991. 176 с.

Строительные нормы и правила (СНиП) 2.06.04-82. Нагрузка и воздействия на гидротехнические сооружения (волновые, ледовые и от судов). М.: Стройиздат, 1983. 38 с.

Сукичев В. Н., Барышников И. А., Бородин Т. П. Сапропель и его значение в сельском хозяйстве. Изд-во АН СССР, 1943. 54 с.

Теоретические вопросы классификации озер / Ред. И. П. Смирнова. СПб.: Наука, 1993. 192 с.

Тимченко В. М. Эколого-гидрологические исследования водоемов Северо-Западного Причерноморья. Киев: Наук. думка, 1990. 240 с.

Трифонов Н. А. Об определении аммонийного азота в природных водах. Информ. бюл. ИБВВ АН СССР. 1977. № 43. С. 70—75.

Трусов Б. А. Развитие надземных и подземных побегов рогоза широколистного *Typha latifolia* L. // Вторая Всесоюзная конференция по высшим водным и прибрежно-водным растениям (Тезисы докладов). 1988. Борок. С. 54—55.

Указания по расчету испарения с поверхности водоемов. Л.: Гидрометеондат, 1969. 83 с.

Фельзенбаум А. И. Теоретические основы и методы расчета установившихся морских течений. М.: Наука, 1960. 127 с.

Фоминев И. Ф., Литвинов А. С. О циркуляции вод Белого озера при различном ветре // Биология внутренних вод: Информ. бюл. 1979. № 41. С. 62—65.

Фортунатов М. А., Московский Б. Д. Озера Ярославской области. Кадастровое описание и краткие лимнологические характеристики // Озера Ярославской области и перспективы их хозяйственного использования. Ярославль, 1970. С. 3—183.

Холмский В. Р. Динамика и термика малых озер. Вильнюс: Минтис, 1969. 204 с.

Чижиков Н. В. Геоморфология и почвы бассейна оз. Неро и реки Устье-Кугоросль // Труды лаб. сапропеловых отложений. М.: 1956. Вып. 6. С. 130—144.

Чижиков Н. В. Озера Ярославской области и их значение для с/х // Краеведческие записки Ярославского краевед. музея. 1956. Вып. 1. С. 15—37.

George D. G. The thermal characteristics of lake as a measure of climate change // Suomen Akat. Julk. 1989/ № 91. P. 402—412.

Livingstone D. A. On the orientation of lake basins // Ann. J. Sci. 1954. № 252. P. 1—142.

Matsumoto G. Comparative study of organic constituents in polluted and unpolluted inland aquatic environments.—IV. Indicators of hydrocarbon pollution for waters // J. Water Res. 1982. V. 16. № 11. P. 1521—1527.

Milchunas D. G., Lauenroth W. K. Belowground Primary Production by Carbon Isotope Decay and Long-term Root Biomass Dynamics. // Ecosystems. 2001. № 4. P. 139—150.

Plasencia Fraga T. M. Biomassa de las partes subterranas en *Typha domingensis* (Pers) Kunt. // Acad. Cienc. Cuba Sef. Cient. Tein. 1981. № 180. 12 p.

Ramming H. G. The dynamics of shallow lakes subject to wind an application to lake Neusiedl, Austria // Hydrodyn. Lakes. Amsterdam e. a. 1979. P. 65—75.

Verhagen J. H. G. Modeling phytoplankton patchiness under the influence of wind-driven currents in lakes // Limnol. And Oceanogr. 1994. V. 39. № 7. P. 1550—1565.

Yokoi S., Tomidokoro G. Wind-driven currents in Lake Suwa // Trans. Jap. Soc. Civ. Eng. 1979. № 10. P. 172—173.

ПРИЛОЖЕНИЯ

Приложение 1

Таблица 1

Распределение и сезонная динамика pH в CO₂

№ ст.	1988 г.								1989 г.					
	10.05		08.06		30.07		15.10		20.03		15.05		20.07	
	pH	CO ₂	pH	pH	CO ₂									
1	7.68	24.6	7.90	7.84	88.0	7.96	44	7.58	44.0	7.68	55.4	7.96	68.8	
2	7.83	31.7	8.51	8.84	-	8.10	-	7.60	34.3	8.02	-	8.60	0	
3	8.34	-	-	9.20	-	8.60	0	7.47	75.6	8.42	-	9.20	0	
4	8.65	-	-	9.26	-	8.56	0	7.11	-	8.46	0	9.21	0	
5	8.42	-	-	9.25	-	8.58	0	7.19	108	8.46	0	9.40	0	
6	8.11	10.6	-	8.13	35.2	-	0	7.29	127	8.35	3	8.92	0	
7	8.62	-	-	9.36	-	8.60	0	7.16	127	8.57	0	9.41	0	
8	8.02	10.6	-	8.95	-	8.54	5.3	7.10	-	8.32	-	9.30	0	
9	8.00	14.1	-	9.17	-	8.26	5.3	7.05	101	8.37	0	9.21	0	
10	8.50	-	-	9.05	-	8.27	21	7.18	-	8.45	0	8.85	0	
11	8.21	-	-	8.17	-	8.15	31	7.35	104	8.08	10.6	7.94	-	
12	7.73	22.9	-	7.68	-	8.10	0	7.28	102	7.78	30.8	8.42	0	
14	8.13	10.6	-	7.63	-	8.61	0	7.20	-	8.48	0	9.23	0	
15	8.70	-	-	9.14	-	8.55	91	7.12	90.6	8.47	0	9.15	0	
16	7.43	56.3	-	7.46	197	7.54	-	7.02	106	7.42	88.0	7.30	172	
№ ст.	1989 г.		1990 г.				1991 г.							
	17.09	1.11	20.04		23.06		12.10		15.05					
1	8.10	-	7.82	7.90	-	8.28	-	7.45	-	7.65	-	-	-	
2	8.76	0	7.95	8.05	-	8.28	-	7.91	-	-	-	-	-	
3	9.10	0	8.00	9.08	0	8.62	0	8.15	-	-	-	-	-	
4	9.23	0	8.32	8.52	0	8.67	0	8.18	-	8.38	-	-	-	
5	9.32	0	8.22	8.52	0	8.47	0	8.17	-	-	-	-	-	
6	9.25	0	8.11	8.55	0	8.55	0	7.90	-	8.35	-	-	-	
7	-	-	7.81	8.65	0	8.75	0	8.21	-	8.37	-	-	-	
8	-	-	8.09	8.60	0	-	-	7.78	-	-	-	-	-	
9	-	-	7.40	8.83	0	7.85	-	7.75	-	-	-	-	-	
10	8.88	0	8.02	8.60	0	8.46	0	7.72	-	-	-	-	-	

Продолжение табл. 1

№ ст.	1989 г.			1990 г.						1991 г.			
	17.09	1.11	8.00	20.04	23.06	12.10	15.05						
11	-	-	8.00	8.58	0	8.03	-	7.53	-	-	-	-	-
12	8.78	0	-	8.74	0	8.50	0	-	-	-	-	-	-
14	8.99	0	8.29	8.85	0	-	-	7.77	-	-	-	-	-
15	8.95	0	8.28	8.85	0	8.15	-	7.86	-	8.17	-	-	-
16	7.45	-	7.49	7.51	0	7.96	-	7.20	-	7.34	-	-	-

Таблица 2

Распределение pH, CO₂ и щелочности по глубине

Дата	№ ст.	Глубина, м	pH	Щелочность, мг-экв/л	CO ₂ , мг/л	
30.03.88	4	0.5	7.13	2.00	-	
		1.5	7.15	6.48	-	
		2.5	7.13	6.40	-	
		3.4	7.12	8.28	-	
20.03.89	3	пов.	7.47	-	76	
		дно	7.35	-	72	
		1.0	7.11	-	-	
		1.5	7.08	-	-	
		2.0	7.06	-	-	
		3.0	7.02	-	-	
15.05.89	4	пов.	8.46	-	0	
		дно	8.46	-	0	

Макрокомпоненты солевого состава (жесткость, щелочность, Σ_{Ca} и Σ_{Mg} мг-экв/л;
Э — электропроводность, мксм/см, остальные в мг/л)

№ ст.	7—10.07.87						6—10.10.87						6—10.06.72.3.0.3.367							
	Ca	Mg	Cl	SO ₄ ²⁻	Ж	Э	Ca	Mg	Cl	SO ₄ ²⁻	Ж	Э	Na	K	Ca	Mg	Cl	SO ₄ ²⁻	Ж	Э
1	57.0	14.6	6.95	14.0	4.07	13.8	18.5	8.1	13.8	4.82	366	8.7	4.3	69.6	21.7	11.8	23.8	5.27	423	
2	37.8	12.1	15.8	23.7	2.90	12.5	21.5	8.8	12.5	4.16	366	8.4	3.9	59.0	21.2	10.2	20.8	4.70	362	
3	31.4	11.4	13.7	22.5	2.52	16.5	15.8	16.1	16.5	3.38	298	8.8	2.1	63.8	23.6	9.7	21.9	5.14	408	
4																				
пов	33.0	10.7	13.4	23.0	2.54	49.2	14.4	14.7	22.0	3.66	306	11.3	2.5	34.2	28.1	12.8	36.5	4.03	400	
4																				
дно																				
5																				
6	33.8	11.5	13.9	22.0	2.65	41.0	16.3	19.6	19.0	3.41	312	16.6	3.7	96.8	28.2	24.8	26.1	7.17	544	
7	34.0	11.3	13.9	22.5	2.64	40.4	16.0	18.1	22.5	3.35		15.7	3.5	78.0	32.1	23.3	26.8	6.55	480	
8																				
9	37.8	10.0	16.2	23.0	2.72															
10																				
11	48.2	13.1	13.3	18.0	3.50	50.0	19.0	18.8		4.08	371	18.6	6.7	80.2	24.7	33.1	44.9	6.05	558	
12	40.8	11.4	7.5	10.5	2.99															
14																				
15																				
16	94.4	23.2	71.7	82.5	6.65															

1988 г.													
№ ст.	8—11 мая												
	Na ⁺	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻	Σ ₁	Σ ₂	Щ	Ж	Э	Σ ₃
1	5.2	2.8	37.4	9.2	7.1	13.5	134	2.7	2.9	2.20	2.64	207	209
2	7.1	2.6	46.8	20.5	9.1	17.1	190	3.7	4.4	3.11	4.05	244	294
3	8.5	3.7	44.0	9.1	13.6	22.2	154	3.4	3.4	2.52	2.96	252	255
4	7.9	3.6	34.8	13.3	11.9	18.0	153	3.2	3.3	2.51	2.85	241	242
5	10.2	3.8	39.6	14.3	17.0	22.1	157	3.5	3.7	2.57	3.17	234	264
6	11.7	4.1	39.0	13.8	20.8	21.9	157	3.6	3.7	2.57	3.10	251	269
7	10.4	3.9	40.6	13.1	17.5	18.8	159	3.5	3.7	2.61	3.12	259	263
8	9.5	3.9	39.4	13.7	16.1	18.7	168	3.6	3.6	2.75	3.11	265	270
9	13.4	4.2	51.2	15.8	23.8	32.5	200	4.6	4.6	3.28	3.88	337	341
10	9.0	3.7	35.6	14.8	14.5	20.4	153	3.3	3.5	2.51	3.01	253	251
11	11.4	4.2	44.2	14.5	21.0	22.0	190	4.2	4.0	3.11	3.42	306	308
12	6.0	3.3	37.2	11.3	8.6	15.7	149	3.0	3.1	2.44	2.80	227	231
14	6.5	3.3	39.6	14.6	9.5	20.2	157	3.3	3.4	2.57	3.03	246	261
15	9.7	3.9	40.6	13.4	16.2	15.6	156	3.3	3.7	2.56	3.15	241	256
16	24.1	6.6	42.4	41.2	61.5	90.7	217	7.1	6.8	3.56	5.55	585	484
№	8—11 июня												
	Na ⁺	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻	Σ ₁	Σ ₂	Щ	Ж	Э	Σ ₃
1	6.6	2.3	67.2	20.3	8.3	14.2	309	5.6	5.4	5.07	5.05	412	428
2	10.4	3.5	32.6	13.8	20.2	23.9	135	3.3	3.3	2.21	2.78	226	230
3	8.8	4.1	29.0	15.6	16.9	23.9	139	3.2	3.2	2.28	2.75	218	227
4	9.9	4.4	29.8	14.9	17.4	23.0	148	3.4	3.3	2.43	2.73	240	237
5	9.6	4.1	30.6	17.4	18.1	26.7	155	3.6	3.5	2.54	2.98	250	251
6	10.6	4.2	32.2	21.4	20.8	26.5	157	3.7	4.0	2.57	3.19	259	263
7	9.0	4.2	28.8	17.9	17.0	26.2	150	3.5	3.4	2.46	2.93	241	243
8	9.6	4.3	29.8	13.8	17.6	26.2	140	3.3	3.2	2.30	2.64	236	232
9	10.2	4.1	27.8	15.5	19.8	25.1	159	3.7	3.2	2.61	2.68	301	252
10	10.2	4.3	30.2	13.2	19.0	23.9	176	3.9	3.2	2.89	2.61	280	267
11	11.2	4.1	44.6	14.8	20.9	17.7	190	4.1	4.1	3.11	3.46	304	294
12	8.1	3.7	38.0	16.3	13.5	22.0	171	3.6	3.7	2.80	3.26	259	263
14	8.8	3.9	35.4	13.9	15.4	25.7	173	3.8	3.4	2.84	2.93	264	266
15	9.0	4.1	31.6	15.4	16.1	21.2	153	3.4	3.4	2.51	2.86	246	241
16	39.2	6.6	—	—	—	—	325	—	—	5.33	—	766	—

№ ст.	13—17 октября												
	Na ⁺	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻	Σ _к	Σ _а	Щ	Ж	Э	Σ _в
1	7.4	2.7	71.2	19.3	11.0	19.2	305	5.7	5.6	5.00	5.17	407	436
2	8.8	3.4	49.8	17.0	14.5	22.8	226	4.6	4.4	3.70	3.91	360	342
3	10.6	3.6	33.4	14.9	18.5	27.2	160	3.7	3.5	2.62	2.91	283	268
4	9.0	3.4	40.0	13.0	19.6	28.8	157	3.7	3.7	2.57	3.08	294	269
5	12.6	3.9	35.6	18.6	23.2	29.7	157	3.9	4.0	2.57	3.33	297	281
7	10.6	3.6	34.2	18.4	18.9	28.3	161	3.8	3.8	2.64	3.24	285	275
8	9.2	3.9	35.4	16.0	20.1	26.8	165	3.8	3.6	2.70	3.10	293	276
9	13.6	3.8	42.2	16.2	27.0	33.7	195	4.6	4.1	3.20	3.46	330	332
10	10.0	3.5	48.0	16.6	17.0	20.4	203	4.2	4.3	3.33	3.78	310	318
11	8.8	3.5	51.8	21.7	15.3	18.3	233	4.6	4.9	3.82	4.40	365	352
12	9.4	3.2	46.4	19.0	14.4	31.8	201	4.4	4.4	3.30	3.90	289	326
14	10.2	3.6	39.2	15.7	18.1	26.1	170	3.8	3.8	2.79	3.27	300	282
15	-	-	36.8	14.0	19.5	27.9	159	-	-	2.61	3.01	-	-
16	40.5	5.1	120	33.6	143	145	-	-	10.7	-	8.8	-	487
1989 г.													
№	3—5 февраля												
	Na ⁺	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻	Σ _к	Σ _а	Щ	Ж	Э	Σ _в
1	6.0	2.5	67.8	21.4	9.5	14.6	-	-	-	-	5.17	-	-
3	11.6	2.4	55.8	23.8	35.8	11.9	-	-	-	-	4.77	460	-
4	19.2	3.7	54.2	18.2	33.8	28.9	-	-	-	-	5.23	-	-
5	15.0	3.6	54.8	22.3	22.0	15.5	-	-	-	-	4.60	454	-
6	15.4	3.6	70.8	24.5	25.7	19.3	-	-	-	-	5.58	-	-
7	16.5	4.2	46.6	25.8	28.1	28.9	-	-	-	-	4.48	452	-
8	18.8	4.5	66.4	26.3	33.2	32.1	-	-	-	-	5.51	480	-
9	20.4	4.2	69.2	30.8	41.2	58.9	-	-	-	-	6.03	537	-
10	15.0	4.1	70.0	26.4	23.9	15.7	-	-	-	-	5.70	503	-
11	15.4	4.1	60.0	30.2	25.4	38.9	-	-	-	-	5.52	441	-
12	8.4	2.7	61.6	22.7	11.4	13.1	-	-	-	-	4.97	447	-
14	12.1	3.6	59.4	25.8	19.1	18.3	-	-	-	-	5.12	467	-
15	14.0	4.3	55.6	23.5	24.5	17.7	-	-	-	-	4.74	-	-
16	42.1	3.8	109	43.7	145	86.1	-	-	-	-	9.11	-	-

№ ст.	12—16 мая												
	Na ⁺	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Cl	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻	Σ ₁	Σ ₂	Щ	Ж	Э	Σ ₃
1	-	-	63.2	21.5	11.6	33.1	281			4.6	4.95	376	
2	-	-	47.0	17.4	15.9	25.7	215			3.52	3.80	322	
3	-	-	39.6	13.9	16.5	28.9	163			2.67	3.14	271	
4	-	-	35.2	14.5	15.8	26.9	157			2.58	2.97	262	
5	-	-	38.2	16.2	19.6	28.1	165			2.70	3.26	273	
6	-	-	39.2	18.0	17.9	24.5	168			2.75	3.46	281	
7	-	-	-	-	-	-	159			2.60	-	268	
8	-	-	39.8	15.2	17.7	26.5	166			2.72	3.26	283	
9	-	-	40.8	20.3	20.6	42.0	171			2.87	3.73	285	
10	-	-	43.0	16.8	16.2	24.1	190			3.12	3.55	301	
11	-	-	51.4	19.0	20.6	23.7	232			3.80	4.15	350	
12	-	-	40.4	15.7	10.5	22.5	159			2.60	3.33	258	
14	-	-	39.6	12.2	11.4	30.9	160			2.62	3.00	249	
15	-	-	40.8	13.7	13.2	34.5	163			2.67	3.18	259	
16	-	-	95.8	28.1	104	79.5	292			4.78	7.13	718	

№ ст.	19.07.89 г.							
	Na ⁺	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Cl	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻	Э
1	47.8	22.6	9.4	30.5	331	5.43	4.27	-
2	27.8	20.2	18.4	32.3	133	2.18	3.07	251
3	21.6	16.2	17.7	33.5	101	1.66	2.43	220
4	23.6	15.4	20.8	32.7	104	1.70	2.46	213
5	21.6	17.4	22.4	40.1	102	1.67	2.53	227
6	23.0	16.9	36.2	55.5	108	1.77	2.56	-
7	21.8	16.1	19.1	32.7	104	1.70	2.43	-
8	19.8	15.1	20.1	28.9	102	1.67	2.25	220
9	28.2	17.5	23.7	43.8	107	1.75	2.87	-
10	29.0	16.6	20.8	31.0	134	2.20	2.83	-
11	44.4	19.7	20.1	31.0	196	3.21	3.86	-
12	29.6	15.5	15.5	31.8	146	2.39	2.77	253
14	21.0	16.1	18.4	29.3	111	1.82	2.39	220
15	22.4	17.0	17.2	31.7	119	1.95	2.54	227
16	101	28.1	132	115	331	5.43	7.41	-

№ ст.	30 октября — 2 ноября							
	Na ⁺	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Cl	SO ₄ ²⁻	HCO ₃	Э
1	52.2	19.3	9.5	24.7	228	3.73	4.22	321
2	44.6	19.1	22.4	39.7	207	3.39	3.82	346
3	36.4	18.6	22.1	39.5	175	2.87	3.37	307
4	37.8	20.3	21.5	42.0	179	2.93	3.58	337
5	36.0	18.6	29.3	47.0	180	2.95	3.35	309
6	38.8	22.4	36.2	59.7	182	2.99	3.81	374
7	36.8	16.6	28.9	43.5	171	2.81	3.22	300
8	33.4	18.5	21.5	42.0	181	2.96	3.21	297
9	90.2	28.4	80.7	86.5	312	5.12	6.89	734
10	50.0	11.3	21.9	42.5	178	2.92	3.44	321
11	63.0	23.4	20.9	46.5	281	4.61	5.10	415
14	34.8	17.4	20.8	41.2	179	2.93	3.19	281
15	37.0	17.5	23.4	41.2	179	2.93	3.31	312
16	97.0	28.2	88.1	109	292	4.79	7.20	749
1990 г.								
№	5—8 марта							
1	30.4	18.5	5.7	21.8	-	-	3.06	-
2	28.0	10.8	5.4	14.2	-	-	2.30	-
4 пов.	22.8	11.6	10.1	25.0	-	-	2.11	-
4 дно	59.6	28.6	32.6	32.8	-	-	5.36	-
5	22.0	12.8	8.5	18.6	-	-	2.17	-
6	33.2	14.9	18.0	30.2	-	-	2.90	-
7	22.4	11.3	6.4	20.2	-	-	2.06	-
15	45.4	20.8	10.5	19.2	-	-	4.00	-

№ ст.	18—22 апреля												
	Na ⁺	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Cl	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻	Σ	Σ	Щ	Ж	Э	Σ
1	6.3	1.9	43.2	20.8	7.5	15.6	214	4.2	4.0	3.50	3.88	-	309
2	6.6	2.2	44.6	14.2	9.7	7.4	172	3.8	3.2	2.85	3.41	256	257
3	-	-	-	-	-	-	172	-	-	2.85	-	277	-
4	8.5	2.7	44.2	13.0	14.4	25.8		3.7	-	-	3.29	-	-
5	9.4	2.8	43.6	13.8	15.6	14.4	168	3.8	3.5	2.75	3.33	-	268
6	9.3	2.7	44.2	16.4	16.1	15.6	168	4.1	3.5	2.75	3.58	-	272
7	8.9	2.7	43.8	12.2	15.4	15.6	168	3.7	3.5	2.75	3.21	-	267
8	9.0	2.8	41.2	14.8	15.1	15.6	168	3.8	3.5	2.75	3.29	-	267
9	10.0	2.7	45.2	12.2	16.9	16.4	172	3.8	3.6	2.85	3.28	300	275
10	8.1	2.6	43.4	12.7	12.3	14.2	172	3.6	3.5	2.85	3.23	270	265
11	10.2	2.8	51.4	12.5	17.3	17.2	201	4.1	4.1	3.30	3.61	324	312
12	6.2	2.3	40.4	11.5	8.4	12.8	156	3.3	3.1	2.55	2.88	231	238
14	-	-	39.2	9.1	8.5	15.6	150	-	3.0	2.45	2.71	236	-
15	8.1	2.5	45.2	10.0	13.2	15.6	172	3.5	3.5	2.75	3.09	254	267
16	36.8	3.7	88.2	22.0	78.5	19.6	250	7.9	6.7	4.1	6.24	-	499
№	24—27 июня												
1	7.5	1.4	64.4	22.8	8.6	23.6	295	5.5	5.6	4.84	5.12	-	423
2	9.5	2.5	47.8	16.6	14.8	27.6	210	4.3	4.4	3.45	3.77	343	329
3	9.6	2.6	37.2	15.0	15.2	26.8	154	3.6	3.5	2.52	3.11	281	260
4	9.7	2.6	40.6	15.4	16.0	28.4	163	3.8	3.7	2.67	3.31	-	276
5	10.1	2.9	40.0	17.2	20.0	26.0	171	3.9	3.9	2.8	3.43	-	287
6	9.6	2.7	40.0	16.0	15.4	31.2	163	3.8	3.7	2.67	3.33	-	278
7	9.9	3.1	36.0	17.4	15.4	23.0	168	3.8	3.7	2.75	3.25	-	273
9	16.7	2.9	48.6	18.4	26.7	34.8	192	4.8	4.6	3.15	3.96	396	340
10	9.8	2.7	48.4	14.3	15.7	25.8	204	4.1	4.3	3.35	3.61	340	321
11	10.6	3.0	48.8	16.6	18.5	21.0	219	4.4	4.5	3.59	3.82	355	338
12	8.2	2.6	48.4	17.4	10.1	25.8	204	4.3	4.2	3.35	3.87	297	317
15	-	-	41.2	17.4	14.4	29.0	172	-	3.8	2.82	3.51	289	215
16	41.0	1.9	86.0	40.5	131	106	328	9.5	11	5.37	7.68	936	734

№ ст.	10—12 октября												
	Na ⁺	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻	Σ	Σ	Щ	Ж	Э	Σ
1	3.8	3.1	29.6	13.7	6.3	6.0	140	2.9	2.6	2.28	2.62	-	203
2	7.9	4.1	37.6	16.4	14.7	15.2	175	3.7	3.6	2.90	3.25	-	271
3	9.9	3.6	36.7	12.9	18.4	14.6	175	3.4	3.7	2.87	2.91	-	259
4	9.4	3.5	34.7	15.3	16.6	14.0	174	3.5	3.6	2.85	3.01	-	268
5	10.2	3.6	36.0	11.9	17.7	14.7	171	3.3	3.6	2.81	2.79	-	265
6	10.3	3.6	33.6	13.7	18.4	16.8	165	3.4	3.6	2.70	2.82	-	261
7	9.6	3.5	37.6	12.6	16.4	16.3	174	3.4	3.6	2.85	2.93	-	270
8	10.0	3.5	36.7	15.1	17.3	27.4	171	3.6	3.8	2.80	3.09	-	281
9	10.0	3.7	36.7	14.1	17.0	23.8	175	3.5	3.8	2.87	3.01	-	280
10	7.7	3.9	39.2	12.8	13.5	18.4	167	3.5	3.5	2.74	3.03	-	263
11	9.1	3.1	41.2	17.1	15.2	16.8	199	4.0	4.0	3.26	3.49	-	302
12	-	-	45.1	8.3	13.9	15.8	-	2.9	-	-	-	-	-
14	7.8	3.8	38.0	11.0	14.3	13.2	171	3.3	3.5	2.80	2.82	-	259
15	7.9	3.8	39.2	11.5	14.3	14.0	171	3.4	3.5	2.80	2.92	-	262
16	14.7	4.8	53.5	21.0	29.4	42.8	187	5.2	4.8	3.06	4.43	-	353
1991 г.													
№	19—21 марта												
1	7.9	2.3	60.7	19.7	9	23.2	-	-	-	-	4.66	421	-
4	15	3.6	88.8	23.5	26	45	-	-	-	-	6.38	-	-
6	14	4.5	98	22.1	28.7	45.2	-	-	-	-	6.73	608	-
7	15	3.6	96.2	25.3	26	40.4	-	-	-	-	6.9	-	-
16	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	957	-
№	16—18 мая												
1	8.0	2.5	49.7	12.7	7.3	28.8	207	4.0	4.2	3.40	3.54	-	316
4	9.1	3.9	37.2	9.0	12.6	22.0	146	3.1	3.2	2.40	2.6	-	240
6	8.7	4.6	36.2	10.0	11.2	24.8	150	3.1	3.3	2.45	2.64	-	246
7	10	4.1	37.3	9.0	13.3	22.8	146	3.2	3.2	2.40	2.61	-	243
15	9.2	4.1	37.3	9.0	12.4	21.6	146	3.1	3.2	2.40	2.61	-	240
16	26	4.6	86.4	22.5	53.4	58.8	287	7.4	7.4	4.70	6.18	-	539

Приложение 3
Биогенные элементы

Таблица 1

Распределение минеральных форм азота и фосфора, мг/л

№ ст.	12—14 июня 1987 г.						2—6 февраля 1989 г.					
	NH ₄ ⁺	NO ₂ ⁻	NO ₃ ⁻	N _{общ}	PO ₄ ³⁻	P _{общ}	NH ₄ ⁺	NO ₂ ⁻	NO ₃ ⁻	N _{общ}	PO ₄ ³⁻	P _{общ}
1	0	0.007	0.17	—	0.061	—	0.18	0.004	0.460	0.83	0.030	0.041
2	0.04	0	0.02	—	0.006	—	0.12	0.005	0.520	0.83	0.029	0.038
3	0.03	0	0.02	—	0	—	0.76	0.020	0.220	1.41	0.024	0.051
4	0	0	0	—	0	—	0.72	0.026	0.170	1.47	0.007	0.026
5	—	—	—	—	—	—	1.06	0.004	0.003	2.23	0.009	0.044
6	0.06	0.001	0	—	0	—	1.27	0.005	0.022	2.08	0.023	0.047
7	0.02	0.001	0	—	0	—	1.16	0.005	0.062	1.96	0.017	0.071
8	—	—	—	—	—	—	1.06	0.017	0.350	2.87	0.019	0.100
9	0.05	0	0	—	0.003	—	1.02	0.005	0.061	2.02	0.014	0.041
10	—	—	—	—	—	—	1.72	0.003	0.015	2.42	0.056	0.064
11	0	0	0	—	0.010	—	0.94	0.015	0.460	2.03	0.025	0.046
12	0.06	0	0	—	0.005	—	0.44	0.018	0.130	1.48	0.033	0.087
14	—	—	—	—	—	—	0.90	0.009	0	1.73	0.069	0.086
15	—	—	—	—	—	—	1.28	0.003	0	2.43	0.009	0.021
16	—	—	—	—	—	—	0.50	0.004	0.160	1.11	0.045	0.090
№	19—24 марта 1989 г.						11—16 мая 1989 г.					
	NH ₄ ⁺	NO ₂ ⁻	NO ₃ ⁻	N _{общ}	PO ₄ ³⁻	P _{общ}	NH ₄ ⁺	NO ₂ ⁻	NO ₃ ⁻	N _{общ}	PO ₄ ³⁻	P _{общ}
1	0.27	0.028	1.32	2.49	0.090	0.122	0.070	0.014	0.300	0.88	0.040	0.088
2	0.19	0.008	0.83	1.78	0.055	0.131	0.045	0.004	0.054	0.88	0.047	0.080
3	0.37	0.007	0.58	1.49	0.028	0.053	0.025	0.004	0.026	1.03	0.028	0.064
4	0.67	0.110	0.37	1.82	0.020	0.029	0.025	0	0	1.30	0.010	0.070
5	1.12	0.040	0.22	1.72	0.021	0.059	0.030	0	0	0.99	0.005	0.071
6	1.20	0.027	0.18	2.36	0.062	0.071	0.050	0.008	0.047	1.08	0.005	0.088
7	0.62	0.030	0.17	1.94	0.013	0.048	0.030	0	0	1.05	0.017	0.058
8	0.70	0.030	0.09	1.86	0.018	0.084	0.026	0	0	1.07	0.011	0.074
9	0.48	0.016	1.58	2.99	0.100	0.132	0.025	0	0	0.88	0.010	0.059
10	0.78	0.020	0.08	1.44	0.023	0.055	0.025	0.008	0.089	0.95	0.004	0.039
11	0.22	0.008	2.15	2.64	0.028	0.050	0.025	0.002	0.004	1.27	0.003	0.047
12	0.42	0.020	0.32	1.38	0.026	0.047	0.035	0.001	0.014	0.89	0.012	0.070

Продолжение табл. 1

№ ст.	NH ₃	NO ₂	NO _x	N _{общ}	PO ₄ ³⁻	P _{общ}	19—24 марта 1989 г.					
							NH ₃	NO ₂	NO _x	N _{общ}	PO ₄ ³⁻	P _{общ}
14	0.64	0.048	0.29	2.23	0.026	0.042	0.025	0.007	0.061	0.90	0.007	0.062
15	0.51	0.038	0.18	2.05	0.014	0.044	0.040	0.008	0.057	0.92	0.007	0.042
16	0.35	0.026	1.91	3.20	0.047	0.094	0.045	0.004	0.120	0.87	0.090	0.065
№	18—23 июля 1989 г.						15—18 сентября 1989 г.					
	NH ₃	NO ₂	NO _x	N _{общ}	PO ₄ ³⁻	P _{общ}	NH ₃	NO ₂	NO _x	N _{общ}	PO ₄ ³⁻	P _{общ}
1	0.015	0.003	0.080	0.47	0.090	0.124	0.015	0.002	0.018	0.77	0.041	0.041
2	0.018	0	0	1.89	0.017	0.119	0.030	0	0	1.20	0.012	0.112
3	0.021	0	0.002	2.74	0.063	0.117	0.030	0	0	1.98	0.005	0.102
4	0.033	0	0.020	2.21	0.088	0.139	0.050	0	0	1.98	0.007	0.108
5	0.053	0	0.014	2.30	0.015	0.108	0.025	0	0	1.72	0.003	0.088
6	0.040	0	0.003	2.12	0.027	0.194	0.030	0	0.002	1.78	0.004	0.119
7	0.021	0	0.030	2.14	0.012	0.123	0.020	0	0	2.13	0.012	0.154
8	0.010	0	0.002	1.92	0.025	0.134	0.025	0	0	2.20	0.012	0.132
9	0.034	0	0	2.31	0.028	0.141	0.020	0	0	1.97	0.01	0.172
10	0.023	0	0	1.83	0.058	0.094	0.015	0	0	1.33	0.005	0.056
11	0.031	0	0	1.48	0.065	0.092	0.012	0.003	0.008	1.20	0.005	0.05
12	0.026	0	0	1.93	0.022	0.098	0.025	0	0	1.37	0.005	0.066
14	0.026	0	0	2.10	0.025	0.100	0.027	0	0	1.60	0.005	0.075
15	0.035	0	0	2.06	0.102	0.123	0.015	0	0	1.57	0.007	0.079
16	0.055	0.009	0.095	0.94	0.025	0.149	0.040	0.005	0.136	0.92	0.142	0.145
№	30 октября — 2 ноября 1989 г.						20—23 марта 1991 г.					
	NH ₃	NO ₂	NO _x	N _{общ}	PO ₄ ³⁻	P _{общ}	NH ₃	NO ₂	NO _x	N _{общ}	PO ₄ ³⁻	P _{общ}
1	0.06	0.007	0.270	1.60	0.03	0.086	1	0.008	0.37	2.06	0.047	—
2	0.035	0	0	1.14	0.003	0.146	—	—	—	—	—	—
3	0.035	0	0	1.97	0.002	0.155	—	—	—	—	—	—
4 в.	0.022	0	0	1.80	0.004	0.120	0.82	—	0.16	1.87	0.027	—
4 д.	—	—	—	—	—	—	0.96	—	0.021	1.78	0.250	—
5	0.050	0	0.014	1.74	0.004	0.157	—	—	—	—	—	—
6	0.065	0	0.037	1.66	0.004	0.073	1.05	0.024	0.075	1.98	0.064	—
7	0.030	0	0.016	1.97	0.004	0.152	0.59	—	0.25	1.47	0.023	—
8	0.035	0	0	2.27	0.004	0.165	—	—	—	—	—	—
9	0.050	0.007	0.620	1.46	0.102	0.106	—	—	—	—	—	—
10	0.025	0	0	1.12	0.003	0.126	—	—	—	—	—	—
11	0.055	0.006	0.200	1.57	0.004	0.118	—	—	—	—	—	—
12	0.020	0	0	1.90	0.004	0.120	—	—	—	—	—	—
14	0.015	0	0	2.16	0.004	0.116	—	—	—	—	—	—

Продолжение табл. 1

№ ст.	NH ₄ ⁺	NO ₂ ⁻	NO ₃ ⁻	N _{общ}	PO ₄ ³⁻	P _{общ}	NH ₄ ⁺	NO ₂ ⁻	NO ₃ ⁻	N _{общ}	PO ₄ ³⁻	P _{общ}
	19—24 марта 1989 г.						11—16 мая 1989 г.					
15	0.015	0	0.004	1.92	0.004	0.113	0.76	—	0.12	2.33	0.055	—
16	0.070	0.009	0.720	1.12	0.110	0.110	1.01	0.015	0.19	2.12	0.082	—
№	15—17 мая 1991 г.						9—10 июля 1991 г.					
	1	0.05	—	0.180	0.53	0.029	—	0.037	0.006	0.170	0.81	0.052	0.082
4	0.05	0.038	0.007	0.82	0	—						
6	0.16	—	0.041	0.71	0.008	—	0.022	0	0.007	1.90	0.006	0.187
7	0.07	0.036	0.011	0.77	0	—	—	—	—	—	—	—
15	0.10	0.030	0.012	0.90	0.025	—	—	—	—	—	—	—
16	0.09	—	0.270	0.80	0.038	—	0.040	0.006	0.057	1.33	0.125	0.177
№	21—22 августа 1991 г.						3—4 октября 1991 г.					
	1	0.13	0.014	0.226	0.80	0.057	0.064	0.034	0.007	0.47	0.80	0.051	0.080
6	0.07	0	0	0.95	0.006	0.162	—	—	—	—	—	—
16	0.24	0.016	0.309	1.21	0.142	0.257	0.087	0.005	0.35	1.01	0.107	0.152

Таблица 2

Распределение общего азота и фосфора в 1987 г., мг/л

№ ст.	N _{общ}	P _{общ}	N_{общ}	P_{общ}	N_{общ}	P_{общ}	N_{общ}	P_{общ}	N_{общ}	P_{общ}	N_{общ}	P_{общ}
	1987 г.											
	11.04		25.05		20.06		12.07		20.09		12.10	
1	1.65	0.095	0.60	0.037	0.64	0.090	0.74	0.155	0.50	0.080	0.60	0.270
2	2.40	0.310	—	—	—	—	1.45	0.155	1.55	0.200	0.52	0.065
3	—	—	—	—	—	—	1.35	0.105	2.00	0.170	1.65	0.150
4	1.75	0.055	0.66	0.043	1.15	0.075	1.30	0.120	1.85	0.156	1.96	0.160
5	—	—	0.66	0.042	0.85	0.073	—	—	—	—	2.30	0.190
6	1.75	0.210	0.76	0.097	1.35	0.108	1.45	0.150	1.95	0.150	1.96	0.165
7	1.55	0.075	0.66	0.042	1.15	0.100	1.40	0.130	1.35	0.175	1.65	0.135
8	—	—	0.92	0.101	1.00	0.070	—	—	—	—	1.45	0.140
9	—	—	0.80	0.117	1.25	0.156	1.65	0.196	2.00	0.190	1.85	0.230
10	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	1.60	0.090
11	—	—	—	—	—	—	0.80	0.092	1.30	0.100	0.90	0.110
12	—	—	—	—	—	—	1.04	0.105	0.94	0.085	1.20	0.070
14	—	—	0.80	0.052	0.64	0.076	—	—	1.40	0.085	—	—
15	—	—	—	—	—	—	—	—	1.50	0.115	—	—
16	—	—	—	—	—	—	1.10	—	0.77	0.140	—	—

Таблица 3

Распределение общего азота в 1990 г., мг/л

№ ст.	7 марта	20 апреля	25 июня	18 августа	12 октября
1	1.96	1.35	0.45	0.84	0.83
2	2.34	1.11	1.28	1.03	1.33
3	-	1.35	1.70	2.17	1.55
4 лов.	2.14	1.16	1.58	1.78	1.39
4 дно	2.90	-	-	2.07	-
5	2.63	1.22	1.77	1.83	1.49
6	2.84	1.31	1.80	1.74	1.31
7	2.70	1.39	1.60	-	1.67
8	-	1.34	-	1.98	1.48
9	-	1.35	2.13	1.55	2.17
10	-	1.14	-	1.75	1.18
11	-	1.30	-	1.06	0.90
12	-	0.94	-	1.18	0.89
14	-	0.94	-	2.35	1.28
15	1.70	1.13	-	2.07	1.15
16	2.50	1.33	0.85	0.95	1.29

Таблица 4

Вертикальное распределение форм азота и фосфора на глубоководной станции (ст. 4) в подледный период

Горизонт	NH ₄ ⁺	NO ₂ ⁻	NO ₃ ⁻	N _{днв}	N _{орг}	PO ₄ ³⁻	P _{днв}
Поверхность	-	-	0.80	1.75	-	-	0.055
Середина	-	-	0.55	1.65	-	-	0.075
Дно	-	-	0.01	2.6	-	-	0.175
Глубина, м	3.02.1989 г.						
0.8	0.72	0.026	0.17	1.47	0.554	0.007	0.026
1.2	0.75	0.019	0.18	1.47	0.521	0.008	0.026
1.7	1.02	0.014	0.11	1.50	0.356	0.009	0.033
2.2	1.28	0.009	0.07	1.60	0.241	0.010	0.042
3.0	1.84	0.004	0.02	2.30	0.436	0.016	0.057
Глубина, м	22.03.1989 г.						
0.8	0.67	0.110	0.37	1.82	0.67	0.020	0.029
2.0	1.02	0.110	0.14	2.07	0.80	0.019	0.050
3.5	2.00	0.006	0.022	3.33	1.30	0.067	0.107

Приложение 4
Органическое вещество

Таблица 1

Основные характеристики

№ ст	Цп	ШПК, мг/л	ХПК, мг/л	НПК/ХПК, %	С _{орг}	ХПК/С	С _{орг} , мг/л	С _{орг} /С _{общ} , %
1988 г.								
26—30 марта								
1	20	1.9	13.3	14	5.7	2.32	1.4	24
2	20	1.1	15.6	7	5.5	2.84	1.2	22
3	10	2.0	9.9	20	3.0	3.32	0.4	13
4	10	6.0	29.0	21	11.6	2.51	0.7	6
5	10	6.0	28.1	21	11.0	2.56	0.8	7
6	20	3.8	17.6	22	8.0	2.19	0.8	10
7	20	6.3	19.0	33	6.7	2.83	0.9	13
8	10	2.8	16.0	18	4.6	3.46	1.0	22
9	20	1.7	22.0	8	7.2	3.08	1.2	17
10	10	5.2	10.8	48	3.7	2.87	0.7	19
11	25	2.4	19.0	13	6.7	2.63	0.8	12
12	10	2.0	11.8	17	4.1	2.89	0.7	17
14	10	2.9	10.8	27	3.7	2.87	0.6	16
15	10	2.3	13.3	17	4.6	2.87	0.4	9
16	45	8.0	32.1	25	11.9	2.70	2.6	22
№	8—11 мая							
1	55	2.0	30.6	7	11.8	2.60	2.1	18
2	35	2.3	29.4	8	10.6	2.78	3.2	30
3	25	4.7	34.9	13	13.1	2.66	6.1	47
4	25	6.0	30.5	20	11.6	2.64	5.3	46
5	30	5.2	30.9	17	12.8	2.42	5.5	43
6	30	5.1	26.5	19	10.2	2.59	4.4	43
7	30	4.8	30.3	16	11.0	2.75	5.2	47
8	30	5.1	29.4	17	11.6	2.54	4.6	40
9	35	4.9	29.3	17	12.2	2.40	4.1	34
10	25	7.1	37.1	19	12.2	3.04	4.0	33

Продолжение табл. 1

№ ст.	№	ВПК, мг/л	ХПК, мг/л	ВПК/ХПК, %	$C_{\text{впк}}$	ХПК/С	$C_{\text{впк}}$ мг/л	$C_{\text{впк}}/C_{\text{хпк}}$ %
11	25	3.7	35.6	10	10.7	3.34	3.8	36
12	35	2.9	29.0	10	9.9	2.93	3.2	32
14	25	3.7	28.8	13	9.5	3.04	3.9	41
15	30	4.7	31.5	15	9.7	3.25	3.0	31
16	30	1.9	30.6	6	14.0	2.19	0.8	6
№	8—11 июля							
1	35	1.8	17.5	10	7.0	2.49	1.3	18
2	30	6.7	46.0	15	16.1	2.86	7.2	45
3	25	4.8	33.5	14	14.0	2.40	5.2	37
4	25	5.8	34.9	17	15.2	2.30	4.0	26
5	25	6.4	41.8	15	16.7	2.50	8.4	50
6	30	6.1	44.9	14	17.8	2.52	8.0	45
7	25	7.0	40.1	17	17.2	2.34	7.7	45
8	25	7.5	40.0	19	18.8	2.13	7.4	39
9	30	5.2	39.9	13	19.0	2.10	7.1	37
10	25	4.9	33.8	15	13.8	2.45	5.2	38
11	25	6.4	32.3	20	14.9	2.17	4.0	27
12	30	4.0	35.9	11	13.1	2.74	4.1	31
14	35	4.5	34.4	13	12.7	2.72	4.0	32
15	30	6.7	37.9	18	20.6	1.84	8.1	39
16	30	6.8	58.6	12	24.5	2.39	3.7	15
№	26—30 июля							
1	35	1.5	21.5	7	8.8	2.44	0.6	7
2	30	12.4	52.9	23	17.6	3.00	4.7	27
3	25	10.9	51.8	21	18.4	2.82	9.3	51
4	25	11.6	49.4	23	18.3	2.70	9.5	52
5	25	11.8	49.8	24	20.0	2.49	7.4	37
6	25	12.0	50.1	24	24.4	2.05	13.1	54
7	25	11.9	51.4	23	22.0	2.34	11.5	52
8	25	11.2	58.9	19	24.2	2.43	10.8	45
9	30	9.8	51.4	19	19.5	2.64	9.1	47
10	25	10.0	49.8	20	19.0	2.61	9.0	47
11	35	8.7	44.6	19	17.9	2.49	5.6	31

Продолжение табл. 1

№ ст.	Цв	БПК, мг/л	ХПК, мг/л	БПК/ХПК, %	$C_{\text{фак}}$	ХПК/С	$C_{\text{норм}}$ мг/л	$C_{\text{фак}}/C_{\text{норм}}$ %
12	35	5.7	51.8	11	16.9	3.05	8.7	51
14	30	5.3	51.8	10	20.7	2.50	8.5	41
15	30	10.6	51.0	21	20.0	2.55	7.1	35
16	55	2.6	82.1	3	29.7	2.77	21	71
№	8—11 сентября							
1	25	0.5	16.3	3	4.7	3.44	0.3	6
2	30	7.0	59.4	12	23.1	2.57	8.4	36
3	25	6.7	57.4	12	20.9	2.75	9.0	43
4	25	6.2	55.6	11	22.8	2.44	9.3	41
5	30	5.8	51.5	11	17.5	2.94	8.0	46
6	30	6.6	41.5	16	15.5	2.68	6.1	39
7	30	6.7	51.4	13	17.3	2.97	8.8	51
8	25	4.5	45.0	10	16.6	2.71	4.8	29
9	25	5.3	48.6	11	19.3	2.53	7.7	40
10	25	5.0	48.3	10	16.5	2.92	6.8	41
11	30	5.0	44.4	11	14.3	3.10	4.1	29
12	25	5.7	49.9	11	16.9	2.94	8.7	51
14	25	5.2	42.5	12	17.1	2.49	6.0	35
15	30	5.2	50.1	10	17.2	2.92	6.0	35
№	13—17 октября							
1	25	0.8	13.1	6	4.3	3.06	0.4	9
2	25	3.6	34.1	11	9.7	3.53	1.8	19
3	20	4.6	48.5	9	16.1	3.02	2.2	14
4	20	4.2	44.1	10	16.1	2.75	6.0	37
5	25	4.8	51.3	9	14.5	3.53	6.0	41
7	25	5.0	52.6	10	14.5	3.62	6.0	41
8	25	4.6	49.0	9	15.5	3.16	5.2	34
9	25	5.4	47.1	11	14.0	3.37	5.8	42
10	25	4.4	39.9	11	12.0	3.33	4.4	37
11	25	3.2	32.9	10	8.4	3.93	0.5	6
12	25	2.2	51.4	4	16.5	3.11	3.0	18
14	25	5.0	34.8	14	14.5	2.39	5.0	34
15	30	4.4	50.3	9	21.6	2.33	5.5	26
16	35	0.8	28.0	3	8.8	3.18	1.0	11

Продолжение табл. 1

1989 г.											
№ ст.	3—5 февраля					19—23 марта					
	Цв	БПК, мг/л	С _{доб} , мг/л	С _{св} , мг/л	С _{доб} /С _{св} , %	Цв	БПК, мг/л	ХПК, мг/л	БПК/ХПК, %	С _{доб} , мг/л	ХПК/С
1	15	—	2.8	0.6	22	40	1.7	25.1	7	9.5	2.66
2	20	1.4	4.2	0.9	22	35	—	19.6		7.7	2.55
3	20	0.7	3.4	1.0	29	20	2.8	13.5	21	5.2	2.61
4п	25	2.0	4.2	1.2	29	15	3.8	11.8	32	4.7	2.48
4д	35	2.1	10.2	1.4	14		5.1	31.0	16	10.5	2.97
5	20	2.5	10.0	1.8	18	15	3.9	23.3	17	8.6	2.71
6	25	—	7.8	1.7	22	20	3.7	22.4	17	7.8	2.86
7	20	3.9	10.6	1.9	18	20	2.5	18.3	14	7.4	2.48
8	25	7.5	11.6	4.8	42	20	5.2	21.5	24	9.5	2.27
9	25	2.6	10.5	1.4	13	40	2.4	25.1	10	10.8	2.33
10	30	4.7	10.1	2.5	25	20	1.8	13.1	14	5.9	2.21
11	25	2.5	12.0	2.5	21	20	1.0	16.9	6	5.8	2.89
12	20	2.4	5.8	2.0	34	20	3.2	14.0	23	6.8	2.05
14	30	2.4	10.2	2.8	27	20	2.5	13.4	19	5.8	2.29
15	20	2.4	13.3	2.1	16	15	3.4	14.4	24	5.2	2.78
16	35	—	7.6	0.5	7	45	—	23.0	—	9.5	2.43

№ ст.	Цв	БПК, мг/л	ХПК, мг/л	БПК/ХПК, %	С _{доб} , мг/л	ХПК/С	С _{св} , мг/л	С _{доб} /С _{св} , %
12—16 мая 1989 г.								
1	15	1.7	13.1	13	7.6	1.73	1.0	13
2	25	4.0	23.1	17	10.0	2.31	1.8	18
3	25	4.0	18.4	22	10.7	1.72	—	—
4	25	5.4	22.4	24	11.2	1.99	4.0	36
5	—	5.6	—	—	10.6	—	2.3	22
6	30	4.6	21.9	21	10.2	2.14	3.2	31
7	25	4.2	20.3	21	9.5	2.14	3.1	33
8	25	5.0	20.8	24	8.6	2.42	2.8	33
9	30	7.0	26.1	27	12.4	2.10	2.9	23
10	25	6.4	20.1	32	10.3	1.95	2.9	28
11	30	6.2	26.1	24	13.2	1.98	2.6	20
12	30	5.6	24.8	23	11.1	2.23	1.2	11
14	30	6.2	22.5	28	11.0	2.05	2.8	25

Продолжение табл. 1

№ ст.	Цв	БПК, мг/л	ХПК, мг/л	БПК/ХПК, %	С _{дн} , мг/л	ХПК/С	С _{дн} , мг/л	С _{дн} /С _{общ} , %
12—16 мая 1989 г.								
15	—	5.6	—	—	10.6	—	2.3	22
16	55	1.4	28.0	5	14.1	1.99	1.1	8
19—23 июля								
1	15	1.0	13.0	8	3.6	3.58	0.5	14
2	35	7.7	46.3	17	—	—	7.7	—
3	30	7.4	46.3	16	—	—	—	—
4	30	>6.8	50.9	—	18.2	2.80	11.8	65
5	25	>7.9	50.9	—	—	—	11.2	—
6	30	>7.7	45.1	—	16.6	2.72	8.2	49
7	30	>9.0	45.4	—	16.7	2.71	10.3	62
8	25	>8.7	48.4	—	17.9	2.70	11.3	63
9	30	4.9	49.8	10	18.2	2.74	10.8	60
10	30	—	43.9	—	17.2	2.56	7.8	45
11	35	3.4	37.6	9	10.3	3.64	5.4	52
12	30	>7.6	41.4	—	14.5	2.85	—	—
14	30	>8.3	51.0	—	17.9	2.84	10.0	56
15	30	>8.5	48.6	—	19.7	2.47	10.4	53
16	60	0.8	40.5	2	15.5	2.61	1.4	9
16—20 сентября								
1	15	0.6	10.0	6	2.9	3.50	1.0	35
2	25	4.7	35.0	12	12.7	2.77	3.7	29
3	25	4.8	39.4	12	15.3	2.58	6.1	40
4	25	6.0	43.9	14	16.0	2.75	8.6	54
5	25	6.2	44.9	14	14.2	3.16	6.3	44
6	20	6.0	42.5	14	15.7	2.70	6.3	40
7	25	6.6	45.0	15	20.0	2.25	8.2	41
8	25	6.2	44.5	14	19.8	2.25	8.8	44
9	30	6.8	47.5	14	20.2	2.35	10.9	54
10	20	4.4	35.5	12	14.7	2.41	4.9	33
11	25	2.8	27.4	10	9.1	3.00	1.8	20
12	25	4.8	33.3	14	10.8	3.08	3.6	33
14	20	5.2	34.6	15	13.8	2.52	5.2	38
15	20	5.2	33.6	15	14.2	2.37	5.0	35
16	50	0.4	23.3	2	—	—	0.7	—

Продолжение табл. 1

№ ст.	Цп	БПК, мг/л	ХПК, мг/л	БПК/ХПК, %	С _{сум} , мг/л	ХПК/С	С _{сум} , мг/л	С _{сум} /С _{сум} , %
1	15	1.7	21.4	8	8.1	2.63	2.4	29
2	20	3.2	28.3	11	13.6	2.07	2.9	21
3	20	4.8	56.1	9	22.0	2.55	11.9	54
4	25	4.8	43.1	11	16.7	2.58	8.0	48
5	25	4.3	32.0	13	14.7	2.17	3.9	26
6	25	3.5	33.3	11	14.1	2.36	1.3	9
7	20	6.8	39.6	17	15.6	2.54	5.7	36
8	20	6.0	42.5	14	18.8	2.26	6.7	36
9	40	3.6	23.3	15	11.9	1.96	0.7	6
10	30	4.7	36.3	13	16.9	2.14	5.5	32
11	30	5.5	16.5	33	8.1	2.03	1.1	14
14	20	4.4	35.1	13	14.2	2.48	7.0	49
15	-	4.5	32.8	14	14.4	2.27	5.4	37
16	60	1.4	28.6	5	13.3	2.15	1.6	12
1990 г.								
№	5—8 марта							
1	-	-	26.3	-	10.8	2.44	1.4	13
2	-	-	27.9	-	10.9	2.56	1.3	12
4	-	-	18.5	-	8.1	2.27	1.8	22
пов.								
4	-	-	26.3	-	12.5	2.09	1.3	10
дпо								
5	-	-	22.3	-	10.6	2.11	1.1	10
6	-	-	23.9	-	11.6	2.07	0.9	8
7	-	-	21.5	-	9.9	2.17	1.8	18
15	-	-	14.0	-	6.2	2.27	1.2	19
16	-	-	24.5	-	12.2	2.01	1.7	14
№	18—22 апреля							
1	45	-	17.8	-	8.5	2.10	0.9	11
2	40	3.9	20.8	19	9.5	2.19	2.7	29
3	35	5.6	25.5	22	9.0	2.83	4.4	49
4	30	2.0	23.3	9	6.8	3.41	3.4	50
5	30	-	25.1	-	7.9	3.17	4.5	57

Продолжение табл. 1

№ ст.	Цв	БПК, мг/л	ХПК, мг/л	БПК/ХПК, %	С _{бв} , мг/л	ХПК/С	С _{св} , мг/л	С _{бв} /С _{св} , %
18—22 апреля								
6	30	6.7	26.9	25	8.6	3.13	5.2	61
7	25	7.8	26.9	29	8.6	3.13	3.1	36
8	25	6.9	29.3	24	12.4	2.35	4.7	38
9	30	8.1	28.6	28	12.2	2.34	5.5	45
10	35	5.6	25.0	22	8.7	2.88	3.4	39
11	30	—	24.0	—	9.2	2.60	3.5	38
12	45	3.6	22.9	16	10.3	2.21	2.7	26
14	30	—	31.0	—	9.8	3.17	3.7	38
15	30	5.4	25.1	21	11.6	2.18	3.9	34
16	50	1.8	28.3	6	12.5	2.25	0.9	7
17—21 мая								
1	30	0.7	—	—	5.6	—	0.8	14
2	20	5.5	—	—	11.2	—	6.6	59
3	30	8.3	—	—	12.4	—	8.5	68
4	30	8.2	—	—	15.7	—	9.0	57
5	25	7.9	—	—	17.9	—	10.4	58
6	25	7.5	—	—	12.1	—	9.8	81
7	25	9.2	—	—	15.4	—	8.4	55
9	40	6.0	—	—	14.5	—	10.4	72
10	20	5.8	—	—	12.9	—	7.5	58
11	30	2.4	—	—	10.9	—	3.2	29
12	30	7.5	—	—	14.2	—	6.9	49
15	20	8.1	—	—	13.0	—	8.6	66
16	55	1.7	—	—	14.1	—	1.5	11
24—27 июня								
1	—	—	23.5	—	8.5	2.77	1.2	14
2	—	—	25.5	—	9.8	2.60	3.9	40
3	—	—	49.6	—	19.7	2.52	7.1	36
4	—	—	45.6	—	16.9	2.69	—	—
5	—	—	46.5	—	18.4	2.53	9.2	50
6	—	—	42.1	—	16.5	2.55	5.5	33
7	—	—	47.8	—	16.7	2.86	8.4	50
8	—	—	50.4	—	20.8	2.42	—	—

Окончание табл. 1

№ ст.	Цв	БПК, мг/л	XПК, мг/л	БПК/XПК, %	C _{обн} , мг/л	XПК/C	C _{обн} , мг/л	C _{обн} /C _{обн} , %
24—27 июля								
9	—	—	43.1	—	16.9	2.55	—	—
10	—	—	44.3	—	16.8	2.63	7.4	44
11	—	—	28.6	—	11.9	2.41	2.5	21
12	—	—	30.1	—	11.9	2.54	3.5	29
14	—	—	48.4	—	19.6	2.47	—	—
15	—	—	44.4	—	16.3	2.73	7.1	44
16	—	—	34.6	—	15.1	2.30	0.4	3
20 сентября								
1	80	1.3	—	—	14.2	—	0.5	4
2	55	—	—	—	14.0	—	6.3	45
3	35	3.5	—	—	15.0	—	8.6	57
4	35	3.2	—	—	14.7	—	8.5	58
5	35	4.3	—	—	15.6	—	10.3	66
6	40	3.5	—	—	14.6	—	5.1	35
7	40	3.4	—	—	14.3	—	—	—
8	30	4.3	—	—	15.6	—	8.1	52
9	40	4.0	—	—	14.7	—	—	—
10	60	2.6	—	—	12.3	—	—	—
11	45	1.9	—	—	11.6	—	—	—
12	40	3.1	—	—	11.9	—	—	—
14	50	3.2	—	—	15.4	—	—	—
15	45	2.9	—	—	—	—	—	—
16	110	0.8	—	—	17.5	—	0.9	5

Приложение 5

Продукция и деструкция

Таблица 1

Распределение интенсивности продукционно-деструкционных процессов (по данным Монаковой С. В.)

№ сл.	Дата	НСО ₂	Фотосинтез		Деструкция	
		мг/л С	мг/л О ₂	мг/л С	мг/л О ₂	мг/л С
1	7.05.88	30.5	0.03	0.01	0.34	0.13
2		35.5	—	—	0.18	0.07
3		24.0	4.95	1.85	0.98	0.37
4		22.8	3.62	1.36	0.52	0.19
5		21.4	1.35	0.51	0.31	0.12
6		21.6	2.15	0.81	1.11	0.42
7		35.2	1.60	0.60	0.68	0.25
8		24.0	2.06	0.77	1.14	0.43
9		28.8	1.41	0.53	0.52	0.19
11		32.2	2.92	1.09	0.77	0.29
12		27.2	1.81	0.68	0.25	0.09
14		31.0	—	0.00	0.77	0.29
15		22.8	1.75	0.66	0.74	0.28
16		31.1	0.37	0.14	0.25	0.09
1	10.06.88	46.8	7.30	2.73	1.10	0.41
2		24.6	7.90	2.96	2.50	0.94
3		23.4	6.10	2.28	1.70	0.64
4		25.8	9.00	3.37	2.20	0.82
5		25.2	6.90	2.58	2.90	1.09
6		26.4	5.90	2.21	2.80	1.05
7		25.8	4.40	1.65	2.10	0.79
8		25.8	12.8	4.79	4.20	1.57
9		36.0	3.90	1.46	3.30	1.24
10		32.4	2.80	1.05	3.90	1.46
11		35.4	1.20	0.45	2.50	0.94
12		39.0	5.70	2.13	1.70	0.64
14		43.2	5.00	1.87	2.10	0.79

Продолжение табл. 1

№ ст.	Дата	НСО ₂	Фотосинтез		Деструкция	
		мг/л С	мг/л О ₂	мг/л С	мг/л О ₂	мг/л С
15		27.6	4.70	1.76	2.20	0.82
16		68.4	10.0	3.75	2.90	1.09
1	27.07.88	37.0	0.70	0.26	0.70	0.26
2		25.2	14.9	5.58	5.00	1.87
3		22.1	12.1	4.53	4.40	1.65
4		17.9	11.9	4.46	6.60	2.47
5		14.8	10.9	4.08	4.50	1.69
6		24.1	17.2	6.44	5.70	2.13
7		15.7	6.40	2.40	4.90	1.84
8	27.07.88	15.9	9.40	3.52	3.80	1.42
9		18.2	8.10	3.03	4.00	1.50
10		20.2	7.10	2.66	4.30	1.61
11		28.8	5.00	1.87	3.30	1.24
12		22.7	7.00	2.62	3.10	1.16
14		22.0	7.90	2.96	3.40	1.27
15		20.2	7.40	2.77	4.60	1.72
16		49.9	1.10	0.41	0.60	0.22
1	15.10.88	47	0	0.00	0	0.00
2		38	0.60	0.22	0.70	0.26
3		29	-	-	0.70	0.26
4		25	2.60	0.97	0.70	0.26
5		28	3.80	1.42	1.30	0.49
7		27	2.80	1.05	0.80	0.30
8		30	2.00	0.75	0.60	0.22
9		25	1.20	0.45	0.50	0.19
10		30	0.90	0.34	0.80	0.30
11		37	0.70	0.26	0.70	0.26
12		34	0.90	0.34	0.70	0.26
14		28	1.00	0.37	0.70	0.26
15		27	2.80	1.05	1.20	0.45
16		72	0	0	0	0
1	15.05.89	-	0.70	0.26	0.30	0.11
2		-	4.60	1.72	1.30	0.49

Продолжение табл. 1

№ ст.	Дата	HCO_3^-	Фотосинтез		Деструкция	
		мг/л С	мг/л O_2	мг/л С	мг/л O_2	мг/л С
3		-	4.70	1.76	1.40	0.52
4		-	4.50	1.69	1.60	0.60
5		-	2.70	1.01	1.50	0.56
6		-	3.90	1.46	2.90	1.09
7		-	3.30	1.24	1.60	0.60
8		-	4.00	1.50	1.20	0.45
9		-	1.10	0.41	3.30	1.24
10		-	2.30	0.86	0.80	0.30
11		-	0.40	0.15	1.70	0.64
12		-	4.40	1.65	1.80	0.67
14		-	3.90	1.46	1.60	0.60
15		-	3.30	1.24	1.40	0.52
16		-	2.70	1.01	0.70	0.26
1	20.07.89	-	0.30	0.11	0.30	0.11
2		-	6.80	2.55	3.00	1.12
3		-	8.20	3.07	3.40	1.27
4		-	8.70	3.26	3.00	1.12
5		-	7.50	2.81	3.60	1.35
6		-	9.20	3.45	2.20	0.82
7		-	5.70	2.13	3.50	1.31
8		-	9.40	3.52	3.80	1.42
9		-	10.5	3.93	3.60	1.35
10		-	8.90	3.33	3.20	1.20
11		-	6.40	2.40	2.60	0.97
12		-	8.60	3.22	3.30	1.24
14		-	7.40	2.77	4.00	1.50
15		-	7.00	2.62	3.70	1.39
16		-	0.20	0.07	0.50	0.19
1	27.10.89	-	0	0.00	0.10	0.04
2		-	0.50	0.19	0.60	0.22
3		-	0	0.00	0.90	0.34
4		-	0.40	0.15	1.10	0.41

№ ст.	Дата	НСО ₂	Фотосинтез		Деструкция	
		мг/л С	мг/л О ₂	мг/л С	мг/л О ₂	мг/л С
5		-	0.90	0.34	0.40	0.15
6		-	0.80	0.30	0.20	0.07
7		-	1.00	0.37	0.80	0.30
8		-	1.30	0.49	1.00	0.37
9		-	0.10	0.04	0.10	0.04
10		-	0.90	0.34	0.60	0.22
11		-	0.40	0.15	0.30	0.11
14		-	0.50	0.19	0.50	0.19
15		-	1.30	0.49	0.40	0.15
16		-	0	0	0	0

Таблица 2

Распределение основных продукционно-деструкционных характеристик.
 (Гл — глубина в месте отбора проб, Пр — прозрачность по диску Секки,
 ПП — интенсивность фотосинтеза, Хл — хлорофилл «а»,
 САЧ — суточное ассимиляционное число в мгО₂/мгХл сутки,
 Д — деструкция). ПП и Д — в кислородных единицах.
 Данные по хлорофиллу и САЧ Сигаревой и Лященко

№ ст.	Гл., м	Т	Пр.	ПП	Хл.	САЧ	С _{инт}	Д	ШК	ХПК
		°С	см	мг/л сут.	мкг/л		мг/л	мг/л сут.	мг/л	мг/л
1988 г.										
8—11 мая										
1	-	7.0	-	0.03	-	-	2.1	0.34	2.0	30.6
2	2.0	7.2	60	-	67.0	-	3.2	0.18	-	-
3	2.2	8.0	225	4.95	85.1	58	6.1	0.98	4.7	34.9
4	3.5	10.9	80	3.62	70.3	52	5.3	0.52	6.0	30.5
5	2.0	8.6	72	1.35	85.6	16	5.5	0.31	5.2	30.9
6	-	8.5	72	2.15	-	-	4.4	1.11	5.1	26.5
7	2.2	10.9	80	1.60	55.4	29	5.2	0.68	4.8	30.3
8	2.3	8.7	75	2.06	-	-	4.6	1.14	5.1	29.4
9	1.6	8.5	90	1.41	51.8	27	4.1	0.52	4.9	29.3
10	2.5	8.4	70	-	88.4	-	-	-	-	-
11	2.0	8.8	100	2.92	41.1	71	3.8	0.77	3.7	35.6
12	2.0	7.5	70	1.81	-	-	3.2	0.25	2.9	29.0

Продолжение табл. 2

№ ст.	Гл., м	Т °С	Пр. см	III мг/л сут.	Хл. мг/л	СЛЧ	С _{ан}	Д	ВНК	ХПК
							мг/л	мг/л сут.	мг/л	мг/л
8—11 мая										
14	2.0	8.2	90	—	48.3	—	—	0.77	—	—
15	2.5	10.9	80	1.75	60.2	29	3.0	0.74	4.7	31.5
16	—	9.1	—	0.37	—	—	0.8	0.25	1.9	30.6
8—11 июня										
1	—	—	—	7.30	—	—	1.3	1.10	1.8	17.5
2	1.2	21.6	40	7.90	87.0	91	7.2	2.50	6.7	46.0
3	1.9	21.8	65	6.10	64.5	95	5.2	1.70	4.8	33.5
4	2.2	21.8	60	9.00	71.7	125	4.0	2.20	5.8	34.9
5	1.2	21	50	6.90	88.7	78	8.4	2.90	6.4	41.8
6	2.2	21	50	5.90	—	—	8.0	2.80	6.1	44.9
7	1.6	21.2	50	4.40	84.8	52	7.7	2.10	7.0	40.1
8	1.4	22.2	50	12.8	—	—	7.4	4.20	7.5	40.0
9	1.3	25.8	45	3.90	79.2	49	7.1	3.30	5.2	39.9
10	1.4	25.7	55	2.80	50	56	5.2	3.90	4.9	33.8
11	1.4	25.7	60	1.20	32.6	37	4.0	2.50	6.4	32.3
12	1.2	22.7	70	5.70	—	—	4.1	1.70	4.0	35.9
14	1.4	23.0	70	5.00	40.7	123	4.0	2.10	4.5	34.4
15	1.3	21.1	50	4.70	75.7	62	8.1	2.20	6.7	37.9
16	2.1	20.2	65	10.0	—	—	3.7	2.90	6.8	58.6
26—30 июня										
1	1.5	—	—	0.70	—	—	0.6	0.70	1.5	21.5
2	1.1	22.4	40	14.9	116	128	4.7	5.00	12.4	52.9
3	1.8	22.4	40	12.1	138	88	9.3	4.40	10.9	51.8
4	2.2	22.8	35	11.9	138	86	9.5	6.60	11.6	49.4
5	1.2	23.8	35	10.9	106	103	7.4	4.50	11.8	49.8
6	1.2	22.5	30	17.2	—	—	13.1	5.70	12.0	50.1
7	1.1	25.8	40	6.40	117	55	11.5	4.90	11.9	51.4
8	1.0	23.3	40	9.40	—	—	10.8	3.80	11.2	58.9
9	1.0	26.2	40	8.10	125	65	9.1	4.00	9.8	51.4
10	1.1	24.5	40	7.10	111	64	9.0	4.30	10.0	49.8
11	1.1	25.2	45	5.00	46.7	107	5.6	3.30	8.7	44.6
12	1.1	21.8	45	7.00	—	—	8.7	3.10	5.7	51.8
14	1.1	20.8	40	7.90	47.9	165	8.5	3.40	5.3	51.8
15	1.7	24.4	35	7.40	98	76	7.1	4.60	10.6	51.0
16	—	—	—	1.10	—	—	21.0	0.60	2.6	82.1

Продолжение табл. 2

№ ст.	Гл. м	Т	Пр.	III	Хз	СЛЧ	С _{вв}	Д	БПК	ХПК
		°С	см	мг/л суз.	мг/л		мг/л	мг/л суз.	мг/л	мг/л
13—17 октября										
1	—	6.4	130	0	—	—	0.4	0	0.8	13.1
2	—	6.4	75	0.60	35.0	17	1.8	0.70	3.6	34.1
3	—	8.0	55	—	71.3	—	2.2	0.70	—	—
4	3.5	8.1	55	2.60	64.7	40	6.0	0.70	4.2	44.1
5	0.8	8.0	55	3.80	81.8	46	6.0	1.30	4.8	51.3
7	1.0	8.8	55	2.80	82.5	34	6.0	0.80	5	52.6
8	1.0	7.6	65	2.00	—	—	5.2	0.60	4.6	49.0
9	0.8	6.8	65	1.20	46.6	26	5.8	0.50	5.4	47.1
10	1.0	6.2	65	0.90	43.7	21	4.4	0.80	4.4	39.9
11	1.0	6.2	65	0.70	32.8	21	0.5	0.70	3.2	32.9
12	0.9	7.0	125	0.90	—	—	3.0	0.70	2.2	51.4
14	0.9	6.8	75	1.00	55.4	18	5.0	0.70	5.0	34.8
15	2.1	8.2	55	2.80	81.1	34	5.5	1.20	4.4	50.3
16	1.0	6.6	145	0	—	—	1.0	0	0.8	28.0
1989 г.										
12—16 мая										
1	—	13	—	0.70	—	—	1.0	0.30	1.7	13.1
2	1.9	16.9	80	4.60	24.5	188	1.8	1.30	4.0	23.1
3	2.0	16.6	110	4.70	24.4	193	2.5	1.40	4.0	18.4
4	3.5	16.9	90	4.50	28.8	156	4.0	1.60	5.4	22.4
5	—	16.3	100	2.70	22.6	119	2.9	1.50	5.6	—
6	—	—	—	3.90	—	—	3.2	2.90	4.6	21.9
7	1.7	16.3	90	3.30	24.9	133	3.1	1.60	4.2	20.3
8	1.8	16.6	110	4.00	—	—	2.8	1.20	5.0	20.8
9	1.7	17.5	110	1.10	22.5	49	2.9	3.30	7.0	26.1
10	2.0	16.6	110	2.30	19.8	116	2.9	0.80	6.4	20.1
11	1.9	16.7	90	0.40	21.5	19	2.6	1.70	6.2	26.1
12	1.8	16.8	120	4.40	—	—	1.2	1.80	5.6	24.8
14	2.0	16.8	120	3.90	23.0	170	2.8	1.60	6.2	22.5
15	1.9	16.7	90	3.30	14.1	234	2.3	1.40	5.6	—
16	—	—	—	2.70	—	—	1.1	0.70	1.4	28.0
19—23 июля										
1	..	—	—	0.30	—	—	0.5	0.30	1.0	13.0
2	1.5	20.3	50	6.80	84.9	80	7.7	3.00	7.7	46.3

№ ст.	Гн., м	Т °С	Пр. см	III мг/л сут.	Хл. мг/л	СЛЧ	С _ж мг/л	Д мг/л сут.	ШК мг/л	ХПК мг/л
19—23 июля										
3	1.7	20.1	45	8.20	131	63	10.9	3.40	7.4	46.3
4	3.6	20.8	45	8.70	137	64	11.8	3.00	>6.8	50.9
5	1.2	20.6	40	7.50	118	64	11.2	3.60	>7.9	50.9
6	—	—	—	9.20	—	—	8.2	2.20	>7.7	45.1
7	1.4	21.0	40	5.70	116	49	10.3	3.50	>9.0	45.4
8	1.5	20.1	45	9.40	—	—	11.3	3.80	>8.7	48.4
9	—	—	—	10.5	98.4	107	10.8	3.60	4.9	49.8
10	—	—	—	8.90	79.6	126	7.8	3.20	—	43.9
11	—	—	—	6.40	104	62	5.4	2.60	3.4	37.6
12	1.2	20.1	45	8.60	—	—	—	3.30	>7.6	41.4
14	1.3	19.8	35	7.40	118	63	10.0	4.00	>8.3	51.0
15	1.7	20.0	45	7.00	120	58	10.4	3.70	>8.5	48.6
16	—	—	—	0.20	—	—	1.4	0.50	0.8	40.5
30 октября — 2 ноября										
2	—	—	—	0.50	47.6	11	2.9	0.60	3.2	28.3
3	—	—	—	0	121	0	11.9	0.90	4.8	56.1
4	3.2	—	—	0.40	103	4	8.0	1.10	4.8	43.1
5	1.3	—	—	0.90	84.8	11	3.9	0.40	4.3	32.0
6	—	—	—	0.80	—	—	1.3	0.20	3.5	33.3
7	1.2	3.6	40	1.00	102	10	5.7	0.80	6.8	39.6
8	1.8	4.0	40	1.30	—	—	6.7	1.00	6.0	42.5
9	1.0	4.2	50	0.10	7.7	13	0.7	0.10	3.6	23.3
10	—	—	—	0.90	103	9	5.5	0.60	4.7	36.3
11	—	—	—	0.40	11.0	36	1.1	0.30	5.5	16.5
14	—	—	—	0.50	11.3	4	7.0	0.50	4.4	35.1
15	—	—	—	1.30	103	13	5.4	0.40	4.5	32.8

Замеченные опечатки

Стр. 67. таблица 2.5. Последний столбец.

Напечатано: 460;430;440;430;903;500

Должно быть: 825;878;860;878;439,743

Стр. 163. 4-я графа таблицы.

Напечатано 6—10.10.87. Должно быть 23.03.88

Стр. 166. 16-я снизу и стр. 167. 2-я сверху.

Напечатано: Na, K, Ca, Mg, Cl, SO₂, HCO₃, Э.

Должно быть: Ca²⁺, Mg²⁺, Cl⁻, SO₄²⁻, HCO₃⁻, Ш, Ж, Э.

ОГЛАВЛЕНИЕ

<i>Введение</i>	3
ЧАСТЬ I. ГИДРОЛОГИЯ (Литвинов А. С., Поддубный С. А.)	7
Глава 1. Физико-географическая характеристика	7
1.1. Водосборный бассейн.....	7
1.2. Морфометрия и рельеф дна.....	8
1.3. Климатические особенности бассейна.....	12
1.3.1. Температура воздуха, осадки, испарение.....	12
1.3.2. Режим ветра.....	14
Глава 2. Особенности гидрологического режима озера	17
2.1. Режим уровня.....	17
2.2. Водный баланс и водообмен.....	22
2.3. Термический режим.....	24
2.4. Электропроводность и прозрачность воды.....	27
2.5. Грунтовый комплекс.....	29
Глава 3. Гидродинамический режим	33
3.1. Режим волнения.....	33
3.2. Структура течений.....	37
3.2.1. Типы циркуляции вод в мелких озерах.....	37
3.2.2. Натурные наблюдения над течениями.....	39
3.2.3. Математическое моделирование циркуляции воды.....	40
3.2.4. Воздействие волн и течений на дно озера.....	46
ЧАСТЬ II. ГИДРОХИМИЯ (Бикбулатов Э. С., Бикбулатова Е. М.)	50
Глава 1. Методы химического анализа и отбора проб	51
Глава 2. Кислородный режим	52
Глава 3. CO₂ и pH	53
Глава 4. Минерализация и элементы солевого состава	55
4.1. Притоки.....	66
4.1.1. Малые реки и ручьи.....	66
4.1.2. Река Ишья.....	68
4.1.3. Река Сара.....	68
4.2. Озерные водные массы.....	69
4.2.1. Ионный состав.....	70
4.2.2. Количественные связи между компонентами солевого состава.....	75
4.2.3. Динамика минерализации.....	79

Глава 5. Микроэлементы.....	82
5.1. Железо	83
5.2. Другие микроэлементы.....	87
Глава 6. Биогенные элементы	87
6.1. Соединения азота и фосфора.....	88
6.1.1. Зимний режим	88
6.1.2. Весенний режим	93
6.1.3. Летний и осенний режимы.....	94
6.1.4. Азот и фосфор в пригоках.....	95
6.2. Кремний	99
Глава 7. Органическое вещество.....	101
7.1. Распределение и динамика органического вещества.....	102
7.1.1. Зимний режим и проблемы выживания органических веществ	103
7.1.2. Весенний режим.....	109
7.1.3. Летний режим.....	111
7.1.4. Осенний режим.....	112
7.1.5. Динамика ОВ в пригоках	114
7.2. Продукция и деструкция органического вещества	114
7.2.1. Фотосинтез фитопланктона.....	114
7.2.2. Продукция высшей водной растительности	121
7.2.3. Продукция альгоценозов эвифитона.....	124
7.2.4. Деструкция органического вещества	125
7.3. Углеводороды, битумынды и проблемы оценки нефтяного загряз- нения.....	127
Глава 8. Биогенная нагрузка.....	134
8.1. Внутренняя биогенная нагрузка	134
8.1.1. Краткая химическая характеристика донных отложений	135
8.1.2. Скорости выделения ОВ и биогенных элементов из донных отложений	141
8.2. Внешняя биогенная нагрузка.....	146
<i>Заключение</i>	150
<i>Литература</i>	153
<i>Приложения</i>	159

Э. С. Бикбулатов, Е. М. Бикбулатова,
А. С. Литвинов, С. А. Поддубный

ГИДРОЛОГИЯ И ГИДРОХИМИЯ ОЗЕРА НЕРО

Научное издание

Подписано в печать 19.06.2003. Формат 60×84/16. Гарнитура «Таймс».
Печать офсетная. Бумага офсетная. Усл. печ. л. 12,0.
Тираж 200 экз. Заказ № 2643.

Отпечатано в ОАО «Рыбинский Дом печати»
152901, г. Рыбинск, ул. Чкалова, 8.