

ЭКОЛОГИЯ И БИОРЕСУРСЫ

УДК [502.51:574.633](470.22)

*В.В. Дмитриев***, Н.В. Зуева**, А.С. Лубенцова*, Д.И. Валатин*,
А.В. Васякина*, А.В. Непомнящая*, И.А. Никонов*,
А.А. Осташов*, Д.О. Подшивалова*, А.Д. Прокопеня*,
Д.П. Соколова*, Ю.И. Черненко**

ЭКОЛОГИЧЕСКОЕ СОСТОЯНИЕ ВОДНЫХ ОБЪЕКТОВ КАРЕЛЬСКОГО ПРИЛАДОЖЬЯ: ТРАДИЦИОННЫЙ ВЗГЛЯД И СОВРЕМЕННЫЕ АКЦЕНТЫ

* Санкт-Петербургский государственный университет; ** Российский государственный гидрометеорологический университет; *** Санкт-Петербургский государственный университет/ Российский государственный гидрометеорологический университет, vasilii-dmitriev@rambler.ru

*V.V. Dmitriev, N.V. Zuyeva, A.S. Lubentsova, D.I. Valatin,
A.V. Vasyakina, A.V. Nepomnyaschaya, I.A. Nikonov, A.A. Ostashov,
D.O. Podshivalova, A.D. Prokopenya, D.P. Sokolova, Y.I. Chernenko*

ECOLOGICAL STATE OF KARELIAN LADOGA WATER BODIES: TRADITIONAL VIEW AND CONTEMPORARY ACCENTS

В статье рассматриваются результаты полевых исследований водоемов карельского Приладожья на основе традиционных представлений об экологическом мониторинге водоемов, в основе которого лежит покомпонентная оценка элементов режимов и с учетом современных требований к изучению водных экосистем. На примере наблюдений на оз. Суури в 2016 г. показаны современные акценты и возможности анализа пространственно-временных изменений в озере, влияния факторов среды (освещенность, содержание биогенных элементов) на продуцирование органического вещества фитопланктоном. На основе авторских подходов оценены продукционные возможности и деструкция органического вещества, трофический статус озера, качество его воды, самоочищение водоема, его устойчивость к изменению параметров естественного и антропогенного режимов; экологическое благополучие водоема. Проведенные исследования расширяют возможности экологического мониторинга водных объектов.

Ключевые слова: водная экосистема, химический, биологический состав, физические свойства воды, первичная продукция, деструкция, влияние факторов на продуцирование органического вещества, зоопланктон, бентос, самоочищение, трофность, качество воды, устойчивость, экологическое благополучие.

The results of Karelian Ladoga field studies based on traditional concepts of ecological monitoring of reservoirs are considered. Namely, a component-wise element assessment of the regimes was used. Modern requirements to the study of aquatic ecosystems were taken into account. On the example of lake Suuri observations in 2016 contemporary accents and possibilities for analyzing the spatiotemporal changes in the lake are shown. The influence of environmental factors (such as illumination and the content of biogenic elements) on the organic matter production by phytoplankton is described. Based on the author's approaches, the production capabilities and destruction of organic matter were estimated. The assessment of the lake trophic status and its water quality was held. Self-purification of the reservoir, its resistance to changes in the parameters of natural and anthropogenic regimes as well as ecological well-being of the reservoir were evaluated. The conducted researches expand possibilities of ecological monitoring of water objects.

Keywords: *aquatic ecosystem; chemical, biological composition, physical properties of water; primary production; destruction; zooplankton; benthos; self-purification; trophicity; water quality; sustainability; well-being.*

Введение

В практике экологического мониторинга состояния водоемов традиционно оцениваются химический, биологический состав и физические свойства среды обитания гидробионтов, пространственно-временная изменчивость характеристик. Поэтому зачастую можно услышать, что экологический мониторинг является компонентным мониторингом. Но содержание в водоеме живых и абиотических компонентов в определенный момент времени является результатом скрытых от непосредственных наблюдений процессов транслокации и трансформации вещества в экосистеме. Наблюдаемые биомассы и концентрации являются видимым проявлением скрытых от глаз процессов массообмена между компонентами экосистемы.

В связи со сказанным, на наш взгляд, современным акцентом в развитии экологического мониторинга является получение информации о скоростях процессов массообмена в экосистеме и влияния факторов среды и биоты на эти процессы. Эта же информация в наши дни необходима для количественной оценки различных экосистемных услуг. Для этого надо уметь оценивать потоки вещества компонентов эко- и геосистем, иметь информацию о концентрациях компонентов в определенное время и удельных скоростях обменных процессов в этих системах. При этом в оценочных исследованиях необходимо учитывать как отдельные эффекты, так и совместный эффект влияния многих факторов на скорость образования, а также разрушения, трансформации вещества. Кроме этого необходимо развивать методы оценки эмерджентных свойств сложных систем (устойчивость, экологическое благополучие и др.), характеризующих систему в целом. Эти свойства также трансформируются под антропогенным (техногенным) воздействием. Основной задачей работы, в связи со сказанным, является оценка скоростей новообразования органического вещества, влияния на них факторов среды, их изменчивость; оценка трофического состояния, качества воды и возможности биохимического самоочищения, а также некоторых интегративных свойств водной экосистемы (устойчивость, благополучие). Эти задачи реализуются на основе авторского подхода к оценке экологического состояния водоема.

В перечень ключевых водоемов вошли: малое оз. Суури (оз. Большое Волковское) и пролив Лехмалаhti Ладожского озера (рис. 1, а).

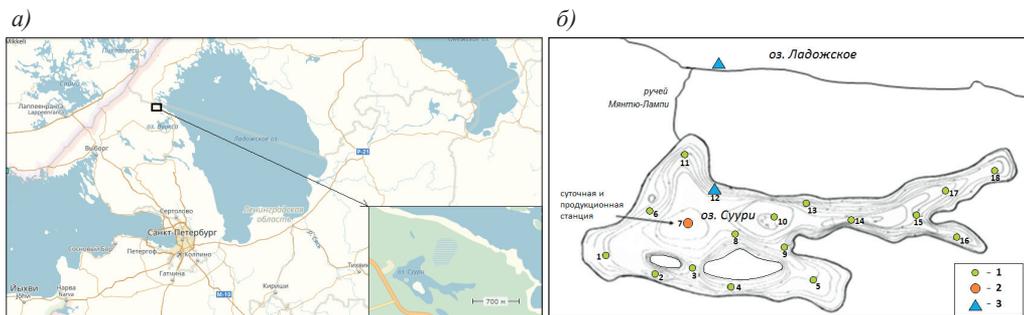


Рис. 1. Наблюдения за состоянием малых озер северо-западного Приладожья: а — район проведения исследований; б — схема расположения станций отбора проб в 2016 г., где 1 — станции наблюдения за химическим составом и гидрофизическими характеристиками воды (ст. 1–18); 2 — станция отбора проб зоопланктона, внутрисуточных и продукционных наблюдений (ст. 7); 3 — станции отбора проб макрозообентоса

Материалы и методы

Наблюдения мониторингового типа за состоянием малых озер северо-западного Приладожья в 2016 г. выполнялись в период с 18 по 27 июля. Перечень работ включал в себя: а) отбор и лабораторные исследования проб макрозообентоса из оз. Суури и пролива Лехмалахти Ладожского озера; б) отбор и лабораторные исследования проб зоопланктона на ст. 7 в центре оз. Суури (рис. 1, б); в) отбор и обработку гидрохимических проб на 18 станциях в оз. Суури в поверхностном и придонном горизонтах (съемка озера); г) продукционные исследования на ст. 7 в оз. Суури; д) исследования внутрисуточной изменчивости химического состава воды на ст. 7 (суточная станция) на горизонтах 0; 1; 2; 3; 4; 5 м через каждые 6 часов; е) выполнение физико-географического описания озера и исследования его зарастания.

Впервые в полном объеме в 2016 г. выполнен перечень исследовательских задач по методикам и моделям, разработанным авторами в целях совершенствования экологического мониторинга водоемов [5, 8, 9, 10]: 1 — оценка влияния факторов среды (биогены, освещенность) на продуктивность водной экосистемы озера; 2 — расчет количества органического вещества (ОВ), образующегося в озере за 1 сутки в слое минимальной, средней и максимальной прозрачности воды; 3 — оценка деструкции ОВ в озере в тех же слоях за 1 сутки; 4 — покомпонентная и интегральная оценки трофического статуса и качества воды в озере по гидробиологическим индексам и химическому составу воды; 5 — оценка самоочищения озера по отношению «деструкция/продукция» и времени осветления воды зоопланктоном; 6 — оценка устойчивости озера к изменению элементов естественного и антропогенного режимов (естественный режим + антропогенное эвтрофирование; естественный режим + снижение качества воды); 7 — интегральная оценка экологического благополучия водоема.

Наблюдения за гидрохимическими и гидрофизическими характеристиками. Определялись: глубина, прозрачность воды, температура, водородный показатель (рН), электропроводность воды, содержание растворенного кислорода, минерального фосфора и аммонийного азота. Пространственно-временная изменчивость химического состава и физических свойств воды оценивалась на основе данных

по суточной станции (см. рис. 1, б). Работы на станции выполнены в период с 19 по 21 июля 2016 г. Наблюдения производились каждые 6 часов начиная с 18:00 ч 19 июля по 18:00 ч 21 июля. Пробоотбор осуществлялся с горизонтов 0; 1; 2; 3; 4 и 5 м. Общая съемка озера Суури (18 станций, см. рис. 1, б) выполнена 21 июля 2016 г. Пробы отбирались на горизонтах 0 м и у дна (на глубине 0,5 м от дна).

Отбор проб и обработка гидробиологических данных. Отбор проб макрозообентоса в 2016 г. осуществлялся на двух станциях (см. рис. 1, б): в северной части оз. Суури и в проливе Лехмалахти Ладожского оз., справа от впадения ручья Мянтю-Лампи. Работы проводились в литоральной зоне водоемов, у берега на глубине 0,5 м. Отбор донных организмов производился: с площади 0,046 м² — в оз. Суури и 0,092 м² — в Ладоге, затем пробы промывались через газ № 21. Пробы не фиксировались, идентификация беспозвоночных проводилась в день отбора. Определение производилось до максимально возможного таксономического ранга.

Отбор проб зоопланктона выполнялся в оз. Суури на ст. 7 (см. рис. 1, б): были взяты интегральные пробы 0–4 м количественной сетью Джеди. Пробы фиксировались 4-процентным формалином.

На основе полученных таксономических списков и характеристик обилия организмов рассчитывался индекс видового разнообразия Шеннона, олигохетный индекс Гуднайта–Уитлея, оценивалась сапробная валентность гидробионтов. Выполнялся расчет индекса BMWP (Biological Monitoring Working Party) [17, 18]. В практике гидробиологического мониторинга в настоящее время используется три разновидности индекса BMWP: 1 — классический индекс, 2 — обновленный индекс, 3 — индекс с учетом свойств местообитания (перекат, заводь, перекат-заводь), разработанный на основе компьютерной обработки баз данных по речным местообитаниям Англии и Уэльса.

Помимо значений индекса BMWP рассчитывались значения индекса ASPT (Average Score Per Taxon). Индекс ASPT является производным от индекса BMWP и рассчитывается по следующей формуле: $ASPT = BMWP/N$, где N — число обнаруженных таксономических групп.

Определение продукции и деструкции органического вещества в озере в полевых условиях осуществлялось с помощью кислородной модификации скляночного метода [1].

Визуализация пространственно-временного изменения показателей осуществлялась с использованием пакетов программ: Surfer 9.0 — для построения изоплет характеристик; ArcGis 10.2 — создание карт их пространственного изменения.

Результаты и их обсуждение

1. Оценка изменчивости параметров гидробиологического режима оз. Суури и пролива Лехмалахти Ладожского озера. В результате обработки проб макрозообентоса оз. Суури (ст. 12) установлено, что наиболее многочисленной группой в период исследования были двустворчатые моллюски — шаровки, следующие за ним по численности личинки комаров-хирономид. Также заметен вклад в общую численность (около 10 %) у малощетинковых червей, ручейников и ракообразных. На исследованной станции Ладожского оз. доминировали ракообразные, представленные исключительно бокоплавами. Кроме того, относительно

высоко количество личинок комаров-хируномид. В целом численность донных беспозвоночных на литорали оз. Суури более чем в 3 раза выше, чем на станции Ладожского озера. Макрозообентос оз. Суури и пролива Ладожского озера представлен типичными для этих водоемов таксонами [2, 12].

Расчет олигохетного индекса Гуднайта–Уитлея продемонстрировал сходные результаты для станций оз. Суури и Ладожского оз. (табл. 1). Значения индекса менее 30 говорят об отсутствии загрязнения органическим веществом вод исследованных участков (I–II класс качества). Индекс таксономического разнообразия Шеннона (H), рассчитанный по данным о макрозообентосе, невысок для обеих акваторий. При этом его значения несколько выше, чем в 2015 г.

Таблица 1

Индексы, рассчитанные по данным о макрозообентосе исследованных водоемов

Индекс	Оз. Суури	Оз. Ладожское, пролив Лехмалахти
Гуднайта–Уитлея (2016 г.)	11,4	9,0
Шеннона (2016 г.)	2,26	1,51
Шеннона (2015 г.)	1,81	1,48

Оценка качества воды с помощью индексов BMWP и ASPT показала, что для станции в Ладожском озере, при всех модификациях индекса получен низкий IV класс качества (табл. 2). Озеро Суури охарактеризовано как имеющее удовлетворительное качество вод. Однако при использовании индекса ASPT для всех станций получена более высокая категория качества (табл. 3). Так, вода в проливе Лехмалахти относится к «удовлетворительному» — «хорошему» качеству вод, а в оз. Суури — к «хорошему» — «очень хорошему». Отметим, что в литературе рекомендовано совместное использование двух этих индексов для более реалистичной оценки качества воды [16].

Таблица 2

Оценка качества вод исследованных станций по индексу BMWP

Водный объект	Классический		Обновленный		Местообитание — заводь	
	BMPW	Качество вод	BMPW	Качество вод	BMPW	Качество вод
оз. Ладожское, пролив Лехмалахти	19,0	IV — невысокое	20,6	IV — невысокое	19,6	IV — невысокое
оз. Суури	60,0	III — удовлетворительное	58,8	III — удовлетворительное	63	III — удовлетворительное

Таблица 3

Оценка качества вод исследованных станций по индексу ASPT

Водный объект	Классический		Обновленный		Местообитание — заводь	
	ASPT	Качество вод	ASPT	Качество вод	ASPT	Качество вод
оз. Ладожское, пролив Лехмалахти	4,75	III — удовлетворительное	5,15	II — хорошее	4,90	II — хорошее
оз. Суури	5,45	I — очень хорошее	5,35	II — хорошее	5,73	I — очень хорошее

В целом значения индекса BMWP и соответствующие характеристики качества среды представляются заниженными, что может быть следствием, во-первых, недостаточного времени сбора материала и, как следствие, недоучета организмов, и во-вторых, тем, что индекс изначально разрабатывался для водотоков Европы и, видимо, слабо пригоден для биоиндикации озер Северо-Запада России. Учитываемые им таксоны в наших водоемах могут иметь другой индикаторный вес. Это указывает на необходимость разработки модификации индекса BMWP, учитывающей особенности водоемов и водотоков Ладожского бассейна.

Поскольку источники прямого антропогенного загрязнения на исследованной акватории отсутствуют, естественно заключить, что различия в разнообразии сообществ обусловлены естественными факторами.

В результате обработки проб зоопланктона оз. Суури установлено, что в выборке преобладают представители рачков *Cyclopoidae*. Численность зоопланктона составила 28 986,7 экз/м³, биомасса — 0,499 г/м³. Доля фильтраторов по численности — 18,9 %, по биомассе — 28,8 %. Среди них наиболее массовыми можно назвать такие виды, как *Sida cristallina* и *Chydorus sphaericus*. Первый вид относится к организмам олиго-β-мезосапробам, а второй — β-мезосапробам.

Итогом исследования зарастания озера макрофитами стала схема, приведенная на рис. 2. Площадь зарослей, впервые рассчитанная на основе ГИС в 2016 г., составила 90 291 м², площадь озера — 300 970 м². Таким образом, величина зарастания озера — 30 %. При сравнении схем зарастания 2014–2016 гг. (см. рис. 2) можно заключить, что в целом площадь зарастания в 2016 г. примерно соответствует предшествующему году, однако заметно перераспределение растительности в южной части озера — зоне рекреации.

2. Пространственная изменчивость гидрофизических и гидрохимических характеристик по результатам съемки оз. Суури и суточной станции.

Глубина озера. Средняя глубина озера в 2016 г. составила 3,8 м. Минимальная глубина — 2,0 м. Максимальная глубина — 5,8 м. Средняя глубина озера в 2016 г. превысила среднюю глубину в озере в 2015 г. на 52 см. При площади озера (без островов) 0,3 км² это соответствует увеличению объема воды в озере в 2016 г. примерно на 156 000 м³.

Прозрачность воды (SD). Среднее значение прозрачности воды в озере составило 1,57 м. Минимальная прозрачность — 1,4 м. Максимальная прозрачность — 1,7 м. В 2015 г. средняя SD составляла 1,55 м, минимальная SD — 1,30 м, максимальная SD — 1,85 м.

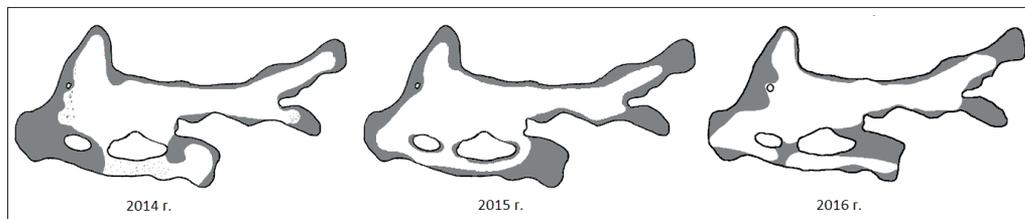


Рис. 2. Зарастание оз. Суури в июле 2014–2016 гг.

Температура воды. По данным суточных измерений было исследовано распределение температуры воды по глубине в оз. Суури (рис. 3, *а*). Из рисунка следует, что температура в ночное время суток на всех горизонтах меньше температуры в дневное время, а ее значения уменьшаются с глубиной днем и ночью практически синхронно. Максимальный внутрисуточный градиент температуры выявлен на глубинах 3–4 м. На эти глубины также приходится максимальный градиент вертикального распределения температуры. Он не сильно меняется внутри суток и составляет 3,5–4,1 °С. Градиент температуры в 5-метровой толще воды достигает 10 °С. Изоплеты температуры (рис. 3, *б*) дают наглядное представление о временной динамике прогрева толщи воды. Наиболее сильный прогрев отмечается на глубинах 0–2 м. Здесь температура на поверхности достигала 19,9 и 19,5 °С (2 м), вертикальный градиент не велик, а внутрисуточные изменения не превышают 1,8 °С (0 м) и 1 °С (2 м). На глубине 5 м температура воды изменяется внутри суток в диапазоне 9,5...10,7 °С.

По результатам съемки озера средняя температура воды 21 июля составила 18,7 °С на поверхности и 15,4 °С у дна соответственно (рис. 4, *а* — 0 м и рис. 4, *б* — дно). Вертикальное распределение температуры воды, измеренной в оз. Суури в 2015 г., показало, что верхняя трехметровая толща воды хорошо прогрета до 19,5...18,0 °С. Ниже 3 м температура резко уменьшалась до 12,8...13,0 °С (дно 4,5–5 м).

Водородный показатель (рН). По результатам измерений на суточной станции (рис. 5, *а*) установлены средние значения рН на горизонтах (табл. 4). Среднее значение в столбе воды 7,0. Минимальное значение — 6,4, максимальное значение — 7,5. По итогам съемки озера среднее значение на поверхности озера составило 7,2, у дна — 7,0 (рис. 5, *б*). Максимальные значения на поверхности достигли 7,4, на дне — 7,3. Минимальное значение рН на поверхности составило 7,0, у дна — 6,6.

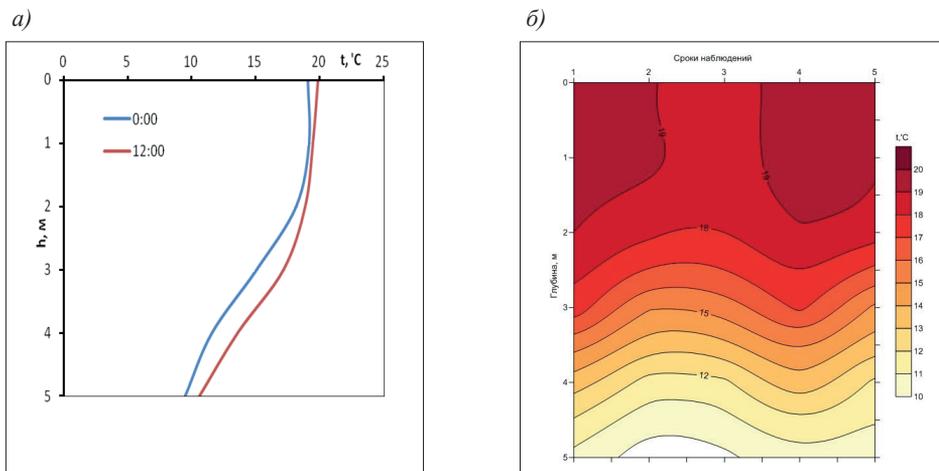


Рис. 3. Температура воды на суточной станции:
а — вертикальное распределение температуры воды; *б* — изоплеты температуры воды

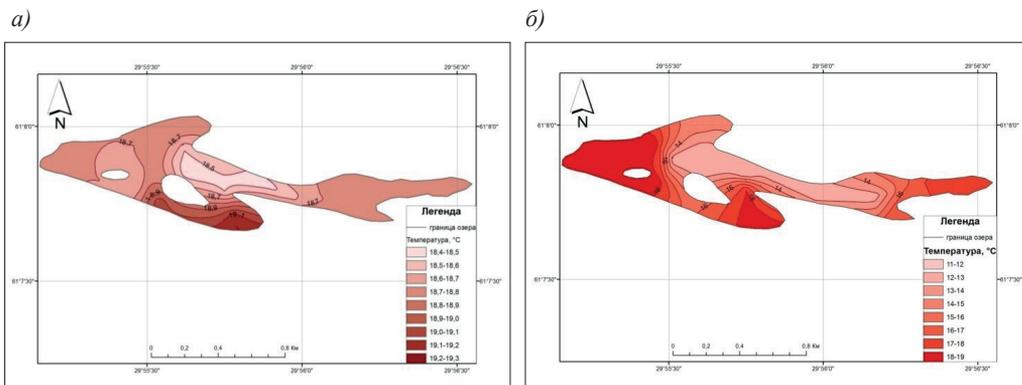


Рис. 4. Температура воды: а — на поверхности озера; б — у дна

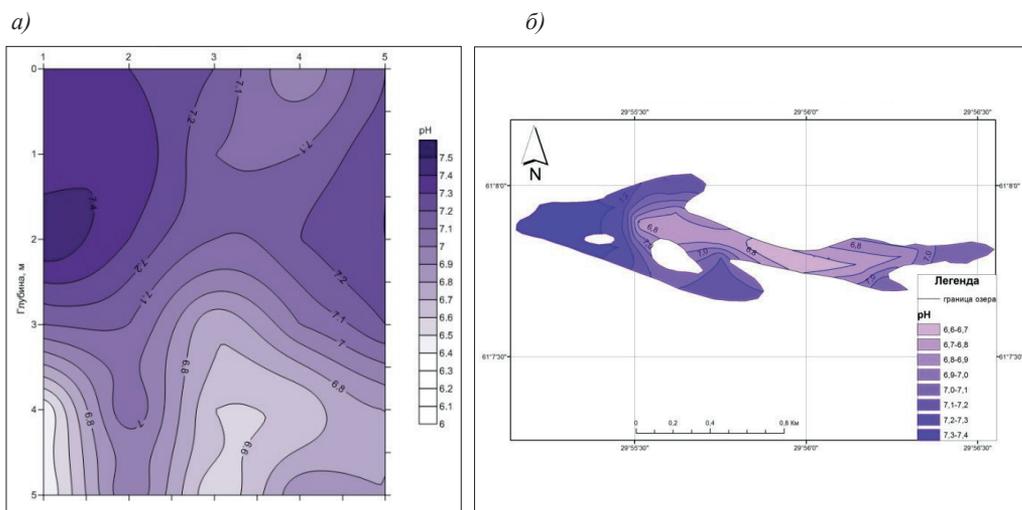


Рис. 5. Изоплеты рН: а — на суточной станции; б — у дна озера

Среднесуточные значения характеристик на горизонтах в 2016 г. (оз. Суури, ст. 7) Таблица 4

Характеристика	Горизонт, м					
	0	1	2	3	4	5
рН	7,2	7,2	7,3	7,0	6,7	6,7
O ₂ , мг/л	7,8	7,5	7,2	5,4	2,1	2,0
O ₂ , %	87	81	78	58	21	16
Электропроводность, мкСм/см	77,1	75,0	76,0	76,2	77,0	78,6
P-PO ₄ , мг/л	0,006	0,006	0,008	0,009	0,010	0,012
N-NH ₄ , мг/л	0,167	0,206	0,192	0,193	0,238	0,254

Растворенный кислород. Анализ содержания в воде кислорода на суточной станции (рис. 6) позволил определить средние значения O_2 на разных горизонтах (см. табл. 4). Минимальный процент насыщения воды 10 %, или 1,1 мг/л (12:00), у дна, максимальный — на поверхности воды 91 % в 18:00. Среднее содержание O_2 в столбе воды — 5,3 мг/л. Среднее насыщение воды кислородом в столбе воды — 56,9 %. По данным суточных измерений видно, что содержание кислорода в воде слабо уменьшается до глубины 2 м, а глубже снижается более интенсивно. В ночное время суток процент насыщения воды кислородом меньше, чем днем, но и расходование кислорода протекает не так активно. Из рис. 6 и 7 видно, что у поверхности содержание растворенного в воде кислорода примерно в 8 раз больше, чем в придонном слое.

Электропроводность воды. Среднее значение электропроводности в столбе воды — 76,6 мкСм/см, средние значения по горизонтам представлены в табл. 4.

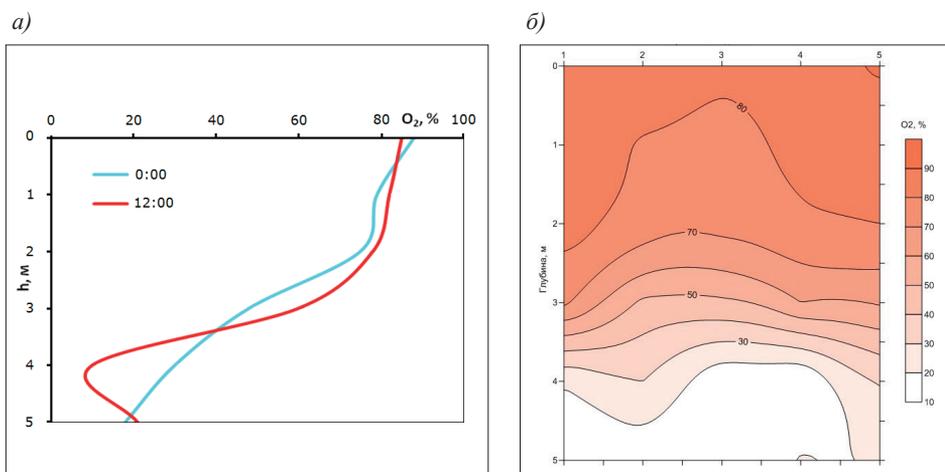


Рис. 6. Распределение кислорода (% насыщения) на суточной станции:
 а — вертикальное; б — изоплеты кислорода (%)

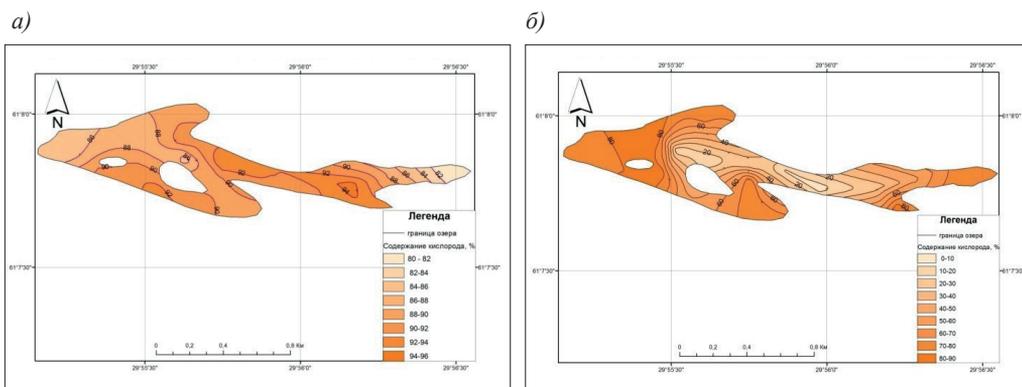


Рис. 7. Насыщение воды кислородом в %: а — на поверхности озера; б — у дна озера

Изменение электропроводности воды на суточной станции приведено на рис. 8. Минимальное значение — 73,8, максимальное — 83 мкСм/см. По итогам съемки озера среднее значение на поверхности озера составило 75,4, у дна — 76,4 мкСм/см. Максимальные значения на поверхности достигли 77,4 мкСм/см, у дна — 84,6 мкСм/см. Минимальная электропроводность на поверхности и у дна водоема имеет одинаковое значение — 73,8 мкСм/см.

Содержание фосфатов. Содержание $P-PO_4$ в столбе воды на суточной станции представлено на рис. 9, а. Среднее значение составило 0,009 мг/л, средние значения по горизонтам представлены в табл. 4. Минимальное значение — 0,004; максимальное значение — 0,02 мг/л (12:00). По итогам съемки озера средняя концентрация минерального фосфора у поверхности водоема составила 0,009, у дна — 0,010 мг/л. По данным внутрисуточных измерений на станции 7 было построено распределение $P-PO_4$ в воде (в мг/л) по глубине в оз. Суури (рис. 9, б). На графике приведены кривые, построенные по измерениям 20 июля 2016 г. в 0:00 и в 12:00 ч. Из анализа результатов выявлено накопление $P-PO_4$ ночью, в то время как днем он интенсивно расходуется на создание первичной продукции в верхней толще воды. С глубиной, как правило, отмечается накопление фосфатов.

Содержание аммонийного азота. Содержание $N-NH_4$ в столбе воды на суточной станции представлено на рис. 10, а. Среднее значение $N-NH_4$ в столбе воды составило 0,208 мг/л, средние значения по горизонтам представлены в табл. 4. Минимальное значение — 0,056, максимальное значение — 0,363 мг/л. По итогам съемки озера среднее значение $N-NH_4$ на горизонте 0 м составило 0,165, у дна — 0,193 мг/л. По данным внутрисуточных измерений на станции № 7 было построено распределение $N-NH_4$ (мг/л) по глубине в оз. Суури (рис. 10, б). На графике приведены кривые, построенные по измерениям в 0:00 и в 12:00 ч. 20.07.16. Из анализа результатов выявлено накопление $N-NH_4$ ночью, в то время как днем он

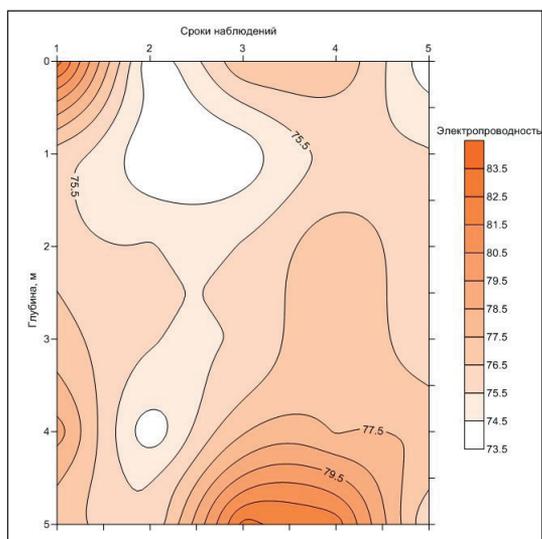


Рис. 8. Изоплеты электропроводности воды (мкСм/см)

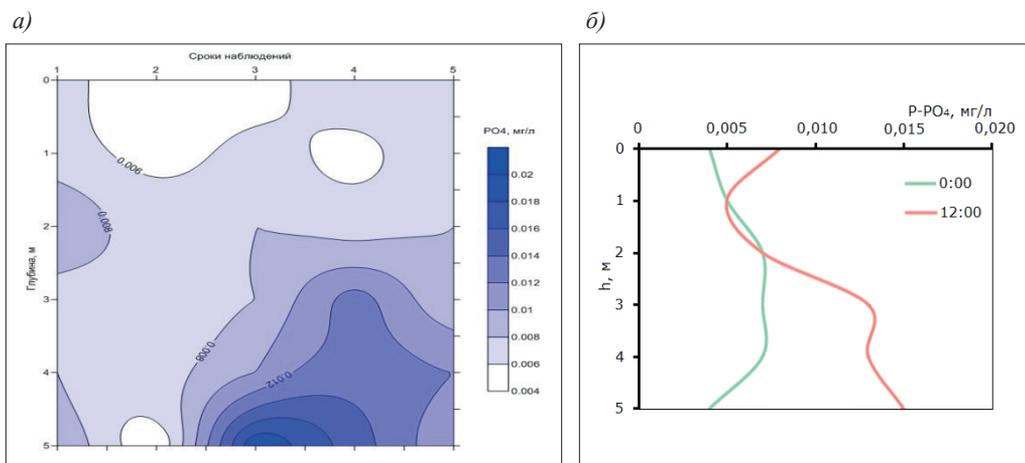


Рис. 9. Распределение P-PO₄ на суточной станции:
 а — изоплеты P-PO₄ (мг/л); б — вертикальное распределение

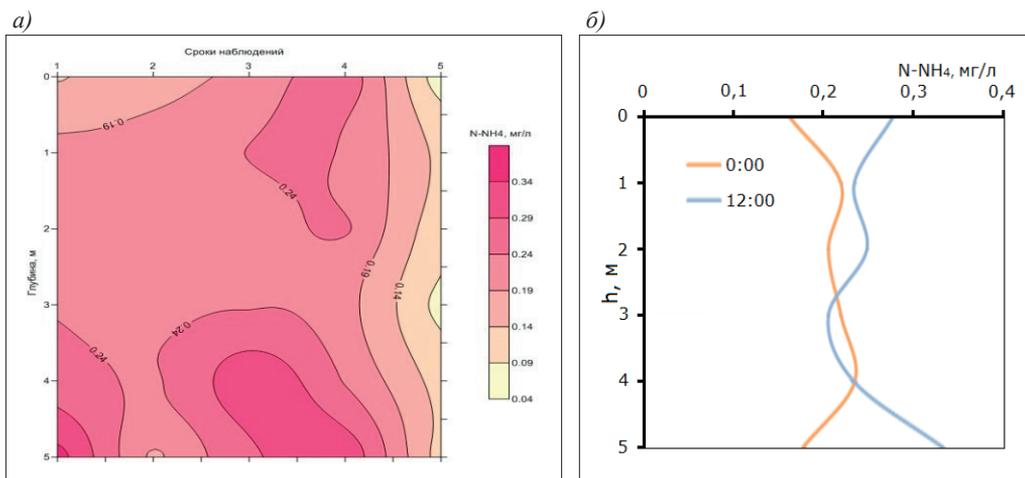


Рис. 10. Содержание N-NH₄: а — изоплеты аммонийного азота (мг N-NH₄/л);
 б — вертикальное распределение аммонийного азота на суточной станции

интенсивно расходуется на создание первичной продукции в верхней толще воды. С глубиной, как правило, отмечается накопление фосфатов. На глубинах 3 и 4 метра содержание аммонийного азота одинаково для 0:00 и 12:00 ч.

3. Оценка трофического статуса оз. Суури. Трофический статус водоемов устанавливается, как правило, по 3–5-летним рядам наблюдений по среднегодовым данным или данным за вегетационный период.

В 2016 г. рекогносцировочные значения трофности выполнялись на основе покомпонентного оценивания по 11 параметрам и оценочным шкалам, обобщенным в [2, 4, 5, 7, 13]. По этим данным озеро было отнесено к олиготрофным

водоемам по 6 критериям, к классу мезотрофных — по 4, к классу эвтрофных — по 2 критериям.

Для уточнения вывода об отнесении озера к определенному классу трофности выполнялась интегральная оценка трофности по методу сводных показателей (МСП) за 2014–2016 гг. [4, 5]. Расчеты интегрального показателя трофности, выполненные для трех последних лет по совокупности параметров, позволили оценить трофический статус озера средней величиной сводного показателя 0,29 при ширине интервала класса мезотрофных вод от 0,14 до 0,34. Таким образом, трофический статус озера был оценен как мезотрофный.

4. Оценка качества воды и загрязнения водоема. В 2016 г. качество воды озера Суури оценивалось по 10 критериям. По критерию «прозрачность» воды (1,58) озеро относится к II классу «чистые», разряду «очень чистые» по классификации Оксийок и Жукинский (1993) [13]. По классификациям В.Д. Романенко (1990) [15] и института охраны природы и заповедного дела Минэкологии РФ (1992) [14] по данному критерию водоем также относится к II классу «чистые». По критерию «электропроводность воды» для непроточных водоемов по [14] вода относится к I классу качества во всей толще.

По содержанию фосфатов (0,009 мг/л для поверхностных вод, 0,010 мг/л для придонных слоев) воды озера относятся к классу I «предельно чистые» по [15].

По содержанию аммонийного азота (значение 0,165 мг/л для поверхностных вод, 0,193 мг/л для придонных слоев) поверхностные и придонные слои озера относятся к II классу «чистые» по классификации А.А. Былинкиной и С.М. Драчёва [3, 11] и к II классу «чистые», разряд 2б «вполне чистые» по классификации Оксийок, Жукинский (1993) [13].

По содержанию растворенного кислорода в % насыщения (89 %) поверхностные воды озера относятся к III классу «удовлетворительной чистоты», к разряду «слабо загрязненные», в то же время придонные слои озера классифицируются по этому показателю (52 %), как воды IV класса «загрязненные», и относятся к разряду «сильно загрязненные» по [13]. Согласно [3, 11], верхние слои воды можно оценить как «чистые», придонные — как «грязные».

По критерию «рН» воду можно отнести к I классу «предельно чистые», значение рН = 7,1 [13]. По [15] воды относятся ко II классу «чистые», к разряду «очень чистые». Поверхностные слои (с 0 по 2 м глубины) относятся также ко II классу качества «чистые» (рН = 7,2), к разряду «очень чистые». Придонные слои (с 3-метровой глубины и ниже) относятся к I классу «предельно чистые», к разряду «предельно чистые» (рН = 7,0).

По критерию «БПК₃» в верхнем слое воды (2,5 мг О₂/л) водоем относится к IV классу качества воды «загрязненная» [3]. В нижнем слое воды БПК = 1,3 мг О₂/л, водоем относится к III классу качества «удовлетворительной чистоты».

По значениям индекса BMWP для станции в Ладожском озере, при всех модификациях индекса, получен низкий IV класс — «невысокое качество». Озеро Суури охарактеризовано, как имеющее III класс — «удовлетворительное качество» вод. Однако при использовании индекса ASPT в разных модификациях для обеих станций получена более высокая категория качества: для ладожских вод —

«удовлетворительное» – «хорошее» (III–II), для оз. Суури — «хорошее» – «очень хорошее» качество (II–I).

Олигохетный индекс Гуднайта–Уитлея для станций обоих водоемов позволяет говорить об отсутствии загрязнения органическим веществом вод исследованных участков (I–II класс качества). Приведенные выше данные и данные прошлых лет указывают на неопределенность результатов многокритериальной оценки качества воды. Для устранения данной неопределенности выполнялась интегральная оценка качества воды на основе МСП по 6 основным критериям: прозрачность воды; удельная электропроводность воды (мкСм/см), азот NH_4 (мг/л), кислород в % насыщения, гидробиологический индекс BMWP, фосфор PO_4 (мг/л). Результаты интегральной оценки для горизонта 0 м показали, что по совокупности критериев поверхностная вода озера относится к середине или правой границе II класса качества.

5. Оценка продукционных возможностей экосистемы оз. Суури. Оценка количества органического вещества, образующегося в оз. Суури за одни сутки в слое, равном средней глубине прозрачности в озере за период продукционных наблюдений на ст. 7, выполнялся по формуле:

$$C = k A_{\text{инт}} S \cdot 10^3,$$

где: C — количество органического вещества, образующегося за одни сутки в слое, равном средней глубине прозрачности в озере за период выполнения продукционных наблюдений (кгСсут.^{-1}); k — коэффициент для перевода мг O_2 в мг C , принят равным 0,375; S — площадь озера без учета островов в км^2 (принята 0,285 км^2); $A_{\text{инт}}$ — средняя интенсивность фотосинтеза на верхнем горизонте по данным продукционных наблюдений на суточной станции (ст. 7).

Интенсивность фотосинтеза на глубине прозрачности воды рассчитана по формуле:

$$A_{\text{инт}} = A_{\text{опт}} \text{Sec},$$

где Sec — средняя прозрачность воды в озере за период проведения продукционных наблюдений на ст.7 (принята 1,57 м); $A_{\text{опт}}$ — интенсивность фотосинтеза, принята по средней величине валовой продукции фитопланктона ($P_{\text{вал}}$) на верхнем горизонте по данным продукционных наблюдений на суточной станции.

Значение $P_{\text{вал}}$ (0,55 $\text{мгO}_2/\text{л}\cdot\text{сут.}$) принято как среднее для четырех наблюдений на верхнем горизонте в период с 19 по 23 июля, выполненных с 2-кратной повторностью. По этим исходным данным было получено, что за одни сутки в слое, равном средней глубине прозрачности в оз. Суури, образуется 92,3 кг C .

Расчет деструкции органического вещества (D) выполнялся по формуле:

$$D = k D \text{Sec} S \cdot 10^3,$$

где D — количество органического вещества, подвергшееся деструкции в оз. Суури за одни сутки в слое, равном средней глубине прозрачности в озере за период выполнения продукционных наблюдений (кгСсут.^{-1}); D — деструкция органического вещества на верхнем горизонте по данным продукционных наблюдений на суточной станции (ст. 7). Значение D (1,13 $\text{мгO}_2/\text{л}\cdot\text{сут.}$) принято как среднее для четырех наблюдений на верхнем горизонте в период с 19 по 23 июля, выполненных

с 2-кратной повторностью. В расчетах определено, что за одни сутки в оз. Суури подверглось деструкции 189,6 кг С.

6. Оценка степени самоочищения водной экосистемы по отношению деструкции к первичной продукции и по времени осветления воды зоопланктоном. По первому способу оценивалось отношение $D:P_{\text{вал}}$ и делался вывод о способности водной экосистемы к самоочищению [1]. Если это отношение больше 1, то система способна к самоочищению и справляется с нагрузками на нее; если меньше 1, то система в большей степени продуцирует ОВ, чем может разложить. Отношение $D:P_{\text{вал}}$ изменяется в течение суток, по глубине и по сезонам года. Значения $D:P_{\text{вал}}$ в период работы на озере в большинстве случаев оказались больше единицы, что свидетельствует о том, что в это время процессы деструкции органического вещества превышали его новообразование. Используя данные, приведенные выше, получим, что в 2016 г. $D:P_{\text{вал}}$ для верхнего горизонта наблюдений равно 2,05; для 2015 г. $D/P_{\text{вал}} = 1,18$. Сравнение данных 2016 и 2015 гг. позволило сделать вывод о том, что увеличение уровня воды озера в 2016 г. на 0,5 м снизило продукционную способность озерной экосистемы в период наблюдений примерно в 2 раза. Деструкция органического вещества снизилась в 1,1 раза. Экосистема приобрела черты олиготрофного водоема. Ее самоочищающая способность возросла в 1,7 раза. Таким образом, изменение уровня воды повлияло на продукционную способность экосистемы и незначительно изменило деструкцию органического вещества в ней.

Второй способ оценки самоочищения водной экосистемы основан на расчете времени осветления воды зоопланктерами-фильтраторами. В расчетах принимались два допущения: а) зоопланктеры находятся в оптимальных условиях питания и равномерно распределены в озере; б) большинство организмов зоопланктона составляют фильтраторы.

По [5] скорость фильтрации воды зоопланктоном в оптимальных условиях питания (f_z) для средней температуры воды в озере 21.07.16 (18,7 °С) составила:

$$f_z = 0,25 \cdot \exp [0,1 (18,7 - 20)] = 0,220 \text{ л/(мг сыр. веса \cdot сут.)}$$

Так же вычислены скорости фильтрации воды зоопланктоном в оптимальных условиях питания для минимальной и максимальной температуры воды в озере на поверхности 21.07.16 (min — 18,4 °С; max — 19,2 °С). Для минимальной температуры $f_z = 0,213$ л/(мг сыр. веса \cdot сут.), для максимальной температуры $f_z = 0,231$ л/(мг сыр. веса \cdot сут.).

Биомасса фильтраторов в составе зоопланктона в 2016 г. в оз. Суури составила 0,499 мг сыр. в/л. Фильтрационная активность для данной биомассы составила: $0,499 \cdot 0,213 = 0,106 \text{ сут.}^{-1}$ — для минимальной температуры; $0,110 \text{ сут.}^{-1}$ — для средней температуры; $0,115 \text{ сут.}^{-1}$ — для максимальной температуры воды. Основываясь на этих данных, рассчитано время осветления воды. Оно составило 8,7 суток для максимальной температуры воды; 9,1 суток — для средней и 9,4 суток — для минимальной.

7. Оценка лимитации биогенами продуцирования органического вещества фитопланктоном. По модели Михаэлиса–Ментен–Моно [5, 9] выполнена оценка лимитации биогенными веществами продуцирования органического вещества

фитопланктоном в оз. Суури. Оценка лимитации биогенами первичной продукции в озере выполнялась на основе наблюдений за содержанием аммонийного азота и минерального фосфора. По данным, полученным в 2016 г., уменьшение максимально возможной интенсивности продуцирования органического вещества фитопланктоном снижалось из-за недостатка в воде фосфора в 2,7–3,2 раза и вследствие недостатка азота — в 1,2 раза.

Во все предшествующие годы наблюдений основным биогеном, лимитирующим первичную продукцию в озере летом, являлся фосфор.

8. Оценка влияния освещенности на рост первичных продуцентов в водной экосистеме оз. Суури. Влияние освещенности на максимальную удельную скорость роста фитопланктона оценивалось по формуле Дж. Стила [19]:

$$f(I) = I/I_{\text{опт}} \exp(1 - I/I_{\text{опт}}).$$

Среднеинтегральная освещенность в слое (I) рассчитывалась по [5]:

$$I = \{I_0 k k_{\text{л}} [1 - \exp(-\gamma H)]\} / \gamma H,$$

где $I_{\text{опт}}$ — оптимальная освещенность, задаваемая константой или с учетом характеристики области светового насыщения Дж. Толлинга ($I_{\text{опт}} = eI_k$, где $e = 2,718$). Суммарная за сутки освещенность, поступающая на поверхность водоема I_0 , рассчитывалась по эмпирической формуле, учитывающей широту и долготу места; номера суток от начала года, облачность, продолжительность светового дня на конкретную дату. Толщина слоя воды H принималась как средняя глубина прозрачности по всем продукционным станциям; k — коэффициент экстинкции ($k = 0,5$); параметр I_k — толлинговская характеристика области светового насыщения задавался по доминирующему таксону фитопланктона, $k_{\text{л}}$ — коэффициент влияния льда ($k_{\text{л}} = 1,0$).

В расчетах для 2016 г. заданы: $H_{\text{мин}} = 1,35$ м, $H_{\text{макс}} = 2,30$ м; параметр $I_k = 4,16$ МДж/м²сут. (для диатомовых водорослей). Расчет выполнялся по формуле ИНОЗ РАН: $\gamma = a + (b/S)$, где γ — показатель ослабления света взвесью; $a = 0,275$; $b = 1,03$; S — прозрачность воды (прозрачность по всем продукционным срокам в т. 7). В этом случае при $H_{\text{мин}}$ параметр $\gamma = 1,038$ м⁻¹, а при $H_{\text{макс}}$ $\gamma = 0,723$ м⁻¹.

По результатам вычисления получено, что параметр $1/f(I_{\text{макс}})$ находится в интервале от 1,81 до 1,93. Таким образом, эффект самозатенения вызвал снижение максимальной удельной скорости продуцирования органического вещества фитопланктоном в озере в 1,8–1,9 раза.

9. Оценка устойчивости озерной экосистемы к изменению параметров естественного и антропогенного режимов. Оценка выполнялась по балльно-индексному методу [4–7]. Расчет был реализован для двух типов устойчивости: 1 — устойчивость к изменению параметров естественного режима и изменению продуктивности системы (антропогенному эвтрофированию); 2 — устойчивость к изменению параметров естественного режима и изменения качества воды [5–9].

Для первого варианта необходимо к баллам устойчивости к изменению параметров естественного режима прибавить баллы трофности. Для второго варианта к баллам устойчивости к изменению параметров естественного режима необходимо прибавить баллы качества воды. В первом случае предварительно необходимо установить трофность водоема, во втором случае — качество воды.

Для первого варианта: $15 + 5$ (мезотрофия) = 20 баллов. Этой сумме баллов соответствует IIIc (середина III класса устойчивости). В 2016 г. в оз. Суури были выявлены признаки олиготрофии, поэтому трофический статус можно было оценить как олигомезотрофный (8 баллов). В этом случае сумма баллов равна $15 + 8 = 23$ (IIIп — правая граница III класса или граница III–IV кл.).

Для второго варианта при оценке устойчивости по качеству воды использовались 2 подхода — по биологическим индексам и по гидрохимическим показателям.

Первый подход — по биологическим индексам:

1 — баллы качества поверхностных вод (оценено II классом качества), что соответствует 8 баллам устойчивости: $15 + 8 = 23$ (III–IV граница);

2 — баллы качества придонных вод (оценено II–III классами качества), что соответствует 6 баллам устойчивости: $15 + 6 = 21$ (III класс).

Второй подход — по гидрохимическим показателям:

1 — баллы качества поверхностных вод (оценено III классом качества), что соответствует 5 баллам устойчивости: $15 + 5 = 20$ (III класс);

2 — баллы качества придонных вод (оценено IV классом качества), что соответствует 3 баллам устойчивости: $15 + 3 = 18$ (III л).

В целом в верхних слоях вода по биологическим показателям отнесена к II классу качества. В этом случае оз. Суури отнесено к границе III–IV классов, или к левой границе III класса устойчивости. Вода в верхних слоях по гидрохимическим показателям отнесена к III классу качества. В этом случае оз. Суури отнесено к III классу устойчивости. Придонные слои воды в озере загрязнены сильнее, их качество по биологическим показателям можно оценить II–III классами, в этом случае озеро может быть отнесено к III классу устойчивости. Вода в придонных слоях по гидрохимическим показателям отнесена к IV классу, в этом случае озеро может быть отнесено к левой границе III класса устойчивости.

Таким образом, был получен вывод о том, что придонные слои воды более устойчивы к изменению параметров естественного режима и загрязнению, чем верхние. Это не должно восприниматься, как подтверждение благополучной экологической ситуации (обстановки) в придонных слоях озера или как повышение экологического благополучия водоема в целом. Также был сделан вывод о том, что оз. Суури более уязвимо к изменению параметров естественного режима и качества воды, чем к изменению параметров естественного режима и эвтрофикации.

10. Оценка экологического благополучия водоема. На основе аксиологического подхода сформулировано представление об экологическом благополучии водоема [5, 8, 10]. Выбраны признаки для оценки экологического благополучия: 1) способность продуцировать органическое вещество (оптимальной первичной продукцией считается продукция, создаваемая водными экосистемами определенного класса трофности, например олиго-мезотрофными или мезотрофными; трофический статус выявляется на основе интегрального подхода); 2) высокое качество воды (используются гидрохимический и гидробиологический подходы для интегральной оценки качества воды); 3) высокое видовое разнообразие биоты (оценивается по индексу Шеннона по зоопланктону и зообентосу); 4) высокая

устойчивость к изменению параметров естественного и антропогенного режимов (оценивается на основе балльно-индексного подхода, или интегрального подхода); 5) низкая скорость ацидификации (по pH); 6) высокая скорость самоочищения (оценивается по D/P -отношению и по времени осветления воды зоопланктоном). Если система способна сохранять вышеназванные признаки длительное время, то она признается благополучной. На основе признаков экологического благополучия (ЭБ) формулируется модель-классификация ЭБ, которая представляет собой таблицу, столбцами которой являются классы ЭБ, а строками — оценочные шкалы, сформированные для репрезентативных критериев ЭБ [5, 8, 10].

По результатам расчетов интегрального показателя (ИПЭБ) по разным вариантам модели [8, 10] значения ИПЭБ в период с 2010 по 2016 г. попадают в правую границу II-го класса ЭБ водоема (ЭБ «выше среднего») или в левую границу III класса (среднее ЭБ). Сделан вывод о том, что экосистема озера способна сохранять высокий класс благополучия длительное время.

Заключение

На основе сочетания традиционного подхода и авторских разработок, нацеленных на определение скоростей процессов массообмена и влияющих на них факторов, выполнена оценка экологического состояния водоемов северо-западного Приладожья по результатам наблюдений мониторингового типа летом 2016 г. Макрозообентос и зоопланктон исследованных станций оз. Суури и пролива Лехмалаhti Ладожского озера представлен типичными для этих водоемов таксонами. Показано, что массовые планктонные организмы — это обитатели относительно чистых вод (олиго- β -мезосапробы и β -мезосапробы). Разнообразии донных организмов невысокое, индекс Шеннона составил 2,56 для оз. Суури и 1,51 в проливе Лехмалаhti.

Индекс BMWP в трех модификациях, рассчитанный на основе данных о макрозообентосе, для станции Ладожского озера показал IV класс — «невысокое качество» вод. Озеро Суури охарактеризовано как имеющее III класс — «удовлетворительное качество» вод. По индексу ASPT в разных модификациях ладожские воды отнесены к классам III–II «удовлетворительное» – «хорошее» качество, воды оз. Суури — к II–I классам «хорошее» – «очень хорошее» качество. Олигохетный индекс Гуднайта–Уитлея для всех станций позволяет говорить об отсутствии загрязнения органическим веществом вод исследованных участков (I–II класс качества).

Трофический статус озера оценен как мезотрофный с признаками олиготрофии. Расчеты интегрального показателя трофности, выполненные для трех последних лет по совокупности параметров, позволили оценить трофический статус озера средней величиной сводного показателя 0,29 при ширине интервала класса мезотрофных вод от 0,14 до 0,34.

В 2016 г. качество воды оз. Суури оценивалось по 10 критериям. По 4 критериям вода отнесена к I классу качества, по 2 — к II, по 3 — к III, по 1 — к IV классу. Интегральная оценка качества воды по 10 критериям с учетом их равновесности показала, что по величине интегрального показателя (0,22) озеро относится к II классу качества при ширине интервала класса 0,19–0,29.

Оценка самоочищения верхней толщи воды показала, что значение $D:P_{\text{вал}}$ во всех случаях больше единицы, что свидетельствует о том, что процессы деструкции органического вещества превышали его новообразование в толще воды «0 м — глубина прозрачности». Сравнение данных 2016 и 2015 гг. позволило сделать вывод о том, что увеличение уровня озера в 2016 г. на 0,5 м снизило продукционную способность озерной экосистемы в период наблюдений примерно в 2 раза. Деструкция органического вещества снизилась в 1,1 раза. Экосистема приобрела черты олиготрофного водоема, ее самоочищающая способность по отношению $D:P_{\text{вал}}$ возросла в 1,7 раза. Время осветления воды зоопланктоном в июле составило 8,7–9,4 суток.

Основным биогеном, лимитирующим первичную продукцию в озере, как и в прошлые годы, являлся фосфор. По данным, полученным в 2016 г., уменьшение максимально возможной интенсивности продуцирования органического вещества фитопланктоном снижалось из-за недостатка в воде фосфора в 2,7–3,2 раза и вследствие недостатка азота — в 1,2 раза.

Устойчивость оз. Суури к изменению параметров естественного режима и трофического состояния водоема на основе балльно-индексного подхода оценена IIIc (середина III класса устойчивости) или к IIIп (правая граница III класса).

Озеро Суури отнесено к границе III–IV классов или к левой границе III класса устойчивости к изменению естественного режима и качества воды по биологическим показателям. Оценка устойчивости верхней и нижней толщи воды показала, что верхняя толща воды оз. Суури отнесена к III классу устойчивости к изменению естественного режима и качества воды. Придонные слои воды в озере загрязнены сильнее, их качество по биологическим показателям можно оценить II–III классами, в этом случае озеро также может быть отнесено к III классу устойчивости. Вода в придонных слоях по гидрохимическим показателям отнесена к IV классу, в этом случае озеро может быть отнесено к левой границе III класса устойчивости. Было признано, что оз. Суури более уязвимо к изменению параметров естественного режима и качества воды (в поверхностном слое), чем к изменению параметров естественного режима и эвтрофированию.

Интегральная оценка экологического благополучия оз. Суури показала, что для 2010–2016 гг. экологическое благополучие озера оценено II-м классом (выше среднего). При этом значения интегрального показателя ЭБ незначительно изменялись внутри II-го класса (правая граница) или попадали в левую границу III класса. Сделан вывод о том, что экосистема озера способна сохранять высокий класс ЭБ достаточно длительное время.

Исследования выполнялись при поддержке грантом РФФИ 16-05-00715-а.

Литература

1. Абакумов В.А. Руководство по гидробиологическому мониторингу пресноводных экосистем. — СПб.: Гидрометеониздат, 1992. — 318 с.
2. Барбаилова М.А., Курашов Е.А. Макрофауна литоральной зоны Ладожского озера // Литоральная зона Ладожского озера; под ред. Е.А. Курашова — СПб.: Нестор-История, 2011. — С. 219–251.
3. Былинкина А.А., Драчев С.М., Ицкова А.И. О приемах графического изображения аналитических данных о состоянии водоема // Мат. 16-го совещания Гидрохим. ин-та АН СССР. — Новочеркасск: АН СССР, 1962. — С. 8–18.

4. Гальцова В.В., Дмитриев В.В. Практикум по водной экологии и мониторингу состояния водных систем: учеб. пос. — СПб.: Наука, 2007. — 364 с.
5. Дмитриев В.В. Эколого-географическая оценка состояния внутренних водоемов: дис. ... д-ра геогр. наук. — СПб., 2000. — 419 с.
6. Оценка экологического состояния малых озер карельского Приладожья / В.В. Дмитриев, С.Н. Бурцев, О.Н. Мандрыка и др. // Межд. жур. прикл. и фундамент. иссл. 2016. № 8–4. — С. 647–655.
7. Дмитриев В.В., Панов В.Е., Пряхина Г.В. Методические указания по учебно-производственной практике «Экологическое состояние водных объектов»: учеб.-метод. пос. — СПб.: ВВМ, 2010. — 116 с.
8. Дмитриев В.В. Развитие методологии интегральной оценки экологического благополучия водного объекта // Речной сток: пространственно-временная изменчивость и опасные гидрологические явления: Сб. тр. 3 конф. Научно-образоват. центра. 13 ноября 2014 г. Москва, Россия. — М., 2014. — С. 112–131.
9. Дмитриев В.В., Бурцев С.Н., Мандрыка О.Н. и др. Оценка экологического состояния малых озер Карельского Приладожья // Межд. жур. прикл. и фундамент. иссл. 2016. № 8–4. — С. 647–655.
10. Дмитриев В.В., Федорова И.В., Бирюкова А.С. Подходы к интегральной оценке и ГИС- картографированию устойчивости и экологического благополучия геосистем. Часть IV: Интегральная оценка экологического благополучия наземных и водных геосистем // Вестник СПбГУ. Сер. 7. 2016. Вып. 2. — С. 37–53.
11. Драчев С.М. Борьба с загрязнением рек, озер и водохранилищ промышленными и бытовыми стоками. — М.; Л.: Наука, 1964. — 271 с.
12. Зуев Ю.А., Зуева Н.В. Опыт исследования макрозообентоса каменистой литорали Ладожского озера // Учен. зап. РГГМУ. 2013. № 30. — С. 134–147.
13. Оксюк О.П., Жукинский В.Н., Брагинский Л.П. и др. Комплексная экологическая классификация качества поверхностных вод суши // Гидробиологический журнал. 1993. Т. 29. Вып. 4. — С. 62–76.
14. Оценка состояния и устойчивости экосистем. — М.: Изд-во Института охраны природы и запovedного дела, 1992. — 128 с.
15. Экологическая оценка воздействия гидротехнического строительства на водные объекты / В.Д. Романенко, О.П. Оксюк, В.Н. Жукинский и др. / отв. ред. Ю.П. Зайцев. — Киев: Наукова думка, 1990. — 256 с.
16. Семенченко В.П. Принципы и системы биоиндикации текучих вод. — Минск: Орех, 2004. — 125 с.
17. Leeds-Harrison P.B., Quinton J.N., Walker M.J. et al. Buffer Zones in headwater catchments // Report on MAFF/English Nature Buffer Zone Project CSA 2285. Cranfield University, Silsoe, UK, 1996. — 22 p.
18. Wright J.F., Furse M.T., Armitage P.D. RIVPACS – a technique for evaluating the biological quality of rivers in the UK // European Water Pollution Control. 1993. Vol. 3 (4). — P. 15–25.
19. Steele T.H. Environmental control of photosynthesis in the sea // Limnol. and Oceanogr. 1962. Vol. 7. № 2. — P. 98–117.