

УДК 504.54

ОЦЕНКА ЭКОЛОГИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ МАЛЫХ ОЗЕР КАРЕЛЬСКОГО ПРИЛАДОЖЬЯ

^{1,2}Дмитриев В.В., ¹Бурцев С.Н., ²Мандрыка О.Н., ¹Ефимова А.Ю., ¹Кузьменко Г.Ю.,
¹Лаптев А.С., ¹Нестерова Н.В., ¹Соловьев В.А., ¹Тимченко Д.С., ¹Шадрина А.А.

¹Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург;

²Российский государственный гидрометеорологический университет, Санкт-Петербург,
e-mail: vasily-dmitriev@rambler.ru

Выполнена оценка экологического состояния малого озера Суури и других водоемов по результатам летних наблюдений мониторингового типа в 2015 г. Результаты сравниваются с ретроспективными данными. Выявлено постепенное снижение индекса Шеннона от года к году в исследуемых водоемах. Трофический статус озера оценен как мезотрофный. Качество воды соответствует II-III классам (поверхностные воды) и IV классу (придонные воды). Индекс BMWP в Ладоге и оз.Суури изменялся в пределах 19-27 (в оз. Суури BMWP = 21; в проливе Лехмалахти 19-27), что позволило отнести придонную воду в водоемах к IV-V классам качества («невысокое» – «очень плохое»). Значение D:P_{нал} во всех случаях больше единицы, что свидетельствует о том, что процессы деструкции органического вещества превышали новообразование (продуцирование) органического вещества в толще воды «0 м – глубина прозрачности». Время осветления воды зоопланктоном в июле составляло 7-13 суток. Оценка лимитации биогенами первичного продуцирования органического вещества в озере, выполненная за последние 6 лет показала, что недостаток фосфора уменьшает максимальную удельную скорость роста фитопланктона в среднем в 4,9 раза, а недостаток азота – в 1,3 раза. Эффект самозатенения в верхней 2-метровой толще воды вызывает снижение удельной скорости продуцирования органического вещества фитопланктоном в 1,25 раза. Оценка устойчивости оз. Суури к изменению параметров естественного режима и эвтрофированию указывает, что водоем относится к III классу устойчивости. Оценка устойчивости к изменению естественного режима и качества воды показала, что озеро отнесено к III классу устойчивости (в отдельные годы к IV), кроме придонного слоя (левая граница III класса или правая граница II класса). Было признано, что озеро Суури более уязвимо к изменению параметров естественного режима и качества воды (в поверхностном слое), чем к изменению параметров естественного режима и эвтрофированию. Разработаны признаки экологически благополучной водной экосистемы, для которой сформулированы модели-классификации экологического благополучия. Выполнена интегральная оценка экологического благополучия оз.Суури. Для 2010-2014 гг. экологическое благополучие озера оценено II-м классом (выше среднего). В целом ИПЭБ изменялся в интервале 0,346-0,406, это позволило сделать вывод о том, что экосистема озера способна сохранять высокий класс благополучия сравнительно длительное время.

Ключевые слова: малое озеро, экологическое состояние, трофический статус, качество воды, самоочищение, устойчивость, экологическое благополучие, интегральная оценка

ENVIRONMENTAL ASSESSMENT OF THE STATE OF SMALL LAKES KARELIAN LADOGA

^{1,2}Dmitriev V.V., ¹Burtsev S.N., ²Mandryka O.N., ¹Efimova A.Y., ¹Kuzmenko G.Y.,
¹Laptev A.S., ¹Nesterova N.V., ¹Solovov V.A., ¹Timchenko D.S., ¹Shadrina A.A.

¹Sankt-Petersburg State University, St. Petersburg;

²Russian State Hydrometeorological University, Saint-Petersburg, e-mail: vasily-dmitriev@rambler.ru

The evaluation of the ecological state of the small lake Suuri and other water bodies as a result of monitoring the type of year observations in 2015. The results are compared with historical data. Revealed a gradual decline in the Shannon index from year to year in the studied reservoirs. The trophic status of lakes assessed as mesotrophic. water quality complies with class II-III and class IV. BMWP Index Ladoga and oz.Suuri varied between 19-27 (in oz.Suuri BMWP = 21; in the Strait Lehmalahhti 19-27), which made it possible to carry the bottom water in the reservoirs to the IV-V grade quality («low» – «very bad»). Value D:P_{нал} in all cases is greater than one, which indicates that the processes of organic matter degradation exceeded neoplasm (production) of organic matter in the water column, «0 m – the depth of transparency.» Water clarification Time zooplankton in July was 7-13 days. Evaluation delimitation nutrients primary production of organic matter in the lake, made over the past 6 years has shown that a lack of phosphorus reduces the maximum specific growth rate of phytoplankton, on average, 4.9 times, and the lack of nitrogen – 1.3 times. Self-shadowing effect of the top 2-meter water column causes a reduction of the specific rate of production of organic matter by phytoplankton 1.25 times. Assessment of the stability of the lake. Suuri to a change in the natural regime and eutrophication parameters indicates that the reservoir belongs to III class stability. Evaluation of resistance to change in the natural regime and water quality showed that the lake is classified as class III stability (in some years to IV of), except for the bottom layer (the left boundary of class III or right border of the class II). It was recognized that the lake Suuri more vulnerable to changes in the parameters of the natural regime and water quality (surface layer), than to change the parameters of the natural regime and eutrophication. Developed signs of environmentally safe water ecosystem, for which formulated the model-classification of ecological well-being. Made integrated assessment of ecological well-being oz.Suuri. For 2010-2014, environmental well-being of the lake priced II-m class (above average). In general, environmental well-being varied in the range of 0,346-0,406., it is possible to conclude that the lake ecosystem is able to maintain a high class well-being relatively long period of time.

Keywords: small lake, ecological condition, trophic status, the water quality, self-cleaning, sustainability, environmental health, integrated assessment

Системные исследования состояния малых озер, выполняемые ежегодно в ключевых районах России, все еще редки в прак-

тике мониторинга водных объектов. В этих наблюдениях оцениваются: химический и биологический состав, физические свой-

ства воды, а также сложные (неаддитивные, эмерджентные) свойства водной экосистемы в целом (устойчивость, целостность, экологическая напряженность, экологическое благополучие и др.). К таким исследованиям можно отнести исследования, выполняемые в период летних экспедиционных работ студентами, аспирантами и преподавателями СПбГУ в северо-западном Приладожье с конца 1980-х гг по настоящее время [1-9]. В перечень ключевых водоемов вошли: малое оз. Суури (оз. Большое Волковское), озера в районе п. Кузнечное, пролив Лехмалахти Ладожского озера.

Материалы и методы исследования

Летние исследования состояния малых озер карельского Приладожья традиционно выполняются в последнюю декаду июля. В 2015 г. они выполнялись в период с 22 по 31 июля. Перечень полевых работ включал в себя: 1 – отбор и подготовку к лабораторным исследованиям проб бентоса из оз. Суури и зал. Лехмалахти Ладожского озера; 2 – отбор и подготовку к лабораторным исследованиям проб зоопланктона на ст.7 в центре оз. Суури; 3 – отбор гидрохимических проб на 18 станциях в оз.Суури в поверхностном, придонном горизонтах и горизонте прозрачности (съемка озера); 4 – отбор проб на продукционные исследования в оз. Суури на ст. 7 на пяти продукционных станциях; 5 – выполнение исследования внутрисуточной изменчивости химического состава воды на ст.7 (суточная станция) на горизонтах: 0; 1; 2; 3; 4; 5 м через каждые 6 часов; 6 – выполнение физико-географического описания озера и исследование степени и динамики его зарастания.

Перечень лабораторных работ включал в себя: обработку проб зоопланктона и зообентоса; обработку гидрохимических проб; выполнение наблюдений за гидрофизическими и гидрохимическими характеристиками воды (температура, прозрачность, минерализация воды, электропроводность, содержание кислорода, аммонийного азота и фосфатного фосфора).

Перечень исследовательских задач включал в себя оценку влияния факторов среды (биогены, освещенность) на продуктивность озера; расчет количества органического вещества, образующегося в озере за 1 сутки в слое средней прозрачности воды и оценку деструкции ОВ в озере в том же слое за 1 сутки; покомпонентную и интегральную оценку трофического статуса и качества воды озера по гидробиологическим индексам и химическому составу воды; оценку самоочищения озера по отношению «деструкция»/«продукция» и времени осветления воды зоопланктоном; оценку устойчивости озера к изменению элементов естественного и антропогенного режимов; интегральную оценку экологического благополучия водоема.

Результаты исследования и их обсуждение

1. Оценка изменчивости параметров гидробиологического режима оз.Суури и пролива Лехмалахти Ладожского озера. По данным о видовом составе зообентоса и частоте встречаемости гидробионтов

рассчитывались: численность и биомасса зоопланктона, численность организмов бентоса, индекс видового разнообразия Шеннона, индекс качества воды BMWP. В июле 2015 г. в оз. Суури численность зоопланктона составила 17170 экз/м². По численности преобладали ветвистоусые (*Cladocera*) – 15610 экз/м² (91%), в которых большинство составили *Bosmina longirostris* – 1248 экз/м². Отношение «молоди + ювенильный зоопланктон» к взрослым особям 8:2. Далее следуют *Diaphanosoma brachyurum* – 3122 экз/м² и веслоногие (*Copepoda*) – *Cyclops lacustris* *Rotifera* – 1020 экз/м² (6%) и *Asplanohna sp.* – 520 экз/м² (3%). *Nauplii Copepoda* составили 20 экз/м². Суммарная биомасса зоопланктона составила 336 мг сыр. веса/м³. Биомасса фильтраторов составила 275 мг сыр. веса/м³. Биомасса хищников – 55 мг сыр.веса/м³.

Наблюдения за зообентосом в 2015 г. выполнялись в 2 точках оз.Суури (к северу от ст. 7) и в 2 пробах зал. Лехмалахти (справа от впадения ручья Мянтью-Лампи). В оз.Суури пробы отбирались драгой с глубины 3 м. В проливе работали с берега до глубины 0,5-1 м. Определения проводились по «живым» пробам. Для проб бентоса рассчитывались гидробиологические индексы Шеннона ($\dot{H}$) и BMWP. Обнаружено 8 таксонов организмов. Численность организмов в пробе S2 составила 158 экз/м³. Преобладали двукрылые *Diptera g.sp.* (90 экз/м³), *Chironomidae* (34 + 16) экз/м³. Кольчатые черви (*Aclosoma sp.*) – 11 экз/м³. Остальные таксоны – 1-4 экз/м³.

В Ладожском оз. в 2015 г. бентос определялся рамкой и смывом с камня. Численность бентоса составила 400-900 экз/м². Преобладали брюхоногие *Diptera* (200-350 экз/м²); амфиподы, ручейники, олигохеты семейства *Tubificidae* (144-150 экз/м²) и амфиподы *Gammarus sp.* (128 экз/м²).

Расчет индекса Шеннона ($\dot{H}$) в 2015 г. показал, что в оз.Суури $\dot{H} = 1,81$, в проливе Лехмалахти $\dot{H} = 1,48$. Привлечение к анализу материалов прошлых лет позволило выявить постепенное снижение индекса Шеннона от года к году в исследуемых водоемах. Анализ данных показал, что относительно низкие значения индекса Шеннона в Ладожском озере может также отражать преобладание в воде *Amphipoda* – *Gmelinoides fasciatus*, внесенного человеком в озера Карельского перешейка в начале 1970-х гг. Биологическое загрязнение воды в озерах коснулось и Ладожского озера, в некоторых прибрежных районах которого рачок доминирует и сегодня. В меньшей степени это относится к оз.Суури, и ручью Мянтью-Лампи, соединяющему оз. Суури с Ладожским озером.

Индекс BMWP (Biological Monitoring Working Party) был разработан Департаментом Окружающей среды Великобритании в 1976 г. в рамках системы биологической оценки качества воды RIVACS, которая является основой для оценки состояния текущих вод в Великобритании и Австралии. Данный индекс активно используется в странах ЕС и Восточной Европы. 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 основании компьютерной обработки баз данных по речным местообитаниям Англии и Уэльса [13]. По нашим данным индекс BMWP в Ладоге и оз. Суури в 2015 г. изменялся в пределах 19-27 (в оз. Суури BMWP = 21; в проливе Лехмалахти 19-27), что позволило отнести воду к IV-V классам качества («невысокое» – «очень плохое»). Однако, в процессе анализа результатов, был сделан вывод о том, что значения индекса BMWP и соответствующие характеристики качества воды представляются заниженными, поскольку в Ладоге и оз. Суури обитают организмы, не учитываемые индексом, а учитываемые им могут в российских водоемах иметь другой индикаторный вес. Изначально индекс разрабатывался для водотоков Европы, и, на наш взгляд, слабо пригоден для биоиндикации озер. Это обуславливает необходимость модификации индекса BMWP, для учета особенностей водоемов и водотоков Ладожского бассейна, а также выполнения дополнительных исследований качества воды.

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

По результатам промера глубин во время выполнения съемки оз. Суури 27 июля 2015 г. средняя глубина озера составила 3,28 м, минимальная глубина – 1,5 м, максимальная глубина – 5,00 м наблюдалась в центре озера.

Температура воды. Вертикальное распределение температуры воды, измеренной в оз. Суури опрокидывающимся термометром в 2015 г., показало, что верхняя трехметровая толща воды летом хорошо прогрета до 19,5-18 °С. Ниже 3 м температура резко уменьшалась до 12,8-13 °С (дно 4,5-5 м). В 2014 г. [9] средняя температура в столбе воды в это же время составила 20,9 °С. Минимальная температура 13,1 °С, максимальная 27,9 °С. За все годы выполнения наблюдений на оз. Суури это была мак-

симальная наблюдаемая температура воды в озере.

Кислотная реакция воды. pH воды на поверхности составил 7,9-6,7, у дна – 7,1-6,9. У берега в Ладожском озере – 7,1 ед. pH. В 2014 г. среднее значение pH в столбе воды составило 7,4 ед. pH. Минимальное значение pH равнялось 6,8, максимальное 8,1 ед. pH [8].

Прозрачность воды (SD). В 2015 г. прозрачность воды на суточной станции 26-27 июля измерялась диском Секи в светлое время суток в сроки наблюдений с 12.00 (26.07) через 6 часов до 12.00 (27.07). По результатам съемки озера 27.07 средняя прозрачность составила 1,55 м. Минимальная прозрачность – 1,30 м. Максимальная прозрачность 1,85 м. В 2014 г. средняя прозрачность на суточной станции 23-24.07 составила 1,76 м (минимум 1,48 м, максимум 1,80 м).

Кислород. Анализ содержания в воде кислорода на суточной станции показал, что средние значения O_2 по горизонтам составили: 7,5; 6,4; 6,02; 5,08; 2,92; 1,38 мг/л соответственно или в процентах насыщения: 81; 69; 67; 66; 49; 8%. Минимальный процент насыщения воды 4% или 0,4 мг/л (06.00), максимальный – на поверхности воды 91% в 12.00. Среднее содержание O_2 в столбе воды 5,2 мг/л. Среднее насыщение воды кислородом в столбе воды 52,3%. По результатам съемки оз. Суури среднее значение концентрации кислорода на поверхности составило 6,9 мг/л (76%), у дна 3,7 мг/л (43%). Максимум концентрации на поверхности составил 7,4 (81%), у дна – 6,4 мг/л (71%). Минимум – 6,3 мг/л (72%) и 0,4 мг/л (3%) соответственно. В 2014 г. [9] содержание кислорода в поверхностном слое озера изменялось от 6,3 мг/л до 7,4 мг/л; на дне – от 0,4 мг/л до 6,4 мг/л. Насыщение воды кислородом на поверхности изменялось от 72% до 81%; в придонном горизонте – от 3% до 71%. Содержание и насыщение воды кислородом, как и в 2015 г., сильно уменьшались с глубиной.

Электропроводность воды. В 2015 г. по результатам суточной станции среднее значение электропроводности по горизонтам составило: 72,0; 72,4; 73,4; 74,2; 77,0; 78,5 мкСм/см соответственно. Среднее значение в столбе воды 74,6 мкСм/см. Минимальное значение 70,2 мкСм/см, максимальное значение 79,2 мкСм/см. По итогам съемки озера среднее значение на поверхности озера составило 71,1 мкСм/см, у дна 72 мкСм/см. Максимальные значения на поверхности достигли 75,6 мкСм/см, на дне 77,4 мкСм/см. Минимальная электропроводность на поверхности и на дне водоема имеет одинаковое значение 66,6 мкСм/см. В 2014 г. [9]

средние значения электропроводности на поверхности озера составили 58,7 мкСм/см, в придонном горизонте – 61,1 мкСм/см. Значения электропроводности увеличивались с глубиной и понижались к берегам на всех горизонтах.

Содержание фосфатов. В 2015 г. по результатам суточной станции среднее значение $P-PO_4$ на горизонтах составило: 0,001; 0,001; 0,002; 0,006; 0,001; 0,001 мг Р/л соответственно. Минимальное значение 0,000; максимальное значение 0,005 мг Р/л (12,00). В 2014 г [9] содержание фосфатов на поверхности озера Суури не превышало 0,01 мг $P-PO_4$ /л. Среднее значение в столбе воды 0,006 мг Р/л, на поверхности воды 0,005 мг $P-PO_4$ /л. Содержание фосфатов в придонном слое не превышало 0,007 мг $P-PO_4$ /л, среднее значение – 0,006 мг $P-PO_4$ /л. Был сделан вывод о незначительном увеличении содержания фосфатов с глубиной.

Содержание аммонийного азота. В 2015 г по результатам суточной станции среднее значение $N-NH_4$ на горизонтах составило: 0,022; 0,054; 0,055; 0,044; 0,095; 0,051 мг N/л. Среднее значение в столбе воды 0,050 мг N/л. Минимальное значение 0,007; максимальное значение 0,139 мг N/л. По итогам съемки озера среднее значение азота NH_4 на горизонте 0 м составило 0,034, у дна 0,058 мг N/л. В 2015 г отмечено сравнительно низкое содержание аммонийного азота во всей толще воды. В 2014 г [9] среднее содержание аммонийного азота в воде на поверхности составляло 0,062 мгN- NH_4 /л, среднее значение 0,75 мгN- NH_4 /л. В оз.Суури в 2014 г. наблюдалось превышение ПДК по аммонийному азоту в 2 раза. На поверхности озера среднее значение азота NH_4 составило 0,051 мг N- NH_4 /л. На дне озера среднее значение концентрации аммонийного азота составляло 0,064 мг N- NH_4 /л. В пространственном распределении отмечено увеличение содержания аммонийного азота от берегов к центру.

3. Оценка трофического статуса оз. Суури. Трофический статус водоемов устанавливается, как правило, по 3-5 летним рядам наблюдений. В 2015 г. для покомпонентной оценки трофности нами использовались 10 критериев, оцениваемых по 16 шкалам из, более чем, 50 шкал, обобщенных в работах [5,10]. По 5 признакам (8 шкалам) озеро Суури было отнесено к мезотрофному типу. По 3 признакам (3 шкалам) – к олиготрофному типу, по 3 признакам (5 шкалам) – к эвтрофному типу. В 2014 г. для оценки трофности использовались 7 критериев, 14 оценочных шкал [5,9,10]. По 3 призна-

кам (7 шкалам) озеро Суури было отнесено к мезотрофному типу. По 1 признаку (1 шкале) – к олиготрофному типу, по 2 признакам (4 шкалам) – к эвтрофному типу. В 2013 г для оценки трофности использовались 12 критериев, 18 оценочных шкал [9]. По 6 признакам (7 шкалам) озеро Суури было отнесено к мезотрофному типу. По 3 признакам (3 шкалам) – к олиготрофному типу, по 3 признакам (8 шкалам) – к эвтрофному типу.

Таким образом, как это часто случается, многокритериальность привела к несопоставимости полученных результатов. Для уточнения вывода об отнесении озера к определенному классу трофности выполнялась интегральная оценка трофности по методу сводных показателей (МСП) [5]. Расчеты интегрального показателя трофности, выполненные для ряда последних лет по совокупности параметров, позволили оценить трофический статус озера средней величиной сводного показателя 0,294 при ширине интервала класса мезотрофных вод от 0,135 до 0,343. Таким образом, трофический статус озера был оценен как мезотрофный (середина класса – правая граница класса).

4. Оценка качества воды и загрязнения водоема. В 2015 г. качество воды озера Суури оценивалось по шести гидрофизическим, гидрохимическим, гидробиологическим критериям. По критерию «прозрачность» воды (1,55 м) озеро относится ко II классу «чистые», разряду «очень чистые» – «чистые» по трем классификациям качества воды [11,12].

По содержанию фосфатов (менее 0,01 мг/л для поверхностных вод, в придонных слоях отсутствует) воды относятся к I классу «предельно чистые» [11]. По содержанию аммонийного азота (значение 0,03 мг/л для поверхностных вод, 0,05 мг/л для придонных слоёв) поверхностные и придонные слои озера классифицируются как воды I класса «очень чистые» [11, 12]. По содержанию растворённого кислорода в процентах насыщения (76%) поверхностные воды озера относятся к III классу «удовлетворительной чистоты», к разряду «слабо загрязненная», в то же время придонные слои озера классифицируются по этому показателю (43%) как воды IV класса «загрязненные» («умеренно-загрязненные») и относятся к разряду «сильно загрязнённые» («грязные») [11]. По критерию «БПК₅» в верхнем слое воды (2,05) водоем относится к III классу качества воды «удовлетворительно чистые», в нижнем слое воды (2,1) – к III классу качества «удовлетворительно чистые».

По гидробиологическому индексу BMWP (обновленный) воды относятся к IV классу (21,1), с учетом места обитания (17,4) также к IV классу. Индекс Шеннона не использовался в оценке качества воды, т.к. определение таксономических единиц не являлось полным, кроме того, индекс Шеннона не является репрезентативным критерием оценки качества воды [5, 11]. Сравнение оценок качества воды с результатами 2014 г [9] показало, что по двум критериям (фосфаты и БПК₅) качество воды улучшилось на один класс, по двум (прозрачность, аммонийный азот) осталось неизменным, по двум (содержание кислорода на поверхности и дне озера, BMWP) – ухудшилось.

Интегральная оценка качества воды, выполненная на основе МСП по 6 основным критериям: прозрачность воды; удельная электропроводность воды (мк См/см), азот NH₄ (мгN/л), кислород в % насыщения, гидробиологический индекс BMWP, фосфор PO₄ (мгP/л) для 2010-2013 гг. (горизонт 0 м) показала, что во все годы по совокупности критериев поверхностная вода озера относится к середине или правой границе II класса качества. По средней величине сводного показателя качества за все годы 0,239 качество воды может быть отнесено к середине II класса, ширина интервала II класса: 0,114-0,379.

5. Оценка продукционных возможностей экосистемы оз.Суури. В полевых условиях на озере для определения продукции и деструкции органического вещества применялась кислородная модификация скляночного метода [1]. Расчет продукции органического вещества ($P_{вал}$), образующегося в оз.Суури, имеющем площадь 0,285 км², в толще средней глубины прозрачности 1,47 м по средней наблюдаемой величине $P_{вал} = 0,78$ мг O₂/л*сут показал, что в озере образуется 129,22 кг C сут⁻¹. Расчет деструкции органического вещества (D) в слое средней прозрачности с использованием средней величины D , показал, что в озере подвергается деструкции 245,17 кг C сут⁻¹. В расчетах нами использовалась величина $P_{вал}$, поскольку расчет чистой продукции, выполненный для продукционных наблюдений с 24 по 28.07.2015 на ст. 7 показал, что в эти дни чистая продукция часто получалась отрицательной (валовая продукция практически полностью расходовалась на траты на обмен).

6. Оценка степени самоочищения водной экосистемы по отношению деструкции к первичной продукции и по времени осветления воды зоопланктоном. По первому способу оценивалось отношение

$D/P_{вал}$ и делался вывод о способности водной экосистемы к самоочищению. 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 $D:P_{вал}$ изменяется в течение суток и по сезонам года. Значения $D:P_{вал}$, в подавляющем большинстве случаев оказались больше единицы, что свидетельствует о том, что в период выполнения съемки озера в центральной его части процессы деструкции органического вещества превышали новообразование (продуцирование) органического вещества. За период наблюдений $D = 1,48$ мг O₂/л*сут; $D/P_{вал} = 2,46$. Таким образом, по результатам исследований 2015 года было установлено, что в центре озера (ст. 7) в слое прозрачности воды деструкция органического вещества превышает продукцию в среднем в 2,46 раза. Также выявлено, что в ходе работ была замечена тенденция к постепенному снижению $D/P_{вал}$ от 24.07 к 28.07, что, вероятно, связано с изменением погодных условий. В 2014 г. продукционные исследования показали, что в центре озера (ст. 7) среднее значение $P_{вал} = 0,84$ мг O₂/л*сут; $D = 2,14$ мг O₂/л*сут; $D/P_{вал} = 2,92$. В прибрежном районе (ст. 12) среднее значение $P_{вал} = 0,94$ мг O₂/л*сут; $D = 1,19$ мг O₂/л*сут; $D/P_{вал} = 1,27$.

Второй способ оценки самоочищения водной экосистемы основан на расчете времени осветления воды зоопланктонами-фильтраторами. В расчетах принимались два допущения: зоопланктеры находятся в оптимальных условиях питания и равномерно распределены в озере; большинство организмов зоопланктона составляют фильтраторы. Предварительными наблюдениями было показано, что в составе зоопланктона по численности преобладали организмы-фильтраторы. В 2015 г. скорость фильтрации воды зоопланктоном в оптимальных условиях питания для средней температуры воды на поверхности озера 27.07.15 (20,6 °C), с учётом трофического состояния озера Суури, составила 0,266 л / (мг сыр. веса*сут). Биомасса фильтраторов в оз.Суури в 2015 г. составила 0,275 мг сыр. в /л, таким образом, фильтрационная активность определена величиной 0,073 сут⁻¹. Время осветления воды зоопланктоном есть величина обратная фильтрационной активности. Основываясь на этих данных, рассчитано время осветления воды. Оно составило $1/0,073 = 13,7$ суток.

В 2014 г. скорость фильтрации воды зоопланктоном в оптимальных условиях питания для средней температуры воды на

поверхности озера 23.07.14 (20,9 °C), с учётом трофического состояния озера составляла 0,274 л/(мг сыр.веса*сут). Фильтрационная активность с учетом рассчитанной 25.07.2014 биомассы зоопланктона-фильтраторов (0,749 мг/л) в озере составила 0,205 сут⁻¹. Время осветления воды зоопланктоном: $1/0,205 = 4,87$ сут. Таким образом, зоопланктоны-фильтраторы осветляли водоем в июле 2014 г. за 4,87 суток. За последние 5 лет время осветления воды зоопланктоном составило в среднем 7,14 сут.

7. Оценка лимитации биогенами продуцирования органического вещества фитопланктоном. По модели Михаэлиса – Ментен – Моно [5] 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. В 2015 г. оценка лимитации первичной продукции азотом и фосфором в оз. Суури выполнена для съемки озера 27 июля 2015 г. Среднее значение фосфора фосфатов (PO₄) принято равным 0,556 мкг Р/л. Среднее значение аммонийного азота (NH₄) принято равным 40 мкг N/л. Расчеты показывают, что недостаток в воде уменьшает максимально возможную удельную скорость роста фитопланктона в верхнем слое воды в 12,5 раз. Недостаток же в воде азота уменьшает максимально возможную удельную скорость роста фитопланктона в 1,9 раза. Оценка лимитации биогенами первичного продуцирования органического вещества в озере, выполненная за последние 6 лет показала, что недостаток фосфора уменьшает максимальную удельную скорость роста фитопланктона в среднем в 4,9 раза, а недостаток азота – в 1,3 раза. Эти модельные расчеты подтверждают вывод о том, что основным биогеном, лимитирующим первичную продукцию в озере летом является 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 [5]: $f(I) = I / I_{om} * \exp(1 - I / I_{om})$, где I – среднеинтегральная освещенность в слое, $I = (I_0 k K_n (1 - \exp(-\gamma H))) / \gamma H$; I_{om} – оптимальная освещенность, задаваемая константой или с учетом характеристики области светового насыщения Дж. Толлинга ($I_{om} = e I_k$, где $e = 2,718$). Освещенность, поступающая на поверхность водоема, $I_0 = 20,23$ МДж/м²сут рассчитана на основе учета широты и долготы места; номера

суток от начала года, облачности, продолжительности светового дня для 27.07.2015. Толщина слоя воды $H = 1,55$ м (принята средняя глубина прозрачности по всем продукционным станциям); коэффициент экстинкции $k = 0,5$; параметр $I_k = 4,16$ МДж/м²сут (принят для диатомовых водорослей). Параметр влияния льда $k_n = 1$. Расчет показателя ослабления света проводился по формуле Института озероведения РАН: $\gamma = a + (b/S)$, где $a = 0,275$; $b = 1,03$; S – прозрачность воды. В этом случае $\gamma = 0,944$ м⁻¹. Параметр $1/f(I) = 1,25$. Таким образом, эффект самозатенения в слое воды 1,55 м вызвал снижение максимальной удельной скорости первичного продуцирования органического вещества фитопланктона в июле в 1,25 раза.

9. Оценка устойчивости озерной экосистемы к изменению параметров естественного и антропогенного режимов. Расчет выполнен по балльно-индексному методу и методу сводных показателей [5, 10]. Расчет по балльно-индексному методу реализован для двух типов устойчивости: 1 – устойчивость к изменению параметров естественного режима и продуктивности системы (антропогенному эвтрофированию); 2 – устойчивость к изменению параметров естественного режима и качества воды [5, 9]. Для первого варианта необходимо к баллам устойчивости к изменению параметров естественного режима прибавить баллы трофности: $15 + 5$ (мезотрофия) = 20 баллов. Этой сумме баллов соответствует IIIс (середина III класса устойчивости). Для оценки устойчивости озерной системы к изменению параметров естественного режима и изменения качества воды оз. Суури, необходимы сведения о качестве воды в озере. Качество воды было оценено несколькими способами. Вода в верхних слоях отнесена к II-III классам. В этом случае озеро Суури отнесено к границе III-IV или III классу устойчивости. Если учесть, что придонные воды в озере загрязнены сильнее, и их качество можно оценить IV-V классами качества, то в этом случае озеро Суури может быть отнесено к левой границе III класса или к правой границе II класса устойчивости. Таким образом, был получен вывод о том, что придонные воды более устойчивы к изменению параметров естественного режима и загрязнению, чем поверхностные. Это не должно восприниматься как подтверждение благополучия экологической ситуации (обстановки) в придонных слоях озера или как повышение экологического благополучия в водоеме в целом. Сделан вывод о том, что озеро Суури более уязвимо к изменению параметров естественного

режима и качества воды, чем к изменению параметров естественного режима и эвтрофированию.

Расчет устойчивости по МСП выполнялся в несколько этапов. На первом этапе были рассчитаны интегральные показатели устойчивости (ИПУ) к изменению естественного режима, качества воды, трофического состояния, ацидификации (ИПУ^{ест}, ИПУ^{кач}, ИПУ^{эвт}, ИПУ^{ац} соответственно). На втором уровне свертки рассчитаны комбинации: ИПУ^{ест} + ИПУ^{кач}; ИПУ^{ест} + ИПУ^{эвт}; ИПУ^{ест} + ИПУ^{ац} при равенстве и неравенстве приоритетов оценивания.

Оценка устойчивости к изменению естественного режима и трофности показала, что при всех вариантах задания весов групп ИПУ^{ест}, ИПУ^{ест н/р}, ИПУ^{эвт}, ИПУ^{эвт н/р}, ИПУ^{ест + эвт}, ИПУ^{ест н/р + эвт н/р} внутри и между группами по величине по ИПУ оз. Суури отнесено к III классу устойчивости. Оценка устойчивости к изменению естественного режима и качества воды показала, что при всех вариантах задания весов внутри групп ИПУ^{ест}, ИПУ^{кач}, ИПУ^{ест + кач}, ИПУ^{ест н/р}, ИПУ^{кач н/р}, ИПУ^{ест н/р + кач н/р} и между группами по величине ИПУ оз. Суури отнесено к III классу устойчивости, кроме придонного слоя. Оценка устойчивости к изменению естественного режима и ацидификации показала, что при равновесности ИПУ^{ест}, ИПУ^{ац}, ИПУ^{ест + ац} по величине интегральных показателей устойчивости оз. Суури (поверхностные воды) отнесено к III классу устойчивости и к границе между II и III классами для придонных вод.

10. Оценка экологического благополучия водоема. На основе аксиологического подхода сформулировано представление об экологическом благополучии водоема. Признаками экологически благополучного водоема в нашем случае являются: 1) способность продуцировать органическое вещество (оптимальной первичной продукцией считается продукция, создаваемая водными экосистемами определенного класса трофности, например олиго-мезотрофными; трофический статус выявляется на основе интегрального подхода); 2) высокое качество воды (используются гидрохимический и гидробиологический подходы для интегральной оценки качества воды); 3) максимальное 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 самоочище-

ния (оценивается по D/P-отношению и по времени осветления воды зоопланктоном). Если система способна сохранять выше-названные признаки длительное время, то она признается благополучной. На основе признаков экологического благополучия (ЭБ) водной экосистемы формулируются модели-классификации ЭБ. В соответствии с определением ЭБ предложены основные группы критериев оценивания. В основу количественного интегрального оценивания ЭБ на основе МСП положена модель-классификация ЭБ для 2-х уровней свертки показателей. На 1-м уровне реализовано построение интегральных показателей трофности, качества воды, устойчивости (ИПТ, ИПК, ИПУ соответственно) при неравновесном значении исходных параметров. Выполнены различные варианты расчета интегрального показателя ЭБ (ИПЭБ). Варианты различаются учетом параметров устойчивости в модели.

В первом случае (ЭБ-У1) рассматривается устойчивость к изменению параметров естественного режима и антропогенному эвтрофированию. Во втором варианте (ЭБ-У2п) рассматривается устойчивость к изменению параметров естественного режима и качества воды на поверхности водоема. В третьем варианте (ЭБ-У2д) рассматривается устойчивость к изменению параметров естественного режима и качества воды для придонных вод. Все варианты ориентированы на 5 классов оценки устойчивости и ЭБ. На 2-м уровне свертки рассчитывались ИПЭБ при равенстве приоритетов (весовых коэффициентов) и их неравенстве.

По результатам расчетов ИПЭБ по варианту модели ЭБ-У1 значения ИПЭБ в период с 2010 по 2014 гг. попадают в правую границу II-го класса ЭБ водоема (ЭБ «выше среднего»). По варианту модели ЭБ-У2п в 2010 и 2011 году значения ИПЭБ также попадают в правую границу II класса ЭБ (ЭБ «выше среднего»). А в 2012 и 2013 гг. значения ИПЭБ попадают в левую границу III класса. По последнему варианту модели ЭБ-У2д значения ИПЭБ в период с 2010 по 2013 гг. попадают в правую границу II класса ЭБ (ЭБ «выше среднего»). Сделан вывод о том, что экосистема озера способна сохранять высокий класс благополучия сравнительно длительное время.

Заключение

Выполнена оценка экологического состояния малого озера Суури и других водоемов по результатам летних наблюдений мониторингового типа в 2015 г. Результаты сравниваются с ретроспективными данными. Численность зоопланктона в озере со-

ставила 17170 экз/м². Суммарная биомасса зоопланктона составила 336 мг сыр. веса/м³. Биомасса фильтраторов 275 мг сыр. веса/м³. Биомасса хищников 55 мг сыр. веса/м³. Расчет индекса Шеннона показал, что в оз.Суури $\dot{H} = 1,81$, в проливе Лехмалахти Ладожского озера $\dot{H} = 1,48$. Привлечение к анализу материалов прошлых лет позволило выявить постепенное снижение индекса Шеннона от года к году в исследуемых водоемах. Трофический статус озера оценен как мезотрофный. Качество воды соответствует II-III классам (поверхностные воды) и IV классу (придонные воды). Индекс BMWP в Ладоге и оз.Суури изменялся в пределах 19-27 (в оз.Суури BMWP = 21; в проливе Лехмалахти 19-27), что позволило отнести придонную воду в водоемах к IV-V классам качества («невысокое» – «очень плохое»).

Значение $D:P_{\text{вал}}$ во всех случаях больше единицы, что свидетельствует о том, что процессы деструкции органического вещества превышали новообразование (продуцирование) органического вещества в толще воды «0 м – глубина прозрачности». Время осветления воды зоопланктоном в июле составляет 7-13 суток. Основным биогеном, лимитирующим первичную продукцию в озере, как и в прошлые годы, является фосфор. Азот слабее лимитирует первичную продукцию. Оценка лимитации биогенами первичного продуцирования органического вещества в озере, выполненная за последние 6 лет показала, что недостаток фосфора уменьшает максимальную удельную скорость роста фитопланктона в среднем в 4,9 раза, а недостаток азота – в 1,3 раза. Эффект самозатенения в верхней 2-метровой толще воды вызывает снижение удельной скорости продуцирования органического вещества фитопланктоном в 1,25 раза.

Оценка устойчивости оз. Суури к изменению параметров естественного режима и эвтрофированию указывает, что водоем относится к III классу устойчивости. Оценка устойчивости к изменению естественного режима и качества воды показала, что озеро отнесено к III классу устойчивости (в отдельные годы к IV), кроме придонного слоя (левая граница III класса или к правой граница II класса). Следуя принципу Ле Шателье – Брауна, повышение уровня трофии для озера будет сопровождаться в перспективе повышением устойчивости к антропогенному эвтрофированию. Это не должно восприниматься как создание благополучной экологической ситуации (обстановки) в озере. Было признано, что озеро Суури более уязвимо к изменению параме-

тров естественного режима и качества воды (в поверхностном слое), чем к изменению параметров естественного режима и эвтрофированию.

Разработаны признаки экологически благополучной водной экосистемы, для которой сформулированы модели-классификации экологического благополучия (ЭБ). Выполнена интегральная оценка экологического благополучия оз.Суури. Для 2010-2014 гг. экологическое благополучие озера оценено II-м классом (выше среднего). При этом значения интегрального показателя ЭБ незначительно изменялись внутри II-го класса (правая граница), а в 2012 г. попали в левую границу III класса. В целом ИПЭБ изменялся в интервале 0,346-0,406 (граничное значение между классами 0,36), это позволило сделать вывод о том, что экосистема озера способна сохранять высокий класс благополучия сравнительно длительное время.

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

Список литературы

1. Гальцова В.В., Дмитриев В.В. Практикум по водной экологии и мониторингу состояния водных систем. Учебное пособие. Наука, СПб, 2007. – 364 с.
2. Дмитриев В.В., Мандрыка О.Н., Огурцов А.Н., Потапова Т.М. Состояние водных объектов северо-западного Приладожья и оценка их устойчивости к антропогенному эвтрофированию / Сборник научных трудов «Длительные изменения и современное состояние ландшафтов Приладожья» под ред. А.Г. Исаченко, изд. СПбГУ, СПб., 1995, С. 90-99.
3. Дмитриев В.В., Васильев В.Ю. Горбовская А.Д., Мандрыка О.Н., Огурцов А.Н., Опекунова М.Г., Потапова Т.М. Диагностика состояния водоемов, наземной растительности и почвенного покрова геосистем карельского Приладожья. I. Диагностика состояния водных объектов / Известия Русского географического общества, изд. РГО, СПб., 1996, Т. 128, вып. 1, С. 45-55.
4. Дмитриев В.В., Васильев В.Ю. Горбовская А.Д., Огурцов А.Н., Опекунова М.Г., Потапова Т.М. Диагностика состояния водоемов, наземной растительности и почвенного покрова геосистем карельского Приладожья. II. Диагностика состояния почвенного и растительного покрова, устойчивость геосистем к антропогенному воздействию. Известия Русского географического общества, изд. РГО, СПб., 1996, Т. 128, вып. 2, С. 49-54.
5. Дмитриев В. В. Эколого-географическая оценка состояния внутренних водоемов: дис. д-ра геогр. наук. – СПб., 2000. – 419 с.
6. Дмитриев В.В., Панов В.Е., Прякина Г.В. Методические указания по учебно-производственной практике «Экологическое состояние водных объектов». Учебно-метод. пособие. – СПб.: ВВМ, 2010. – 116 с.
7. Дмитриев В.В., Панов В.Е., Шарафутдинова Г.Ф., Огородникова Н.Н., Оверченко Е.Н., Котова Н.Е. «Оценка экологического состояния, качества воды, трофичности и устойчивости водных объектов карельского Приладожья по материалам летних наблюдений 2007-2010 гг.» / В сб. «География в системе наук о Земле: современные проблемы науки и образования». Материалы международной конференции, посвященной 165-летию создания Русского

Географического Общества и 85-летию организации географического факультета в Санкт-Петербургском (Ленинградском) государственном университете. Под общей редакцией Т.А. Алиева, В.В. Дмитриева, Н.В. Каледина, К.В. Чистякова, СПб, ВВМ, 2011, С. 172-181.

8. Дмитриев В.В., Панов В.Е., Пуленко Н.А., Шарафутдинова Г.Ф., Бурцев С.Н., Боброва О.Н., Буршева О.А., Евдокимов А.А., Зезюльчик Т.С., Кашина В.В. Экологическое состояние водных объектов карельского приладожья по результатам экспедиционных исследований 2011 г. и его сравнение с ретроспективными данными / Современные проблемы географии и геоэкологии. Материалы международной научной конференции, посвященной 90-летию почетного профессора СПбГУ, доктора географических наук, профессора А.Г. Исаченко / Под общей ред. Алиева Т.А., Белозерского Г.Н., Дмитриева В.В., Мовчана В.Н., Чистобаева А.И., СПб., ВВМ, 2012, С. 201-214.

9. Дмитриев В.В. Современное экологическое состояние водных объектов карельского Приладожья и его сравне-

ние с ретроспективными данными. Научно-теоретический журнал Ученые записки Российского государственного гидрометеорологического университета № 33. – СПб: РГГМУ, 2014, С. 102-118.

10. Дмитриев В.В., Фрумин Г.Т. Экологическое нормирование и устойчивость природных экосистем. Учебное пособие. СПбГУ-РГГМУ, изд-во «Наука», СПб, 2004, 294 с.

11. Снакин В.В., Мельченко В.Е., Буковский Р.О. и др. Оценка состояния и устойчивости экосистем. – М., 1992. – 127 с.

12. Шитиков В.К., Розенберг Г.С., Зинченко Т.Д. Количественная гидроэкология: методы, критерии, решения: в 2 кн. – М.: Наука, 2005.

13. Leeds-Harrison P.B., Quinton J.N., Walker M.J., Harrison K.S., Tyrrel S.F., Morris J., Mills H. T. Buffer Zones in headwater catchments // Report on MAFF/English Nature Buffer Zone Project CSA 2285. Cranfield University, Silsoe, UK, 1996. – 22 p.