

УДК [556.551:556.114](282.247.216)

ГИДРОХИМИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ОЗЕРА ИЛЬМЕНЬ

Г.И. Несветова, В.Д. Бойцов

Государственный научно-исследовательский институт озерного и речного рыбного хозяйства, nginva@yandex.ru

Выполнен анализ основных критериев, формирующих высокую биопродуктивность озера Ильмень. Рассмотрены особенности наиболее важных для функционирования экосистемы озера гидрохимических характеристик водных масс. Показана их значительная изменчивость, обусловленная влиянием гидрологических, физико-химических, биологических и биохимических процессов.

Ключевые слова: озеро Ильмень, гидрохимическая характеристика, биопродуктивность.

HYDROCHEMICAL CHARACTERISTICS OF THE LAKE ILMEN

G.I. Nesvetova, V.D. Boytsov

State Research Institute of Lake and River Fishery

The analysis of the main criteria for forming high productivity of Lake Ilmen is carried out. Features of the most important for the functioning of the lake ecosystem hydrochemical characteristics of water masses are considered. Their significant variability, which is due to the influence of hydrological, physico-chemical, biological and biochemical processes, is revealed.

Keywords: Lake Ilmen, hydrochemical characteristics, bioproductivity.

Введение

Озеро Ильмень, расположенное в Новгородской области, с давних времен служило источником рыбных богатств для жителей окрестных поселений. Научные исследования водоема были начаты еще в XIX веке, а в XX веке они в основном сосредоточились на изучении биологии рыб, динамики их численности и биомассы, на оценке запасов промысловых объектов с целью разработки рекомендаций по их рациональной эксплуатации. Значительно меньшее внимание уделялось изучению физико-химических параметров вод озера Ильмень. Тем не менее известно, что эти факторы оказывают как прямое, так и косвенное влияние на размножение, выживаемость, рост, поведение и распределение организмов всех трофических уровней пищевой цепи. Динамика абиотических факторов отличается значительной изменчивостью в пространстве и во времени. Целью настоящей работы является систематизированное описание факторов, способствующих формированию высокой биопродуктивности озера Ильмень, а также внутригодовой и межгодовой изменчивости гидрохимических параметров.

Материалы и методы

Материалами для настоящей работы послужили данные Новгородского центра по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды, фонды Новгородского отделения ФГБНУ «ГосНИОРХ», литературные источники.

Общая характеристика гидрохимического состояния озера

Озеро Ильмень является одним из наиболее продуктивных озер Северо-Западного региона европейской части России. Особая роль в концентрировании гидробионтов принадлежит в них границам физико-химических характеристик вод и дает ключ к объяснению основных закономерностей распределения жизни, связывая их с расположением внешних и внутренних границ в водоеме.

Внутренними границами в озере Ильмень являются зоны смешения вод различного генезиса. Большое число таких зон создается впадающими в озеро многочисленными реками. Вследствие этого происходит механическая интенсификация круговорота химического и биологического вещества, что является надежным признаком повышенной вероятности скопления организмов. Здесь же формируются участки, обогащенные биогенными элементами. Их пополнение обеспечивается не только притоком речных вод, но и интенсивным вертикальным перемешиванием, охватывающим всю водную толщу озера, чему способствует активная ветровая деятельность.

Суммарный перенос водных масс в озеро Ильмень в направлении с востока на запад обуславливает образование в озере фронтальной зоны, характеризующейся значительными градиентами концентрации биогенных элементов [32]. Существенную роль в пополнении озера биогенами играют также выщелачивание и биотическое разложение мертвого органического вещества, образовавшегося в предшествующий год. В работе [9] на основании экспериментальных данных показано, что поступление вещества в результате выщелачивания составляет по сравнению с приносом речными водами для $P-PO_4$ 10 %, для $N-NH_4$ 1—1,5 %, для $N-NO_2$ 0,2 %, для $N-NO_3$ 0,006 %, для $C_{орг}$ 1,4 %.

Кроме речных вод, источниками минеральных веществ, поступающих в озерное ложе, являются береговые склоны. Энергия волнения воздействует на береговую область и разрушает слагающие ее породы, в результате чего материал поступает вниз по склонам на дно озера. Это еще один участок формирования высокой продуктивности — контактная зона типа вода — твердый субстрат. Теоретическим обоснованием высокой продуктивности таких зон является концепция, согласно которой, вблизи раздела фаз происходит усиление жизненных явлений («сгущение жизни» по терминологии В.И. Вернадского [6]), т.е. имеет место околоразделный эффект. Контактная пограничная область водной массы и берега представляет собой объединение множества факторов среды, оптимальное сочетание которых составляет суть этого феномена.

Следует упомянуть еще об одной внутренней границе, на которой происходит концентрирование жизни в водоеме. Это ледовая кромка. Весной при таянии льда формируются участки акватории с несколько отличными от окружающих вод параметрами. Очевидно, это является следствием того, что талая вода обладает характеристиками структурированной воды, в которой испытывают потребность многие организмы [11]. Отличительные «черты» талой воды могут формироваться при поступлении неорганического и органического вещества с атмосферными осадками и вследствие ветрового воздействия [3].

Эффект «сгущения» жизни у льда формируется также за счет поступления органического вещества из льда, в котором обнаружено ледовое сообщество, состоящее из разнообразных микроорганизмов, водорослей и простейших [3, 4, 16, 28, 31]. Именно в период таяния льда возникает совершенно необычный биотоп, в котором способны развиваться пресноводные организмы. Кроме того, в период между интенсивным намерзанием и таянием пресного льда его нижняя поверхность может обрастать водорослями, что было впервые обнаружено на реке Амуре [3]. При таянии льда клетки фитопланктона попадают в воду и служат маточной популяцией для интенсивного первичного продуцирования. Очевидно и то, что вскрытие льда само по себе оказывает благоприятный эффект на развитие жизни, ибо освобождающиеся от льда акватории получают больше солнечной радиации.

Бактериопланктон также вносит существенный вклад в повышение биологической продуктивности акватории вблизи кромки льда [15, 16, 33].

Все вышеперечисленные факторы подвержены большой изменчивости во времени, и, следовательно, велика вариабельность уровня биопродуктивности на первом и последующих трофических уровнях. К примеру, довольно большой объем приносимой реками воды с высокой концентрацией минеральных и органических веществ не является постоянным и зависит от интенсивности водного стока рек [2, 25]. Так, с 1971 по 1975 г. в условиях низкого уровня воды значительно сократился приток биогенов в озеро Ильмень: его среднегодовой сток составил 31,5 тыс. т, а потеря через реку Волхов — 22,3 тыс. т, т.е. примерно 60 % [27].

Нельзя не упомянуть и о том, что год от года увеличивается степень загрязнения озера Ильмень. Вода обогащается биогенными элементами, ядохимикатами, органическими веществами, чуждыми природной среде синтетическими соединениями, солями тяжелых металлов, содержание которых многократно превышает их фоновое содержание в воде [14, 17, 22, 30]. Эти вещества блокируют клеточный метаболизм живых организмов. При таких условиях передача энергии на более высокие трофические уровни может быть недостаточно эффективной. Поскольку эти процессы возникают в различные годы и в различные сезоны, то и уровень продуктивности озера от года к году может значительно различаться.

Следует отметить, что амплитуда высоты уровня исследуемого водоема больше, чем у остальных озер России, и может достигать 7,5 м. Из-за значительных колебаний уровня и плоской котловины дна, площадь зеркала озера Ильмень изменяется почти в четыре раза, а его объем — в 12 раз [7, 23, 25]. Уровенный режим озера влияет на количественное развитие фитопланктона и в значительной степени определяет качественные характеристики биоценозов, воздействуя на структуру фитоценозов [1]. Величина уровня также является мощным фактором, определяющим межгодовые различия интенсивности развития фитопланктона и видового состава сообщества.

Л.Ф. Смирнова [25] указывает на то, что трансформация минеральных и органических веществ в озере Ильмень идет довольно интенсивно. Доминирующее положение занимает кремний, среди минеральных соединений — гидрокарбонатный ион. Для первичного продуцирования характерна многофакторная лимитация,

причем основное лимитирующее воздействие в среднем за сезон вегетации оказывают дефицит фосфора и низкая прозрачность [32].

В озере происходит довольно интенсивное развитие фитопланктона, обусловленное постоянным пополнением вод биогенными элементами за счет исключительной проточности озера. Представленные в работе Е.В. Авинской [1] материалы свидетельствуют о высокой степени адаптации фитопланктона озера Ильмень к значительной его проточности и частым ветровым перемешиваниям. Кроме того, дополнительной энергией для развития гетеротрофов служит органическое вещество (ОВ) озера, источниками которого являются биологические и биохимические процессы, происходящие в водоеме. Поступление ОВ за счет фотосинтеза в среднем почти в два раза превышает его поступление с речными водами [25, 27]. Согласно модельным расчетам, в приходной части годового баланса ОВ более 80 % составляет автохтонное вещество [32].

Пополнение акватории органическим веществом происходит также за счет отмирания и последующего осаждения на дно планктона животного и растительного происхождения (так называемый «дождь трупов»). Кроме того, метаболиты прибрежной растительности оказывают определенное влияние на потоки органического вещества, пополняющие материальную базу формирования ила [27]. В период разлива озера увеличивается объем вод, что приводит к понижению содержания органики. Во второй половине лета и осенью с повышением температуры воды и интенсивным развитием фитопланктона концентрация ОВ в озере увеличивается [18, 26, 32]. Очевидно, что наличие органического вещества приводит к развитию гетеротрофной составляющей структуры фитоценозов, что также повышает биопродуктивность озера.

Подтверждением высокой биопродуктивности акваторий, где происходит концентрирование жизни, является максимальная локализация зоопланктона в районах смешения и трансформации различных водных масс озера Ильмень [12, 26]. Это участки повышенной динамики вод, где усиливается интенсивность физико-химических и биологических процессов, что создает благоприятные условия для питания зоопланктонов, способствующие достижению ими высокой численности. О.И. Мицкевич и Н.И. Волхонская [19] на основании исследований, выполненных в конце 1990-х годов, выделили в отдельную зону исток реки Волхова, где ввиду специфичности локальных условий развиваются характерные только для этой акватории биоценозы, отличающиеся большим видовым разнообразием.

Комплексный анализ всех компонентов экосистемы позволяет подойти к познанию закономерностей трансформации биогенных элементов в живое органическое вещество первичных продуцентов и консументов. Химические показатели являются теми интегральными характеристиками, которые формируются в результате сложных процессов, происходящих в экосистеме водоема.

Одним из основных факторов, определяющих трофический статус озерных экосистем, является запас биогенных элементов, и прежде всего соединений азота и фосфора. Включаясь в биотический круговорот, биогенные элементы определяют уровень развития автотрофного компонента сестона, что тесно связано также с общим содержанием взвешенных веществ и прозрачностью воды [13]. В связи

с высокой подвижностью вод озера Ильмень, обусловленной высокой проточностью и сильным влиянием ветра, районы с высоким и низким содержанием биогенных элементов постоянно изменяют свою локализацию [32]. Дефицит биогенных элементов в водоеме нередко лимитирует его общую биопродуктивность.

Однако наличие достаточного количества биогенов само по себе еще не обеспечивает высокого уровня численности фитопланктона, так как лимитировать его развитие может любой из факторов, влияющих на этот процесс. Иногда наблюдаемый в водоеме уровень содержания биогенных элементов может быть следствием продукционных процессов, а не их причиной.

Индикатором развития первичных продуцентов в водоеме служит и степень насыщенности воды кислородом. Концентрация растворенного в воде кислорода в любой точке водоема формируется в результате разнонаправленных процессов его поступления и поглощения. Верхние слои насыщаются кислородом за счет поглощения его из атмосферы и выделения первичными продуцентами при фотосинтезе. Поступление кислорода в более глубокие слои происходит исключительно в результате горизонтальной и вертикальной циркуляции вод. Перенос по вертикали осуществляется в ходе конвективного и турбулентного перемешивания, а также динамического опускания и подъема вод (например, прибрежного апвеллинга и даунвеллинга). Для мелководного озера Ильмень распределение кислорода по вертикали, как правило, однородно. Только при штилевой погоде разница содержания кислорода между поверхностными и придонными водами бывает весьма значительной. Так, в начале июля 1937 г. во время интенсивного развития фитопланктона при штилевой погоде насыщение поверхностных вод кислородом достигало 200 %, а в придонных слоях в утренние часы наблюдался его дефицит [26].

В работе [7] отмечается крайняя неустойчивость кислородного режима озера, несмотря на его мелководность и относительно хорошее перемешивание водной толщи. Авторы [7] акцентируют внимание на существенной особенности кислородного режима озера — недонасыщенности его вод кислородом даже в поверхностном слое, где редко достигается 100 %-ный уровень насыщения. Это объясняется большой интенсивностью в водной толще озера окислительных процессов, потребляющих кислород и высвобождающих биогенные элементы. Как отмечает Л.Л. Россолимо [21], при взмучивании со дна илистых частиц растворенный кислород расходуется также на окисление их органического вещества.

Интенсивное ветровое волнение также оказывает влияние на кислородный режим озера. В такие периоды наблюдается его эвазия в атмосферу, что приводит к дефициту газа в воде [2]. Однако содержание кислорода в придонном слое озера не понижается до такого минимума, как в большинстве мелководных озер, где зимой кислород расходуется полностью [32]. Эта особенность, по мнению Л.Л. Россолимо [21], определяется поступлением в озеро богатых кислородом речных вод.

Связь между живым организмом и окружающей средой очень сложна и многогранна. Во-первых, степень влияния среды на организм определяется его физиологическим состоянием. Во-вторых, кажущаяся простой причинная зависимость состояния организма от любого отдельного внешнего фактора никогда не бывает

изолированной от влияния других факторов и взаимодействия с ними. Воздействие всех факторов осуществляется комплексно и одновременно, что осложняет изучение его конкретных проявлений. Однако, как отмечает А.М. Гиляров [8], заметный прогресс в развитии экологии достигается именно тогда, когда исследователи анализируют частные случаи, что приводит к решению достаточно общих проблем.

Гидрохимическую составляющую абиотических характеристик водоема можно рассматривать как составную часть единой метаболической системы, основанной на принципе обратной связи: выделение — поглощение. Анализируя гидрохимический режим озера Ильмень, следует отметить, что в его водах часто нарушается «классическая» сезонность концентраций биогенных элементов, свойственная крупным пресноводным и морским экосистемам. В них в течение года происходит чередование максимума биогенов в предвесенний период, уменьшение их концентрации весной, формирование минимума летом при интенсивном развитии первичных продуцентов и постепенное восстановление их количества в трофогенном слое в период осенне-зимнего конвективного перемешивания водных масс.

Особенности внутригодовой и межгодовой изменчивости содержания биогенных элементов

Отсутствие «классической» схемы сезонной динамики биогенов в мелководном озере Ильмень продемонстрировано на рис. 1—7, построенных по материалам Новгородского отделения ФГБНУ «ГосНИОРХ» с привлечением данных Новгородского областного центра по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды. Причина такой изменчивости заключается в значительной вариабельности факторов, их формирующих. Сезонный сток рек приносит в озеро максимум биогенов, а весеннее развитие фитопланктона приводит к уменьшению их концентрации. Однако в пределах этих определяющих процессов возникают и другие, порой более значимые факторы в перераспределении питательных веществ, «работающие» как в вертикальном, так и в горизонтальном направлении. К таким факторам относятся активное перемешивание водных масс, «возвращение» биогенных элементов в воду вследствие окисления органических веществ, выпадение атмосферных осадков. Последний фактор способен существенно повлиять на биогенную структуру вод озера в силу его мелководности. Поскольку эти процессы возникают в разные годы и в разное время, то сезонная динамика содержания биогенов год от года может значительно различаться, что видно из представленных рисунков. При этом важно то, что вследствие большой подвижности основных биогенных элементов (азота и фосфора) трудно определить характерные черты их сезонной и межгодовой динамики, поскольку регенерация фосфора при минерализации органического вещества часто происходит быстрее, чем регенерация азота, так как последний прочно входит в состав белка [29].

Следует подчеркнуть, что в настоящей работе использованы данные измерений концентрации гидрохимических элементов вод поверхностного слоя, поскольку ее значения в придонном слое или соответствуют значениям в поверхностных водах, или незначительно от них отличаются.

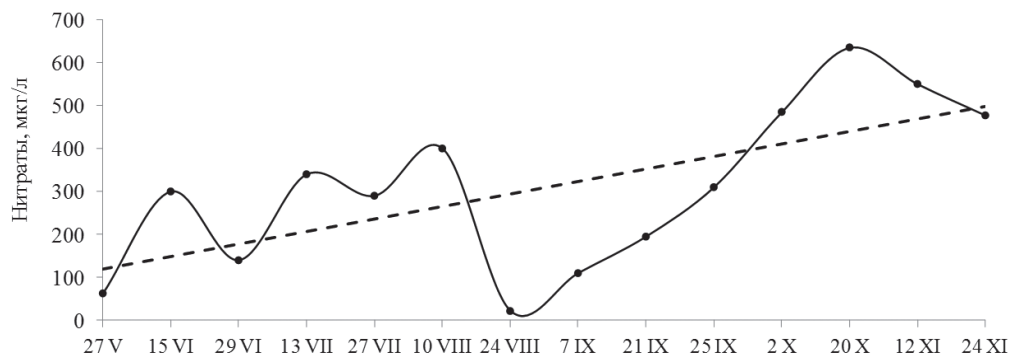


Рис. 1. Внутригодовая изменчивость концентрации нитратов в поверхностном слое озера Ильмень в 1986 г.

Штриховая линия — линейный тренд.

На рис. 1 представлена сезонная динамика концентрации нитратов в озере Ильмень в 1986 г. В связи с отсутствием данных за зимний период (с декабря по апрель) изменчивость концентрации нитратов показана лишь с конца мая по ноябрь. Из рисунка видно, что минимум содержания нитратов в воде озера зафиксирован в конце мая (возможно, что весь месяц значения были минимальными) и в конце августа, а максимум — в конце второй декады октября. При этом если в течение 15 дней с 15 по 29 июня концентрация нитратов уменьшилась вдвое, то за период той же длительности с 10 по 24 августа она уменьшилась примерно в 20 раз. Начиная с 7 сентября содержание нитратов равномерно увеличивалось со скоростью примерно 80—120 мкг/л в месяц. В изменчивости этого химического элемента с конца мая по конец ноября присутствует линейный восходящий тренд (см. рис. 1).

В 1987 г. наблюдалась совершенно иная картина. Поскольку массив первичных данных ограничен концом октября, на рис. 2 представлена сезонная динамика концентрации нитратов без двух последних месяцев этого года. С января по апрель концентрация нитратов варьирует в пределах 430—640 мкг/л с максимумом в конце января. В мае происходит ее уменьшение с последующим увеличением до максимальных значений в середине июня, причем этот максимум сопоставим с январскими значениями. За 11 дней с 13 по 23 июня содержание нитратов уменьшается примерно втрое. В начале августа и в конце октября наблюдается сезонный минимум содержания нитратов. В динамике этого элемента за весь период наблюдений был выделен линейный тренд, который имеет противоположный знак по сравнению с 1986 г. и соответствует уменьшению содержания нитратов (см. рис. 2).

В работе Л.Ф. Смирновой [24] указано, что максимум биогенов в озере Ильмень регистрируется в период весеннего паводка и в зимнее время, когда процесс фотосинтеза практически отсутствует. Аналогичная информация содержится и в работе [20]. Описывая внутригодовую изменчивость компонентов биотопа озера

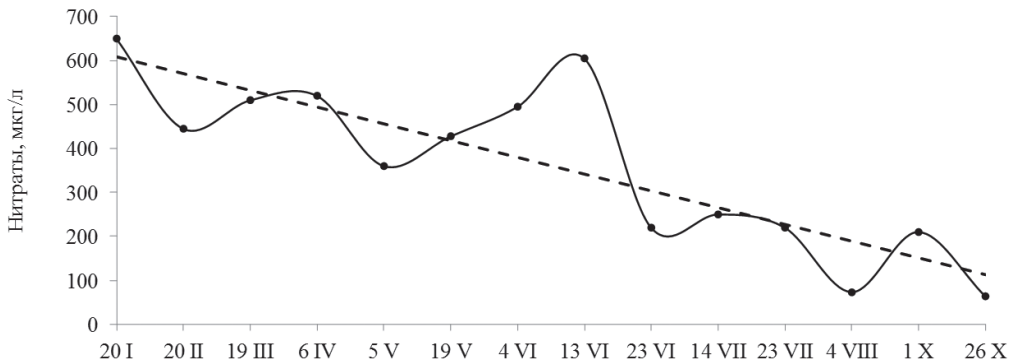


Рис. 2. Внутригодовая изменчивость концентрации нитратов в озере Ильмень в 1987 г.

Штриховая линия — линейный тренд.

Ильмень, авторы указанных работ подчеркивают, что в их динамике происходит весенне-летнее понижение концентрации биогенных элементов, связанное с биосинтезом водорослей, и осенне-зимняя регенерация питательных веществ. Однако сезонная изменчивость содержания нитратов в 1986 и 1987 гг. демонстрирует несколько иную картину. В 1986 г. сезонные минимумы концентрации нитратов зафиксированы в конце мая и конце августа, а максимальными их значения были в октябре — ноябре. В 1987 г. максимальные значения концентрации нитратов наблюдались в течение первого полугодия, а минимальные — в начале августа и в конце октября.

На рис. 3 показана изменчивость концентрации фосфатов в водах озера в 1986 г. Их низкое содержание зафиксировано в последних числах июня. В июле — августе и в начале сентября произошло повышение концентрации фосфатов в водных массах. Их минимальные значения были отмечены в начале третьей декады сентября. Максимальными были значения в сентябре, октябре и ноябре. В 1987 г. равномерное уменьшение концентрации фосфатов с начала года до начала апреля было нарушено всплеском их содержания в конце второй декады мая, когда оно превысило зимние значения почти вдвое (рис. 4). Далее, с июня по октябрь, происходило волнообразное чередование минимумов и максимумов.

Межгодовые различия в сезонной динамике содержания биогенных элементов в 1986 и 1987 гг., отмеченные выше, могут формироваться в связи с тем, что период весеннего максимума развития фитопланктона в разных районах озера наступает асинхронно, причем разница во времени может достигать 40—50 суток. В работе [32] приведены данные о содержании кислорода и отмечено, что летом 1986 г. его концентрация была значительно выше, чем летом следующего года. Авторы объясняют это тем, что в теплый период 1986 г. наблюдалась высокая повторяемость солнечной штилевой погоды, а в 1987 г. преобладала пасмурная погода и был повышен уровень ветровой деятельности. Возможно, именно это,

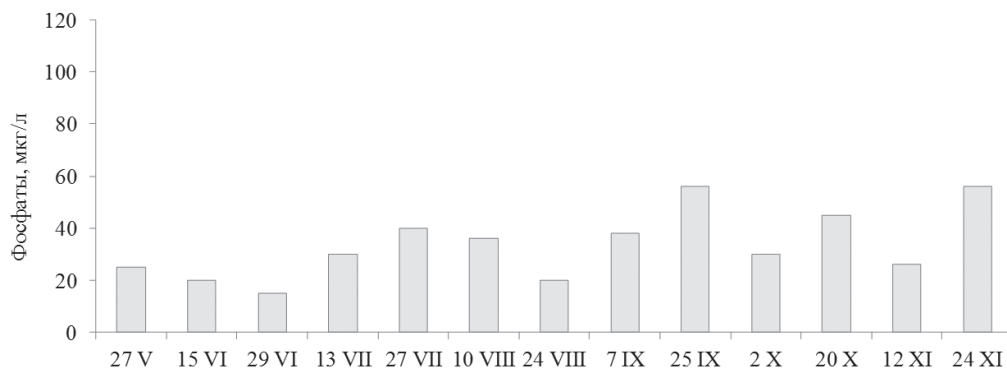


Рис. 3. Сезонная изменчивость концентрации фосфатов в озере Ильмень в 1986 г.

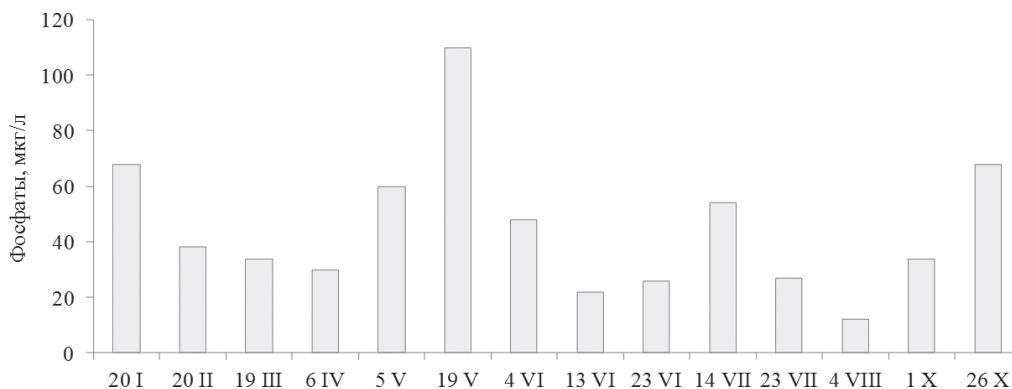


Рис. 4. Сезонная изменчивость концентрации фосфатов в озере Ильмень в 1987 г.

прежде всего, и привело к существенным различиям в распределении летних значений концентрации биогенных элементов в эти годы. Так, в конце мая и августа 1986 г. концентрация нитратов была минимальной (см. рис. 1) и наблюдалось пониженное содержание фосфатов по сравнению с 1987 г. (см. рис. 4), что, очевидно, было обусловлено интенсивным развитием фитопланктона. Следовательно, и концентрация кислорода в этот период была достаточно высокой.

Другая причина, вероятно, кроется в том, что начиная с 1960-х годов изменились многие гидрохимические показатели, характеризующие качество озерной воды [7]. На фоне увеличения концентрации загрязняющих веществ увеличилась минерализация озера, главным образом, за счет всех форм минерального азота, а также соединений хлора и серы.

Следует заметить, что экстремальная межгодовая изменчивость гидрохимических характеристик сравнима с их сезонной изменчивостью, а в ряде случаев и

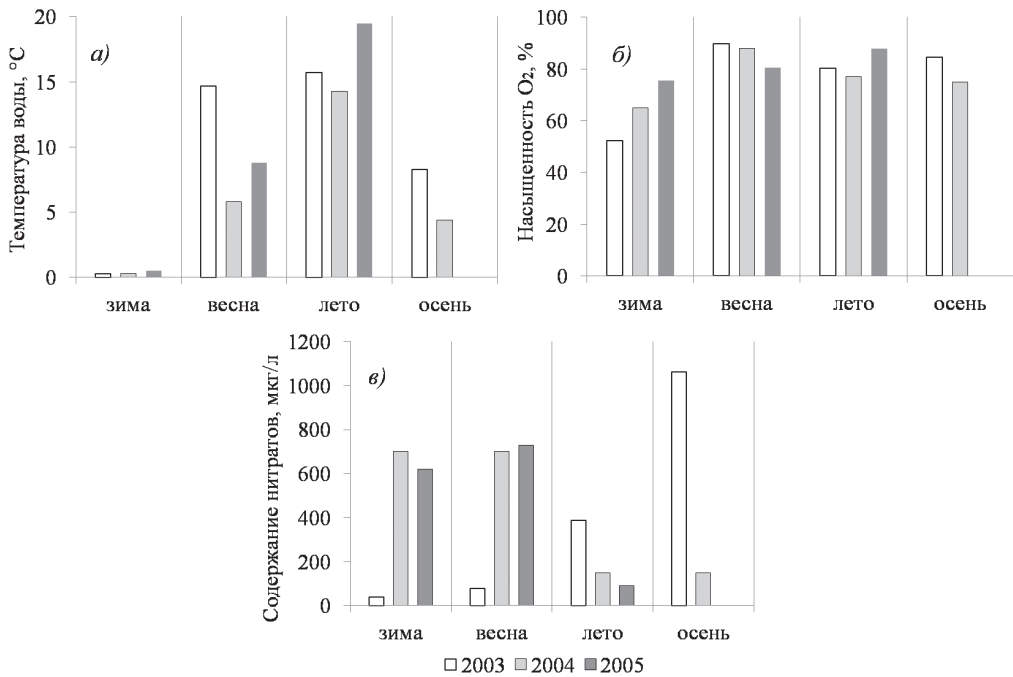


Рис. 5. Годовая изменчивость температуры поверхности воды (а), насыщенности вод кислородом (б) и содержания нитратов (в) в озере Ильмень в 2003—2005 гг.

превосходит ее. Это подтверждают данные за 2003—2005 гг., представленные на рис. 5.

Из рисунка видно, что самые существенные межгодовые различия температуры поверхности воды озера за 2003—2005 гг. наблюдались весной (см. рис. 5 а). В 2003 г. температура воды была максимальной, а содержание нитратов — минимальным по сравнению с 2004 и 2005 гг. (см. рис 5 в). Насыщенность воды кислородом в 2003 г. также превышала значения в другие рассматриваемые годы (см. рис. 5 б). Эти характеристики являются косвенными индикаторами состояния развития фитопланктонного сообщества, что подтверждают и данные за летний сезон: при максимальной температуре поверхности воды летом 2005 г. наблюдалось минимальное значение концентрации нитратов, т. е. происходило максимальное их изъятие первичными продуцентами. В то же время, насыщенность вод кислородом в 2005 г. была выше, чем в другие годы.

Характеризуя сезонность в распределении кислорода в водах озера Ильмень, А.Н. Огурцов и В.В. Дмитриев [20] отмечают, что весной в период первой вспышки развития фитопланктона его концентрация в воде увеличивается, летом и осенью уменьшается. Наши данные подтверждают увеличение насыщения вод кислородом в весенний и летний период исследуемых лет. С момента ледостава

концентрация кислорода в воде понижается и в январе — феврале достигает минимума в годовом ходе, составляя 52—76 % насыщения.

Во внутригодовой динамике концентрации нитратов в 2003, 2004 и 2005 гг. заметны существенные различия (см. рис. 5 в). Так, в 2003 г. их содержание увеличивалось от минимальных значений в феврале до максимальных в октябре. При этом в октябре концентрация нитратов была на порядок больше, чем в тот же период 2004 г. В 2004 и 2005 гг. уменьшение концентрации нитратов происходило лишь в августе (см. рис. 5 в). Весеннее развитие фитопланктона в 2003 и 2005 гг. сопровождалось незначительными сезонными изменениями рН, тогда как в 2004 г. значения этой характеристики увеличивались вплоть до осени.

Аналогичный сравнительный анализ сезонных и межгодовых изменений абиотических характеристик был выполнен по данным за 2007, 2011 и 2013 гг. (рис. 6). Если ход температуры воды в озере Ильмень в эти годы характеризовался плавным повышением от зимы к лету и затем понижением к осени (см. рис. 6 а), то в годовом ходе насыщенности вод кислородом наблюдались значительные межгодовые различия (рис. 6 б). В частности, при схожести сезонной динамики этой характеристики в 2007 и 2013 гг., в 2011 г. ее значения увеличивались вплоть до осени, достигнув максимума в октябре (113 %). Вероятно, это было следствием благоприятных условий для интенсивного развития фитопланктона, что и привело к пересыщению вод озера кислородом. В конце августа 2013 г. этот показатель также превышал 100 %.

По сезонной динамике содержания нитратов выделяется 2007 г., в то время как в 2011 и 2013 гг. она была аналогичной (см. рис. 6 в). Что касается фосфатов, то изменчивость их концентрации по сезонам также различалась: в 2011 г. не наблюдалось максимума концентрации зимой, и ее значения плавно и не очень существенно увеличивались от зимы к осени (см. рис. 6 з). Самая значительная внутригодовая изменчивость концентрации силикатов отмечается в 2007 г.: ее значение от зимнего максимума до осеннего минимума уменьшилось в 20 раз (см. рис. 6 д).

По данным за 2014 г. построен график сезонной изменчивости средних значений абиотических характеристик вод для всей акватории озера Ильмень, на которой проводились наблюдения (рис. 7). Из рисунка видно, что внутригодовая изменчивость концентрации нитратов отрицательно коррелирует с температурой воды озера. Кривая изменчивости содержания силикатов демонстрирует наличие зимнего и летнего максимумов, а также весеннего и осеннего минимумов.

Заключение

Идентифицированы основные критерии, формирующие высокую биопродуктивность озера Ильмень. К ним следует отнести наличие участков контакта вод различного генезиса, фронтальных зон типа вода — твердый субстрат (донные отложения и береговые склоны), кромки льда.

Показано, что внутригодовая и межгодовая изменчивость гидрохимических характеристик озера Ильмень является значительной. Это обусловлено множеством факторов, влияющих на формирование биопродуктивности исследуемого

водоема. Их иерархия изменяется в пространстве и во времени, поэтому выявить нечто среднее многолетнее довольно проблематично. На содержание гидрохимических компонентов, формирующих первичное органическое вещество озера, влияют следующие факторы: меняющийся год от года уровеньный режим; частое ветровое перемешивание, в результате которого происходит взмучивание вод;

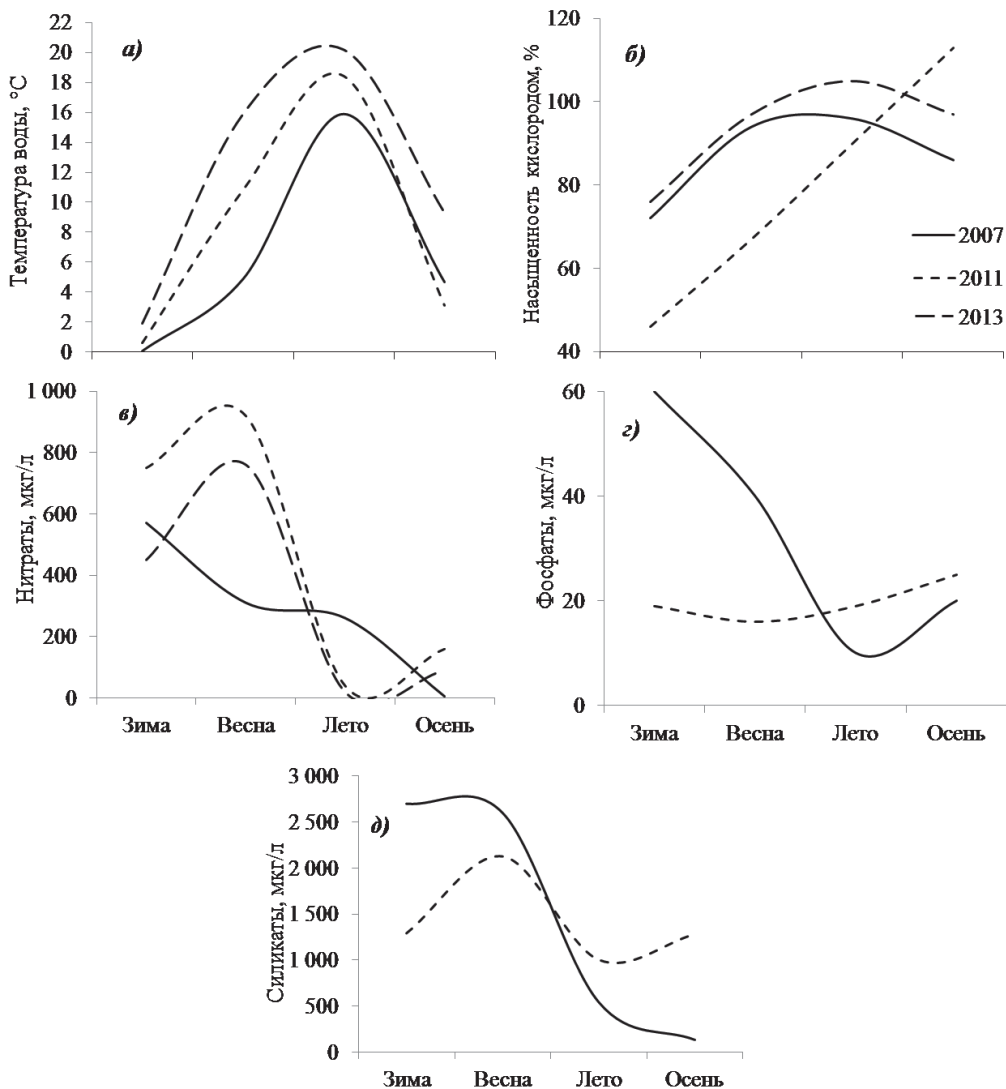


Рис. 6. Межгодовая изменчивость температуры (а), насыщенности вод кислородом (б), концентрации нитратов (в), фосфатов (г) и силикатов (д) в озере Ильмень в 2007, 2011 и в 2013 гг.

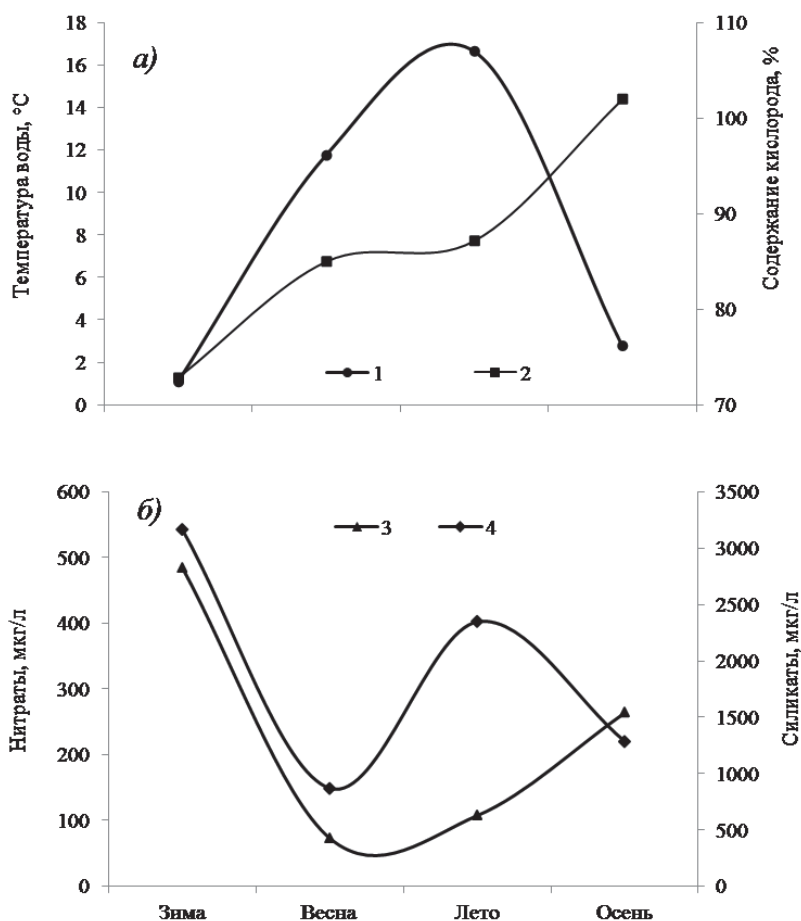


Рис. 7. Внутригодовая изменчивость распределения гидрохимических характеристик воды, осредненных по акватории озера Ильмень, в 2014 г.

а — температура воды (1) и насыщенность вод кислородом (2),
б — концентрация нитратов (3) и силикатов (4).

формирование высоких концентраций взвешенных веществ, ослабляющих проникновение в толщу воды солнечного света; неравномерная и порой пульсирующая по сезонам доступность биогенных элементов для первичных продуцентов, обусловленная их поступлением с речными водами, а также высвобождением при окислении органического вещества, что формирует неодинаковую даже в пределах вегетационного сезона интенсивность развития фитопланктона.

Список литературы

1. *Авинская Е.В.* Роль некоторых лимнологических факторов в формировании фитопланктона оз. Ильмень // Труды ГосНИОРХ. 1983. Вып. 196. Методы изучения состояния кормовой базы рыбохозяйственных водоемов. С. 108—112.
2. *Баранов И.В.* Лимнологические типы озер СССР. Л.: Гидрометеиздат, 1962. 276 с.
3. *Бондаренко Н.А.* и др. Лед — хранитель жизни // Наука из первых рук. 2004. № 1. С. 76—83.
4. *Бордонский Г.С.* и др. Ледовые сообщества Байкала // Природа. 2003. № 7. С. 22—23.
5. *Васильев В.Ю.* и др. Годовой цикл наблюдений за функционированием экосистемы озера Ильмень // Труды ГосНИОРХ. 1989. Вып. 302. Применение методов имитационного моделирования в пресноводной экологии и в рыбохозяйственных исследованиях на внутренних водоемах. С. 61—67.
6. *Вернадский В.И.* Биосфера. М.: Мысль, 1968. 374 с.
7. Гидрохимическая и гидробиологическая характеристика озер Ильмень / А.А. Матвеев, С.А. Резников, С.С. Зозуля, О.В. Якунина // Гидрохимические материалы. Т. CVIII. Формирование гидрохимического и гидробиологического режима водных объектов и вынос химических веществ реками. Л.: Гидрометеиздат, 1990. С. 124—135.
8. *Гиляров А.М.* Популяционная экология. М.: Изд-во МГУ, 1990. 188 с.
9. Годовой цикл наблюдений за функционированием экосистемы озера Ильмень / В.Ю. Васильев и др. // Труды ГосНИОРХ. 1989. Вып. 302. Применение методов имитационного моделирования в пресноводной экологии и в рыбохозяйственных исследованиях на внутренних водоемах. С. 61—67.
10. *Голованов В.К.* Температурные критерии жизнедеятельности пресноводных рыб. М.: Полиграф-плюс, 2013. 300 с.
11. *Гуман А.К.* Особенности талой воды / В кн.: Структура и роль воды в живом организме. Л., 1966. С. 179—189.
12. *Дружинин Г.В., Корткевич О.Е., Смирнова Т.С.* О связи развития зоопланктона с распределением водных масс в оз. Ильмень // Биология внутренних вод. Инф. Бюллетень. 1983. № 57. С. 15—19.
13. *Жукова Т.В.* Потоки биогенных элементов из донных отложений в воду и их роль в формировании трофического статуса Нарочанских озер // Гидробиологический журнал. 2002. Т. 38, № 4. С. 14—21.
14. Изменение лимнических экосистем под воздействием антропогенного фактора. М.: Наука, 1977. 144 с.
15. *Капустина Л.Л.* Численность бактериопланктона в оз. Ильмень и р. Волхов / В кн.: Вопросы гидрофизических, гидрохимических и гидробиологических исследований озер. Л., 1984. С. 176—187. Деп. ВИНТИ 16.01.85, № 461-85.
16. *Колосов Р.В., Бурюхаев С.П.* Физико-химическая и микробиологическая характеристика льда озера Доронинское (Забайкалье) // Вестник Бурятского государственного университета. 2013. № 3. С. 56—59.
17. *Кудерский Л.А., Румянцев В.А., Кулибаба В.В.* Изменение экологического состояния озер в связи с антропогенными влияниями. СПб: изд-во ИНОЗ РАН, 2002. 63 с.
18. *Матвеев А.А.* и др. Гидрохимическая и гидробиологическая характеристика озер Ильмень / Гидрохимические материалы. Т. CVIII. Формирование гидрохимического и гидробиологического режима водных объектов и вынос химических веществ реками. Л.: Гидрометеиздат, 1990. С. 124—135.
19. *Мицкевич О.И., Волхонская Н.И.* Оценка современного состояния зоопланктона и зообентоса озера Ильмень как кормовой базы рыб / В сб.: К 50-летию со дня основания Новгородской лаборатории ГосНИОРХ. СПб: изд-во ГосНИОРХ, 1999. С. 30—39.
20. *Огурцов А.Н., Дмитриев В.В.* Модель трансформации вещества озерной экосистемы на уровне «гидрохимический режим — кормовая база — икhtiоценоз» // Труды ГосНИОРХ. 1989. Вып. 302. С. 93—100.
21. *Россолимо Л.Л.* Очерки по географии внутренних вод СССР. М.: Учпедгиз, 1952. 304 с.
22. *Россолимо Л.Л.* Изменение лимнических экосистем под воздействием антропогенного фактора. М.: Наука, 1977. 144 с.

23. *Смирнова Л.Ф.* Гидрологический и гидрохимический режим оз. Ильмень // Изв. ГосНИОРХ. 1974. Т. 155. С. 11—19.
24. *Смирнова Л.Ф.* О некоторых особенностях зимнего гидрохимического режима оз. Ильмень // Науч.-техн. бюллетень ГосНИОРХ. 1960. Вып. 12. С. 12—16.
25. *Смирнова Л.Ф.* Ориентировочный расчет баланса биогенов, минеральных и органических веществ озера Ильмень (1971—1975) // Труды ГосНИОРХ. 1980. Вып. 155. С. 11—19.
26. *Смирнова Л.Ф.* Гидрологический и гидрохимический режим оз. Ильмень // Изв. ГосНИОРХ. 1984. Т. 86. С. 26—40.
27. *Смирнова Л.Ф., Гулин В.В.* Анализ гидролого-гидрохимического режима озера Ильмень и его влияние на состоянии запасов рыб в период с 1968 по 1976 г. // Труды ГосНИОРХ. 1980. Вып. 155. Рыболовство и регулирование промысла на водоемах Новгородской области. С. 3—11.
28. *Ташлыкова Н.А.* Состав, количественное развитие и вертикальное распределение водорослей льда озера Арахлей // Вода: химия и экология. 2012. № 9. С. 102—106.
29. *Ульянова Д.С., Суворова Л.И.* Многолетние изменения гидрохимического режима оз. Красного / В кн.: Многолетние изменения биологических сообществ мезотрофного озера в условиях климатических флуктуаций и эвтрофирования. СПб: Лемма, 2008. С. 20—34.
30. *Хендерсен-Селлерс Б., Маркленд Х.Р.* Умирающие озера, причины и контроль антропогенного эвтрофирования. Л.: Гидрометеиздат, 1990. 279 с.
31. *Шкундина Ф.Б.* Подледные и ледовые сообщества водорослей // Гидробиологический журнал. 1988. Т. 24, № 6. С. 15—18.
32. Экосистема оз. Ильмень и его поймы / Под ред. Ю.Н. Сепреева. СПб: изд-во СПбГУ, 1997. 275 с.
33. *Sullivan C.W., Cota G.F., Krempin D.W., Smith W.O.* Distribution and activity of bacterioplankton in the marginal ice zone of the Weddell-Scotia Sea during austral spring // Mar. Ecol. Progr. Ser. 1990. V. 63, № 2. P. 239—252.