УДК 556.555(282.247.212)«322» doi: 10.33933/2074-2762-2020-61-460-479

Особенности лимнологических параметров системы «Лещевое озеро — Лещевый залив» в период максимального прогрева воды (Валаамский архипелаг, Ладожское озеро)

А.Н. Чернышев, В.О. Сергеева, А.К. Котова, С.Н. Никитина, А.В. Бабин, Е.Ю. Воякина, А.Б. Степанова

Российский государственный гидрометеорологический университет,
chernyshev.alexander2015@yandex.ru

Представлены данные комплексного экологического исследования системы «Лещевое озеро — Лещевый залив», полученные при прохождении производственной практики студентов на базе Учебно-научной станции РГГМУ на о. Валаам в июле 2018 г. Основное внимание уделено анализу пространственного распределения лимнологических параметров. Для параметров цветности, перманганатной окисляемости и электропроводности обнаружена существенная пространственная изменчивость. По сравнению с малыми водоемами северного побережья Ладожского озера озеро Лещевое отличается повышенными значениями параметров, характеризующих содержание органического вещества. Результаты работы могут быть использованы при планировании и проведении природоохранных мероприятий в ООПТ «Валаамский архипелаг», а также при разработке мелиоративных работ Валаамским монастырем на водосборной площади озера Лещевое.

Ключевые слова: Ладожское озеро, Валаамский архипелаг, малые озера, лимнологические параметры.

Limnological parameters features of “Lake Leschovoye — Leschovyi bay” system in maximum water heating period (Valaam archipelago, lake Ladoga)

A.N. Chernyshev, V.O. Sergeeva, A.K. Kotova, S.N. Nikitina, A.V. Babin, E.Ju. Voyakina, A.B. Stepanova

Russian State Hydrometeorological University, Saint Petersburg, Russia

The results of a complex ecological study of “Lake Leschovoye — Leschovyi Bay” water system are presented. Data were obtained during ecology students’ field practice on the Russian State Hydrometeorological University Scientific and Educational Station in July 2018, located on Valaam Island. The ranges of limnological parameters, such as water temperature, water transparency, water colour index, turbidity, conductivity, pH, dissolved oxygen concentration, dissolved carbon dioxide concentration, and organic matter concentration have been analysed, the characteristics of phytoplankton and zooplankton community being given as well. Water samples for hydrochemical analysis were taken both from the surface and bottom water layers. All parameters were analysed by commonly used methods.

For water colour index, organic matter concentration and conductivity, the significant spatial variability was observed. The highest values of water colour index in the studied water system were observed in Lake Leschovoye, being more than 2 times higher than in Leschovyi Bay. Organic matter concentration was also the highest in Lake Leschovoye, being 1,5 times higher than in Leschovyi Bay. The statistical analysis of hydrochemical parameters spatial variability divided the lake system into two big and contrasting parts:

Lake Leschovoye and Leschovyi Bay. Significant relation between a number of hydrochemical parameters was observed. In Lake Leschovoye there were high correlations between conductivity and dissolved carbon dioxide concentration, as well as between conductivity and dissolved oxygen concentration. The phytoplankton community was mostly presented with two large taxa: *Cyanoprokaryota* and *Raphydophyta*, dominating with 75% of total abundance. *Raphidophyta* dominated by biomass, mostly due to one species — *Gonyostomum semen,* its share in total biomass being 95%. Zooplankton community was dominated by *Cyclopoida,* abundance and biomass of which being up to 3 times higher than in other taxa. Based on the values of the limnological parameters Leschovoye Lake can be classified as mesohumic lake with high organic matter concentration and low water transparency.

Lake Leschovoye, compared with water bodies of Lake Ladoga north shore, differentiated by high values of parameters characterizing organic matter concentration. This is caused by geological features of Valaam Archipelago and high watershed swampiness. Organic substance runoff from the arable meadows within the watershed also makes a significant contribution to the lake features.

Keywords: Lake Ladoga, Valaam Archipelago, small lakes, limnological parameters.

For citation: *A.N. Chernyshev, V.O. Sergeeva, A.K. Kotova, S.N. Nikitina, A.V. Babin, E.Ju. Voyakina, A.B. Stepanova.* Limnological parameters features of “Lake Leschovoye — Leschovyi bay” system in maximum water heating period (Valaam archipelago, lake Ladoga). *Gidrometeorologiya i Ekologiya*. Hydrometeorology and Ecology (Proceedings of the Russian State Hydrometeorological University). 2020, 61: 460—479. [In Russian]. doi: 10.33933/2074-2762-2020-61-460-479

Введение

Внутриводоемные процессы являются сложным комплексом взаимосвязанных и изменяющихся параметров. Для понимания их влияния как друг на друга, так и на экосистему водоема, необходимо проведение комплексных лимнологических исследований. Такие исследования базируются на концепции наличия тесных связей в системе озеро—водосбор. Они включают в себя изучение различных параметров этой системы. Это позволяет оценить как пространственно-временную динамику параметров водоема, так и степень воздействия различных внешних факторов.

Озерность Республики Карелия составляет 12 %, большинство из озер относится к малым лесным [1]. Некоторые из этих водоемов довольно хорошо изучены, что позволяет сопоставить полученные натурные данные с уже имеющимися [2]. Однако, анализ пространственного распределения лимнологических параметров для малых озер встречается довольно редко. Несмотря на небольшую площадь, в пределах таких водоемов могут выделяться зоны, довольно сильно отличающиеся по тем или иным характеристикам. Особый интерес представляют малые озера Валаамского архипелага, которые, будучи расположенными на довольно небольшой площади (36 км^2), значительно различаются по лимнологическим параметрам [3]. Ряд водоемов, в том числе озеро Лещевое, через протоки связаны с заливами Ладожского озера, расположенном на 3—5 м ниже относительно них. В связи с этим представляет интерес изучение этих водных объектов в системе для оценки их влияния друг на друга, а также пространственной изменчивости их параметров.

Валаамский архипелаг находится в северной холодноводной части Ладожского озера, относящейся к южнобореальной зоне [4]. Территория архипелага представляет собой интрузивное тело, сложенное габбро-диабазами, ферро-габбро и моноцитами, на которых образуются буроземные, болотно-подзолистые и

болотные почвы [5, 6]. Архипелаг входит в состав ООПТ регионального значения республики Карелия. Для большинства озер антропогенное воздействие отмечено лишь локально и только в последние годы, что позволяет исследовать естественную динамику озерных экосистем, существенно не нарушенных влиянием человека.

Исследование системы водных объектов «Лещевое озеро — протока — Лещевый залив» проводилось на базе Учебно-научной станции РГГМУ на о. Валаам в рамках производственной практики студентов-экологов [7]. Цель работы: оценить пространственную изменчивость ряда лимнологических параметров водной системы «Лещевое озеро — Лещевый залив» в июле 2018 г.

Объект исследования

Исследуемая система расположена в южной части о. Валаам. На ее водосборной площади представлены преимущественно лесные и луговые сообщества. В рамках исследования были выделены 4 группы лесных ассоциаций: сосняки лишайниковые, ельники сфагновые, ельники кислично-зеленомошные и ельники чернично-зеленомошные. Среди луговой растительности выделены две группы: луга после проведения мелиораций (2016 г.) и сельскохозяйственные угодья для выпаса скота.

Озеро Лещевое с площадью зеркала в 0,24 км^2 и значительной водосборной площадью (2,45 км^2) — одно из крупнейших водоемов архипелага [3]. Колебания уровня воды в Ладожском озере оказывают значительное влияние на водообмен системы. Так, в годы с низким уровнем воды в Ладоге озеро Лещевое обычно изолировано от Лещевого залива, а протоки полностью пересыхают. Наиболее явно это наблюдалось в 2003 г. и в 2010 г. В 2018 г. был зафиксирован повышенный уровень воды в Ладоге, что вероятно привело к подпору вытекающих из Лещевого озера вод. В связи с этим площадь исследуемого водоема увеличилась в 1,5 раза (рис. 1).

Подобного увеличения площади не наблюдалось последние 20 лет. Затоплению подверглись расположенные на водосборе луга, что способствовало поступлению соединений фосфора и гумусовых веществ с затопленных земель [7, 8].

Для озера характерно активное развитие макрофитов, занимающих до 15 % площади озера. Наибольшая степень зарастания наблюдается в мелководных заливах в связи с большей площадью литорали.

Бентос водоема по сравнению с другими озерами архипелага отличается высоким видовым богатством и показателями обилия. Донная фауна представлена червями (олигохеты, пиявки), личинками насекомых (мокрецы, хаоборус, хирономиды) и моллюсками. Наибольшим видовым разнообразием отличались хирономиды. Другие группы представлены только одним видом [9].

Материалы и методы

Исследование проводилось в период с 3 июля по 10 июля 2018 г. на 31 станции, распределенных равномерно по всей исследуемой системе. В сеть станций

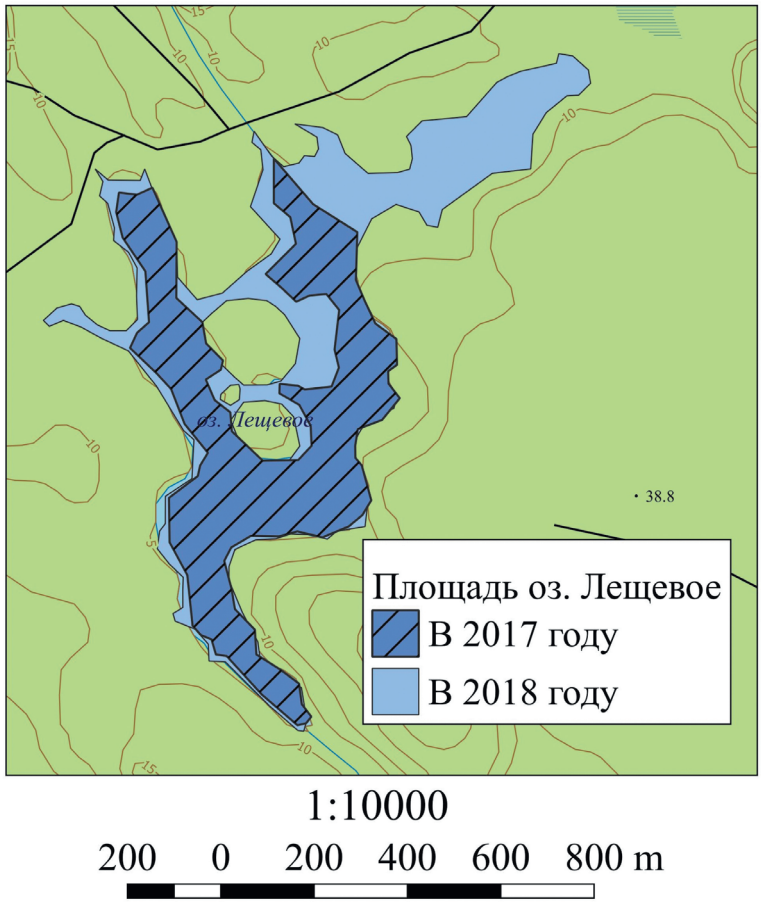

Рис. 1. Площадь Лещевого озера в отдельные периоды наблюдения.

Fig. 1. Lake Leschovoye water surface area in different observation periods.

также была включена мониторинговая станция M_NE с максимальной для Лещевого озера глубиной (7,5 м), для которой собраны и проанализированы многолетние данные (рис. 2).

В работе были проанализированы следующие лимнологические параметры: глубина, температура воды (T), прозрачность (SD), цветность (Pt-Co), мутность (M), электропроводность (µS), активная реакция среды (pH), содержание растворенного кислорода (C_{O2}), углекислого газа (C_{CO2}), органического вещества (ПО), структурные показатели фитопланктона и зоопланктона. Также были проведены описания растительности на водосборной площади. Отбор проб производился из поверхностного и придонного слоев воды, количество измерений представлено в табл. 1.

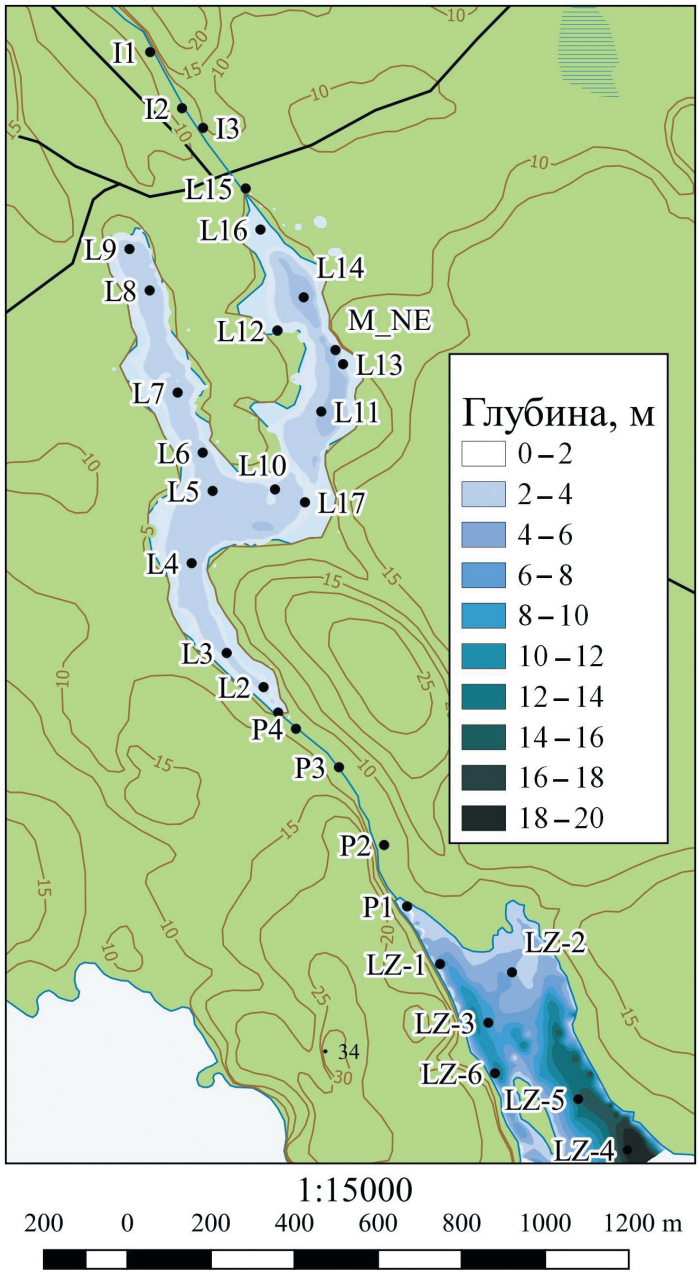

Рис. 2. Расположение станций отбора проб
в Лещевом озере, Лещевом заливе и смежных протоках.

Fig. 2. Sampling sites locations in Lake Leschovoye, Leschovyi Bay and connected canals.

Таблица 1

Объем материала при проведении полевых исследований водной системы Лещевое озеро — Лещевый залив Валаамского архипелага в июле 2018 г.

Amount of collected data during field studies of Valaam Archipelago Lake Leschovoye — Leschovyi Bay system in July 2018

Параметр	T	C_{O2}	C_{CO2}	SD	pH	µS	ПО	M
Число измерений	62	62	46	27	62	62	62	26

Определение мутности и цветности осуществлялось фотометрическим методом, электропроводности и водородного показателя (pH) — электрометрическим методом. Концентрация растворенного кислорода определялась при помощи йодометрии, значения перманганатной окисляемости были получены с использованием титриметрического метода. Определение содержания растворенного углекислого газа производилось с применением титриметрии [10]. Значения прозрачности были получены путем использования белого диска. Отбор и анализ проб фитопланктона и рачкового зоопланктона проводился в соответствии с распространенными методиками [11] Анализ и подсчет коловраток не проводился. Температура измерялась при помощи погружного термодатчика. Измерение глубин осуществлялось при помощи совмещенного с эхолотом картплоттера Garmin GPSmap 178C Sounder. Для визуализации полученных данных использовались ГИС-программы SAGA GIS v.2.3.2 и qGIS v. 2.18.20. Статистическая обработка гидрохимических данных проводилась в программе PAST v. 3.26 [12]. Кластерный анализ был проведен по методу Уорда (Ward`s method), т. к. он позволяет формировать более отчетливые кластеры [13]. Данный метод часто используют для классификации водных объектов [14—16].

Результаты и обсуждение

Лещевое озеро имеет сложную рассеченную форму котловины. Его можно разделить на две неравные части: мелководную западную и относительно глубоководную восточную с максимальными глубинами до 2,7 м и до 7,5 м соответственно.

Для озера характерен довольно большой диапазон глубин (ΔH = 6 м), однако процент площадей с глубинами более 5 м довольно невелик. Он составлял 0,35 % от общей площади озера. Объем водных масс в 580 тыс. м^3 в основном сконцентрирован в слое 0—3 м, что связано с небольшой средней глубиной озера (2 м) и неравномерным распределением глубин в озере.

По сравнению с озером, в Лещевом заливе перепад глубины был существенно больше (ΔH = 17 м). Наименьшая из измеренных глубин зафиксирована в северной части залива, наибольшая — в южной (2,5 м и 31 м соответственно). Средняя глубина залива — 3,8 м, а доля зоны с глубиной более 5 м составляла 59 %. В связи с этим основной объем водных масс распределен в большем слое. Максимальный объем водных масс сконцентрирован в слое 0—20 м.

Измерения температур проводились на 25 станциях в различных частях системы (рис. 3).

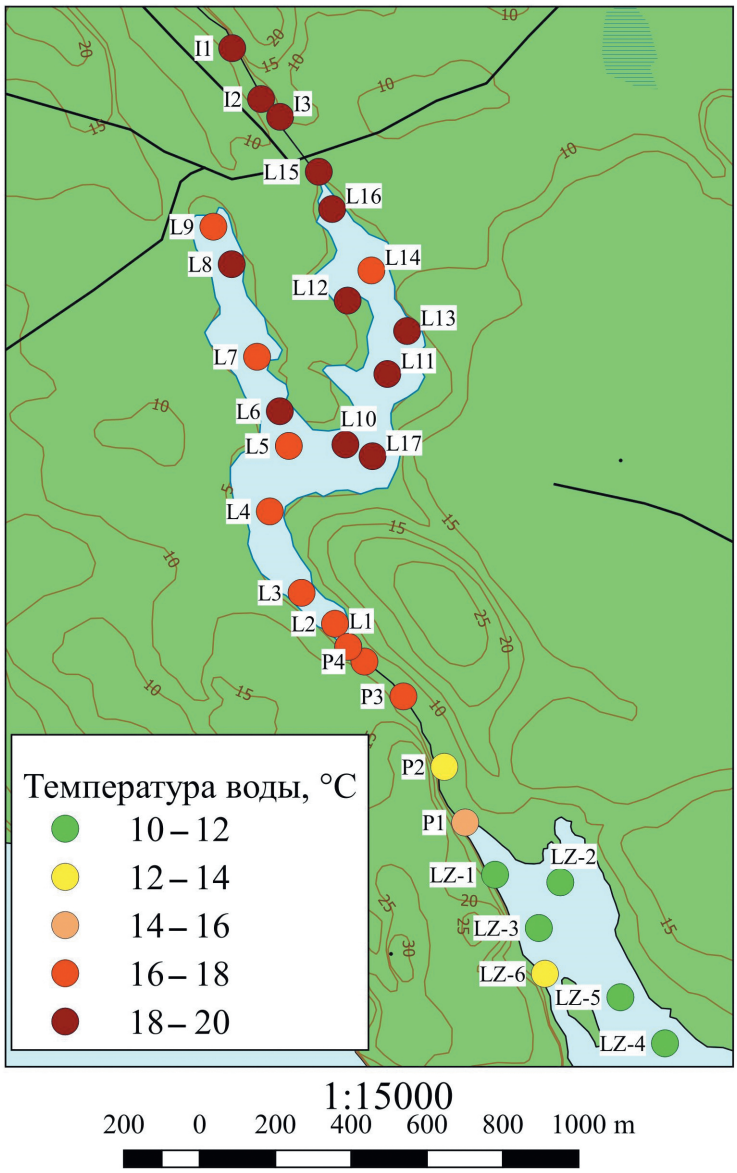

Рис. 3. Температура воды в поверхностном горизонте в различных частях системы.

Fig. 3. Surface layer water temperature in different parts of the system.

Наибольший прогрев водной толщи наблюдался в Лещевом озере и протоке Иордан, расположенной в северной части водоема. Температура этих водных объектов в поверхностном слое не опускалась ниже 17 °C. Наименьшие значения зафиксированы в зал. Лещевый, в котором максимальная температура не превышала

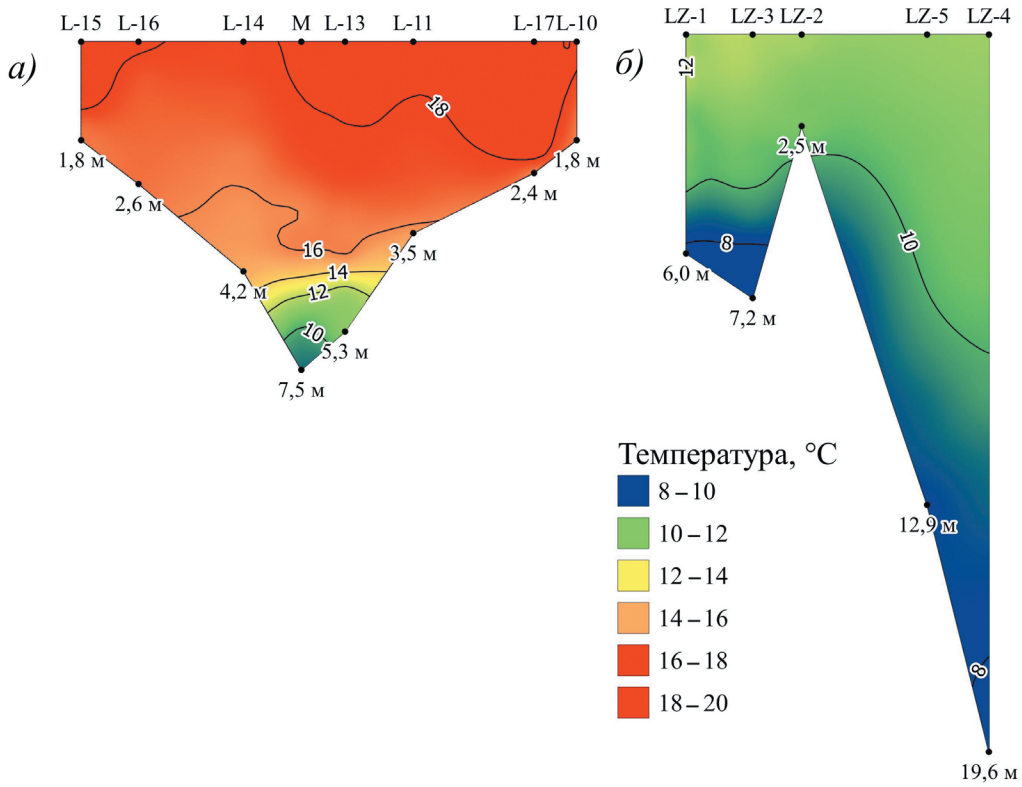

Рис. 4. Вертикальное распределение температуры
в восточной части Лещевого озера (*а*) и Лещевом заливе (*б*).

Fig. 4. Vertical distribution of temperature
in east part of Lake Leschovoye (*а*) and Leschovyi Bay (*б*).

13 °C. В протоке, соединяющей залив и озеро, значения температуры изменялись в диапазоне от 13 до 17 °C.

Наибольшая разность температур (Δt) в поверхностном и придонном горизонтах наблюдалась в восточной части озера Лещевое (рис. 4).

Как видно из рис. 4, в Лещевом озере разность температур между поверхностным и придонным горизонтами (Δt) составляла около 10 °C. Это говорит о выраженной температурной стратификации в данной части озера. В другой крупной части системы — Лещевом заливе, несмотря на максимальную глубину в 19 м, подобной картины не наблюдалось. Величина Δt составляла здесь не более 5 °C, что в два раза меньше, чем в озере. Более высокие температуры воды в Лещевом озере могут быть связаны с отсутствием активного перемешивания водных масс, а также с высокой светопоглощающей способностью озера. Это, в свою очередь, может быть вызвано низкими значениями прозрачности, которые в озере не превышали 1,5 м. В то время как в Лещевом заливе прозрачность в 2 раза выше.

Анализ ряда гидрохимических параметров показал, что в поверхностных горизонтах системы их значения изменялись незначительно. Наибольшим постоянством значений отличались водородный показатель (pH) и электропроводность, т. к. значения коэффициента вариации для них были наименьшими и составляли 1,8 % и 5,7 % соответственно (табл. 2).

Таблица 2

Средние и экстремальные значения
ряда гидрохимических параметров в поверхностном горизонте

Mean and extreme values of set of hydrochemical parameters in surface layer

Объект	pH	Перманганатная окисляемость, мгО/л	Электропроводность, мкСм/см
Залив Лещевый	7,2 (7,2—7,3)	12,2 (11,8—12,9)	101,5 (99,3—107,0)
Лещевая протока	6,6 (6,5—6,9)	12,8 (11,1—14,4)	86,1 (70,4—100,4)
Лещевое озеро	6,7 (6,4—7,1)	15,2 (13,1—18,8)	70,0 (68,2—72,6)
Протока Иордан	6,4 (6,3—6,5)	16,0 (15,3—16,9)	88,8 (87,9—89,5)

Это может говорить о стабильности процессов, протекающих в системе в поверхностном горизонте, а также о некоторой степени водообмена между ее частями в исследуемый период. Перманганатная окисляемость ($ООВ_{Mn}$), в свою очередь, характеризовалась более выраженной изменчивостью (коэффициент вариации — 7,5 %). Обращает на себя внимание тенденция изменения значений этого параметра в поверхностном горизонте (рис. 5).

Минимальные значения $ООВ_{Mn}$ обнаружены в Лещевом заливе и южной части протоки (станции P1 и P2). При движении на север ее значения увеличивались и уже в северной части протоки (стации P3 и P4) были сопоставимы с показателями Лещевого озера. Максимальные значения в придонном горизонте установлены в северо-восточной части озера, где наиболее заметно влияние мелиорируемых полей, расположенных в непосредственной близи от уреза воды.

Для придонных слоев наибольшей изменчивостью отличались величины $ООВ_{Mn}$ и электропроводности (коэффициенты вариации составляли 9,3 % и 8,0 % соответственно) Перманганатная окисляемость в придонном горизонте озера Лещевое варьировала в диапазоне от 14,0 до 25,9 мгО/л, а электропроводность — в диапазоне 67,8—104,3 мкСм/см. Максимальные значения этих параметров были отмечено на мониторинговой станции. Минимальное значения перманганатной окисляемости было зафиксировано в Лещевой протоке, а электропроводности — на станции L-17 в центральной части Лещевого озера.

По полученным данным озеро Лещевое и протока Иордан относятся к олигоацидонейтральным водным объектам с высоким содержанием $ООВ_{Mn}$; протока, впадающая в Лещевый залив — к олигоацидонейтральным со средними значениями перманганатной окисляемости; Лещевый залив — к нейтрально-олигощелочным, также со средними значениями перманганатной окисляемости [3].

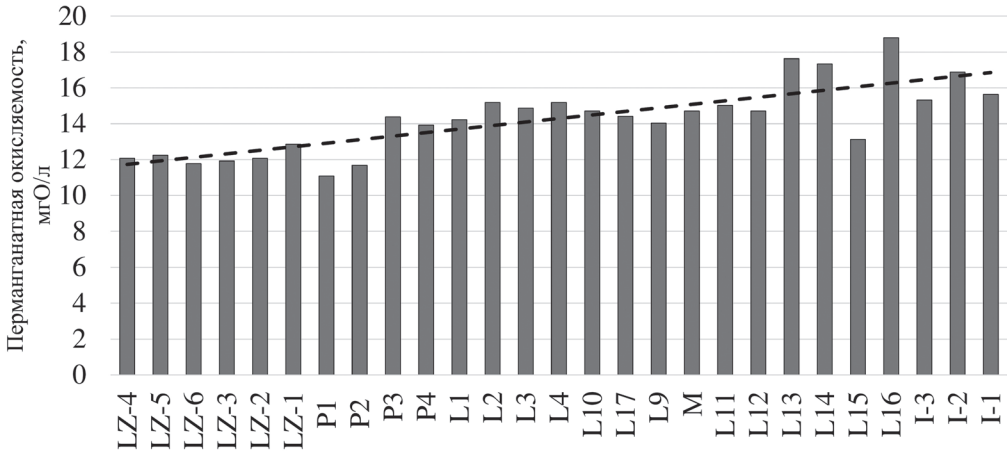

Рис. 5. Значения перманганатной окисляемости в поверхностном горизонте исследуемой системы (станции перечислены в направлении с юга на север). Пунктиром обозначена линия тренда.

Fig. 5. Permanganate index values in surface layer of the studied system (sites are listed from south to north). Trend line are marked with dashed line.

Для Лещевого озера и Лещевого залива было проведено измерение цветности. Значения в озере варьировали от 83 до 100 °Pt-Co на поверхности, достигая максимума на станции Л-16 — ближайшей к мелиорируемым полям. В придонном горизонте цветность изменялась в диапазоне от 81 до 204 °Pt-Co, достигая максимума на мониторинговой станции. Высокое значение цветности обусловлено накоплением органического и неорганического вещества за счет замедленного процесса разложения и минерализации. Это связано с развитием анаэробных процессов в придонном горизонте, вызванных крайне низкими концентрациями растворенного кислорода. Такие условия создаются за счет выраженной температурной стратификации озера и высокой плотности холодной воды. Значения цветности воды в Лещёвом заливе Ладожского озера как в поверхностном, так и в придонном горизонтах варьировали незначительно (38—43 °Pt-Co и 37—42 °Pt-Co соответственно), что связано с динамическим перемешиванием вод и низким содержанием гуминовых веществ. Согласно классификации С.П. Китаева [17] по степени окрашенности вод Лещевое озеро относится к интенсивно-окрашенным, Лещевый залив — к слабоокрашенным.

Для газового режима характерны высокие значения насыщения воды растворенным кислородом (табл. 3).

Полное отсутствие растворенного кислорода в придонном слое воды обнаружено только на мониторинговой станции в глубоководной части озера Лещевое. Вероятно, это связано с интенсивным процессом разложения органического вещества, о чем говорят высокие значения углекислого газа (57,2 мг/л). Градиент концентраций растворенного кислорода наиболее выражен в озере Лещевое, тогда как в остальных частях системы он незначителен.

Таблица 3

Средние и экстремальные значения
концентраций растворенного кислорода и углекислого газа

Mean and extreme values of dissolved oxygen and dissolves carbon dioxide concentrations

	O_2, % насыщения		CO_2, мг/л	
	Пов	Дно	Пов	Дно
Залив Лещевый	103 (96—108)	94 (87—100)	3,3 (2,3—6,0)	4,0 (2,5—6,5)
Протока между оз. Лещевое и зал. Лещевый	105 (94—124)	98 (86—114)	—	—
Лещевое озеро	92 (72—107)	75 (0—102)	5,0 (3,0—8,3)	9,4 (3,2—57,2)
Протока «Иордан»	67 (62—82)	64 (53—79)	—	—

По классификации С.П. Китаева [17] озеро Лещевое отличается средним содержанием растворенного кислорода, протока к заливу и Лещевый залив — высоким содержанием кислорода, протока Иордан — очень низким содержанием кислорода. По содержанию двуокиси углерода в поверхностных слоях в летний период озеро Лещевое и Лещевый залив характеризовались средним содержанием углекислого газа.

Для водоема было выполнено описание характеристик фитопланктона и зоопланктона. В исследуемый период обнаружено 18 видов фитопланктона из следующих отделов: *Chlorophyta* — 6, *Cyanoprokaryota* — 4, *Bacillariophyta* — 3, *Euglenophyta* — 2, *Chrysophyta* — 2, *Raphidophyta* — 1.

Общая численность фитопланктона в озере Лещевое составляла 2,5 млн кл. дм^3, биомасса — 4,3 мг/дм^3. По численности доминировали цианопрокариоты (83 %), по биомассе — рафидофитовые водоросли (92 %) (табл. 4).

Таблица 4

Численность (N) и биомасса (B) крупных таксонов фитопланктона в оз. Лещевое, июль 2018 г.

Abundance (N) and biomass (B) of phytoplankton large taxa in Lake Leschovoye, July 2018

Таксон	N, кл./дм^3	B, мг/дм^3	%N	%B
Cyanoprokaryota	2071	0,22	83,36	5,07
Euglenophyta	32,5	0,04	1,31	1,04
Raphidophyta	255	3,95	10,26	91,91
Chrysophyta	21	0,05	0,85	1,11
Bacillariophyta	27,5	0,03	1,11	0,69
Chlorophyta	77,5	0,01	3,12	0,18

Преобладание *Cyanoprokaryota* по численности связано доминированием одного вида — *Aphanizomenon flos-aquae* (L.) Ralfs ex Bornet & Flahault (75 % от общей численности). Высокая биомасса *Raphidophyta* вызвана активной вегетацией

Gonyostomum semen (Ehrenb.) Diesing (92 % от общей биомассы) — единственного представителя этого отдела в озере.

Доминирование по биомассе *Gonyostomum semen* определяется большим размером и объемом клеток (d клеток — 20—75 мкм). В свою очередь, размер клеток второго доминирующего вида (по численности) *Aphanizomenon flos-aquae* существенно меньше (d клеток — 5—20 мкм), поэтому этот вид не создает значительной биомассы.

По значению биомассы фитопланктона на основе классификации С.П. Китаева [17] водоем был отнесен к эвтрофным. Это подтверждается данными по содержанию хлорофилла а (4,85 мг/м^3), на основе которых по классификации Г.Г. Винберга [17] озеро также можно определить как эвтрофное.

Зафиксированные в июле 2018 г. значения численности и биомассы были довольно низкими, но существенно не отличались от диапазона многолетних данных (табл. 5).

Таблица 5

Некоторые характеристики фитопланктона оз. Лещевое
в различные периоды наблюдения

Certain phytoplankton characteristics of Lake Leschovoye in different observation periods

Период наблюдения	Количество обнаруженных видов	N, млн. кл./дм^3	B, мг/дм^3	Трофический статус
Июль 2018 г.	18	0,003	4,30	Эвтрофный водоем
1997—2015 гг.	110	0,8—143,5	3,1—35,91	

Имеющиеся данные позволяют говорить о том, что условия вегетации фитопланктона в озере за весь исследуемый период (1997—2018 гг.) существенно не изменялись. По показателю биомассы фитопланктона трофический статус озера также сохраняется.

Рачковый зоопланктон Лещевого озера в июне 2018 г. был представлен семью эврибионтными видами. Все они относятся к следующим крупным таксонам: *Cyclopoida* — 1 вид; *Calanoida* — 1 вид; *Cladocera* — 5 видов. Массовые виды представлены *Thermocyclops oithonoides* Sars, *Eudiaptomus gracilloides* Lilleborg и *Daphnia cristata* Sars. Все они — термофильные, их высокая встречаемость говорит о благоприятно высоких температурах воды для развития этих видов в период исследования [18]. Очевидно, что в другое время года группа массовых видов может отличаться.

За исследуемый период численность зоопланктона в озере Лещевое составляла 31,89 экз./дм^3, биомасса — 0,24 мг/дм^3. Распределение данных значений по основным группам зоопланктона было довольно неравномерным (рис. 6).

Доминирующей группой как по численности, так и по биомассе был отряд *Cyclopoida*. Доля *Calanoida* изменялась незначительно. Низкая биомасса *Calanoida* может говорить о наличии процессов эвтрофирования в водоеме, так как представители этой группы в эвтрофных условиях первыми начинают сокращать свою численность [19].

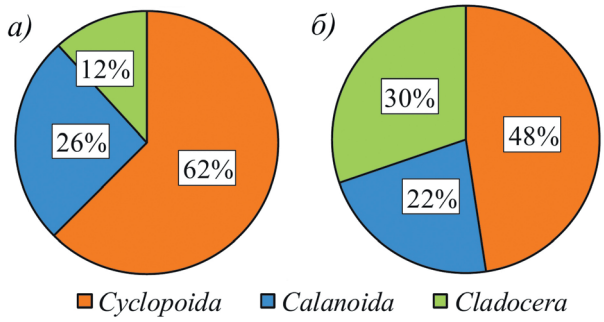

Рис. 6. Доля крупных таксонов зоопланктона в общей численности (*а*) и биомассе (*б*) оз. Лещевое, июль 2018 г.

Fig. 6. Zooplankton large taxa ratio in total abundance (*a*) and biomass (*б*) in Lake Leschovoye, July 2018

Вклад *Cladocera* в общую численность и биомассу значительно различался, что связано с высокими значениями индивидуального веса организма (ω) в этой группе. Среди кладоцер среднее значение ω составляло 0,06 мг, тогда как в других таксонах эта величина была в 10 раз меньше и не превышала 0,006 мг.

По величине биомассы зоопланктона по классификации И.А. Андронниковой [19] также была произведена оценка трофического статуса водоема. По основным классификациям озеро Лещевое в июле 2018 г. относилось к олиго-мезотрофным.

Полученные данные по зоопланктону были сопоставлены с результатами анализа, проведенного в 2017—2018 гг. в период с июня по сентябрь (табл. 6).

Таблица 6

Некоторые характеристики зоопланктона оз. Лещевое в различные периоды наблюдения

Certain zooplankton characteristics of Lake Leschovoye in different observation periods

Период наблюдения	Количество обнаруженных видов	Общая численность (N), экз./дм^3	Общая биомасса (B), мг/дм^3	Трофический статус
Июль 2018 г.	7	31,89	0,24	Олиго-мезотрофный
2017—2018 гг.	18	11,48—18,12	0,09—0,49	

В целом, значительных различий по биомассе и трофическому статусу между периодами исследования не выявлено. Однако, обращает на себя внимание крайне высокое значение численности в июле 2018 г., которое в 1,7 раза больше ее максимального значения за весь период с 2017 г. по 2018 г.

Таким образом, по гидробиологическим показателям за последнее время существенных изменений в озере Лещевое обнаружено не было. Трофический статус озера, определенный по биомассе фитопланктона и зоопланктона, не совпадает. Это может быть связано с тем, что различные факторы могут лимитировать развитие фитопланктона и зоопланктона. Эвтрофный статус водоема по данным оценки биомассы фитопланктона, вероятно, связан с активным поступлением с водосбора аллохтонного органического вещества. Его высокая концентрация

в озере способствует развитию *Gonyostomum semen*, который предпочитает питание органическими соединениями.

Для анализа пространственной изменчивости ряда лимнологических параметров был использован метод главных компонент. Исходная матрица данных состояла из 9 строк и 24 столбцов. Она включала в себя значения гидрохимических параметров (строки) в поверхностном и придонном горизонтах на исследуемых станциях (столбцы). В результате были выделены три главных компоненты со скоростью сходимости 98 %, из которой 57 %, 33 % и 8 % описанной изменчивости приходились соответственно на первую, вторую и третью компоненты. По значению нагрузок наибольшей изменчивостью в поверхностном и придонном горизонтах отличались газовый режим и электропроводность. На основе полученных собственных значений первых трех главных компонент была проведена кластеризация по методу Уорда (Ward`s Method) (рис. 7).

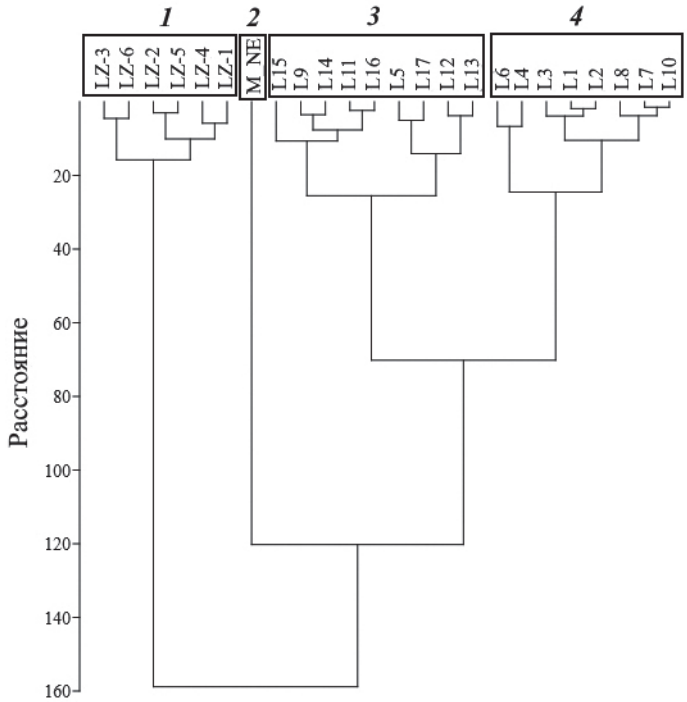

Рис. 7. Дендрограмма сходства станций в исследуемой системе (метрика — Евклидово расстояние, метод Уорда (Ward`s Method)):

1 — Лещевый залив Ладожского озера, *2* — мониторинговая станция в оз. Лещевое, *3* — относительно глубоководная часть оз. Лещевое, *4* — Мелководная часть оз. Лещевое.

Fig. 7. Sites similarity dendrogram in studied system (Euclidean distance metric, Ward`s Method):

1 — Leschovyi Bay of Lake Ladoga, *2* — Lake Leschovoye monitoring site, *3* — relatively deep part of Lake Leschovoye, *4* — shallow part of Lake Leschovoye.

Наибольшее различие зафиксировано между станциями в Лещевом заливе и Лещевом озере. В самом озере явно выделяются две крупные зоны — мелководная и глубоководная. Подобное разделение, вероятно, связано с разным газовым режимом в придонных слоях соответствующих зон. Станция М выделяется в отдельный кластер за счет крайне экстремальных для озера значений некоторых гидрохимических параметров: цветности (204,4 °Pt-Co), отсутствия растворенного кислорода (0 мг/л) и углекислого газа (57,2 мг/л) в придонном горизонте.

В относительно глубоководной части озера в придонном горизонте наблюдался дефицит, а в некоторых случаях полное отсутствие кислорода. Это влечет за собой образование сероводорода (определяемого органолептически), накопление углекислого газа и ионов аммония. Накопление различных соединений в придонном горизонте озера Лещевое было отмечено и в более ранних исследованиях [3]. В подобных условиях может увеличиваться электропроводность, что и было зафиксировано на станциях с глубиной более 5 м.

Было проведено сопоставление озера Лещевое с другими озерами Валаамского архипелага по гидрохимическим и гидробиологическим параметрам. По величинам, характеризующим содержание органического вещества, озеро является довольно типичным для архипелага [3]. Однако, водоем выделяется заметным вертикальным градиентом содержания углекислого газа. Концентрация в поверхностном и придонном горизонтах может отличаться в 4—7 раз. Структура фитопланктона в озере Лещевое сходна с большинством водоемов Валаама. Озеро характеризуется высокой (60—70 %) долей *Raphidophyta* в общей биомассе и доминированием цианопрокариот и зеленых водорослей по численности. Общие значения как численности, так и биомассы, довольно невысоки [20]. Рачковый зоопланктон водоема наряду с Крестовым, Антоньевским озерами и озером Сисяярви характеризуется высоким видовым разнообразием, более выровненной таксономической структурой без ярко выраженных видов-доминантов и высокой индивидуальной массой тела относительно других водоемов архипелага [21].

Полученные значения ряда лимнологических параметров для озера Лещевое были также сопоставлены с некоторыми водоемами материковой части республики Карелия. Для этого были выбраны несколько озер со сходными морфометрическими параметрами, расположенных на территории северного побережья Ладожского озера (табл. 8).

Таблица 8

Значения ряда лимнологических параметров оз. Лещевое (Валаамский архипелаг) и некоторых озер материковой части республики Карелия [1, 22]

Values of set of limnological parameters in Lake Leschovoye (Valaam Archipelago) and some inland Karelian lakes

Озеро	S, км^2	$H_{ср}$, м	H_{max}, м	SD, м	°Pt-Co	ПО, мгО/л	CO_2, мг/л	pH
Лещевое	0,17	3,14	7,5	1,5-2	99	15,2	3,0—8,3	6,4—7,1
Хияярви	0,94	3,4	9,4	1,7	56—64	7,7	0,7—1,4	6,4
Большое Валькеалампи	0,22	3,3	8	2,7	80—90	9,5—12,5	2,6—15,1	6,6—6,8
Малое Велькеалампи	0,12	2,5	7,5	1,8	70—90	13,6—14,8	4,6—5,0	6,6
Валкеаярви	0,3	2	12	2,7	35—49	5,2—7,4	1,6	6,2—6,4

По параметрам, характеризующим поступление органического вещества (прозрачность, цветность, перманганатная окисляемость) все озера были разделены на несколько групп:

1 — мезополигумозные, с высокой перманганатной окисляемостью и низкой прозрачностью;

2 — мезополигумозные, со средней перманганатной окисляемостью и средней прозрачностью;

3 — мезогумозные, со средней перманганатной окисляемостью и низкой прозрачностью;

4 — мезогумозные, с низкой перманганатной окисляемостью и средней прозрачностью.

К первой группе с максимальными значениями цветности и органического вещества было отнесено только Лещевое озеро. Во вторую группу вошло озеро Большое Велькеалампи, в третью — озера Хияярви и Малое Вельекеалампи, в четвертую — озеро Валкеаярви.

Содержание растворенной двуокиси углерода (CO_2) в озере Лещевое варьировало в диапазоне от среднего до высокого, что незначительно отличалось от большинства анализируемых озер. Концентрация CO_2 в них отмечена на среднем уровне. Наибольший диапазон значений этого параметра наблюдался в озере Большое Велькеалампи.

По активной реакции среды Лещевое озеро отличалось более широким диапазоном значений, занимая положение между ацидо-нейтральным и нейтрально-щелочным водоемами. Остальные озера Карелии были ацидо-нейтральными.

Фитопланктон Лещевого озера существенно отличался доминантными видами. Характерная для него активная вегетация *Aphanizomenon flos-aquae* и *Gonyostomum semen* в других озерах не наблюдалась. Доминантный комплекс в них был представлен в основном цианопрокариотами *Gleocapsa spp.*, *Anabaena flosaquae* (Lyngb.) Breb и *Merismopedia punctata* Meyen. Отсутствие в озерах северного побережья Ладожского озера крупноклеточного *Gonyostomum semen* объясняет невысокие значения биомассы фитопланктона (0,079—0,657 мг/дм^3). В то время как биомасса фитопланктона в Лещевом озере была 4,3 мг/дм^3, что фактически выше на порядок.

Видовой состав рачкового зоопланктона во всех сопоставляемых озерах был довольно сходным и представлен в основном эврибионтными видами: *Thermocyclops oithonoides* Sars, *Daphnia cristata* Sars. Численность зоопланктона в озере Лещевое не отличалась экстремальными значениями и находилась в диапазонах, зафиксированных для материковых озер Карелии (19,3—58,3 тыс. экз./м^3). Биомасса же была минимальной, ее значение не превышало 0,3 г/м^3. В других озерах эта величина не опускалась ниже 0,4 г/м^3.

Заключение

Из анализа системы «Лещевое озеро — протока — Лещевый залив» в июле 2018 г. следует, что наибольшей изменчивостью характеризовались следующие показатели: цветность, перманганатная окисляемость и электропроводность.

Характерной особенностью озера можно считать значительную вариабельность значений электропроводности и содержания углекислого газа в придонном горизонте, связанную с температурной стратификацией данного водоема в летние месяцы.

На основе проведенного анализа гидрохимических параметров Лещевое озеро относится к мезополигумозным водоемам — наиболее распространенным на архипелаге, что согласуется с более ранними данными [3]. Структура фито- и зоопланктона исследуемого озера также довольно типична для большинства водоемов Валаама [20, 21]. В озере доминируют цианопрокариоты и зеленые водоросли (по численности) и рафидофитовые (по биомассе). Общие значения как численности, так и биомассы довольно невысоки. Зоопланктон водоема характеризуется относительно высоким видовым разнообразием, выровненной таксономической структурой и высокой индивидуальной массой тела по сравнению с водоемами архипелага.

Сопоставление с малыми водоемами северного побережья Ладожского озера показало, что Лещевое озеро отличается более высокими значениями таких параметров, как цветность и перманганатная окисляемость, связанных с поступлением аллохтонного органического и неорганического вещества. Это, в первую очередь, связано с геологическими особенностями Валаамского архипелага. Кроме того, водосбор озера отличается повышенной заболоченностью, и в водоем поступает большой объем окрашенных гуминовых веществ. Также с регулярно распахиваемых полей постоянно поступают илистые частицы и коллоидная фракция, богатые органическим веществом. Для фитопланктона Лещевого озера были характерны более высокие значения биомассы, на порядок превосходящие биомассу в материковых водоемах Карелии. Это связано с активной вегетацией крупноклеточного вида рафидофитовых водорослей *Gonyostomum semen*.

Озеро имеет довольно сложную форму, а антропогенное воздействие зафиксировано только в западном заливе. Помимо этого, водоем отличается большой площадью водосбора, и процессы, протекающие на этой территории, как упоминалось ранее [7], оказывают значительное влияние на его экологическое состояние. Поэтому наблюдения за пространственным распределением исследованных параметров представляют определенную ценность. Они позволяют оценивать влияние на отдельные части озера как внутриводоемных процессов, так и стока с водосбора. Совместный анализ пространственной и временной изменчивости лимнологических параметров можно рассматривать как основное направление дальнейших исследований.

Список литературы

1. *Меншуткин В.В., Филатов Н.Н., Потахин М.С.* Экспертная система «Озера Карелии». 1. Порядковые и номинальные характеристики озер // Водные ресурсы. 2009. № 2. С. 160—171.
2. Озера Карелии. Справочник / Под. ред. Н.Н. Филатова, В.И. Кухарева. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2013. 464 с.
3. *Степанова А.Б., Шарафутдинова Г.Ф., Воякина Е.Ю.* Гидрохимические особенности малых озер о. Валаам // Ученые записки РГГМУ. 2010. № 12. С. 97—110.

4. *Гнатюк Е.П., Крышень А.М., Кузнецов О.Л.* Биогеографическая характеристика приграничной Карелии // Труды КарНЦ РАН. 2011. № 2. С. 12—22.
5. *Кучко А.А., Лазарева И.П., Морозова Р.М.* Валаам — феномен природы. Петрозаводск: Карелия, 1988. 108 с.
6. *Шешукова А.А., Шибина Т.Д., Матинян Н.Н.* Минеральный состав магматических почвообразующих пород острова Валаам // Вестник Санкт-Петербургского университета. 2006. Сер. 3. Вып. 1. С. 125—130.
7. Экосистемы Валаамского архипелага (Ладожское озеро) на рубеже 20 и 21 веков. Черты уникальности и современное состояние: Атлас / Под ред. А.Б. Степановой. СПб.: РГГМУ, 2016. 44 с.
8. *Боев А.С., Дмитриев Ф.А.* Оценка загрязненности почв и растительности о. Валаам нефтепродуктами и тяжелыми металлами // Ученые записки РГГМУ. 2012. № 25. С. 122—131.
9. *Кучко А.А., Белоусова Н.А., Кравченко А.В, Крутов В.И., Лазарева И.П., Морозова Р.М.* Экосистемы Валаама и их охрана. Петрозаводск: Карелия, 1989. 199 с.
10. *Алекин О.А., Семёнов А.Д., Скопинцев Б.А.* Руководство по химическому анализу вод суши. Л.: Гидрометеоиздат, 1973. 269 с.
11. Руководство по гидробиологическому мониторингу пресноводных экосистем / Под ред. В.А. Абакумова. СПб.: Гидрометеоиздат, 1992. 320 с.
12. *Hammer Ø., Harper D.A.T., Ryan P.D.* PAST: Paleontological statistics software package for education and data analysis // Palaeontologia Electronica. 2001. No. 4. P. 1–9.
13. *Ким Дж.-О., Мьюллер Ч.У., Клекка У.Р. и др*. Факторный, дискриминантный и кластерный анализ: пер. с англ. М.: Финансы и статистика, 1989. 215 с.
14. *Суханова М.П.* Анализ пространственных закономерностей изменчивости гидрохимических показателей малых рек в бассейнах с различными системами природопользования (на примере Белгородской области) // Успехи современного естествознания. 2016. № 4. С. 188—196.
15. *Прядко М.П., Голеусов П.В., Корнилов А.Г., Колмыков С.Н., Гордеев Л.Ю.* Анализ пространственно-временных закономерностей изменчивости гидрохимических показателей р. Болховец (притока р. Северский Донец) // Научные ведомости БелГУ. 2012. № 21. С 160—167.
16. *Гончаров А.В., Заславский М.Б., Исаев В.А. и др.* Типы кислородного режима рек бассейна Оби // География и природные ресурсы. 2013. № 3. С. 69—76.
17. *Китаев С.П.* Основы лимнологии для гидробиологов и ихтиологов. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2007. 395 с.
18. *Рогозин А.Г., Снитько Л.В., Тимошкин О.А.* Термоиндикаторные свойства зоопланктона и их измерение // Водные ресурсы. 2015. Т. 42, № 1. С. 85—91: doi: 10.7868/S0321059615010125.
19. *Андронникова И.Н.* Структурно-функциональная организация зоопланктона озерных экосистем разных трофических типов. СПб.: Наука, 1996. 189 с.
20. *Воякина Е.Ю.* Фитопланктон внутренних водоемов Валаамского архипелага и прилегающей акватории Ладожского озера: Автореф. дисс. … канд. биол. наук. СПб., 2007. 22 с.
21. *Степанова А.Б.* Зоопланктон внутренних водоемов Валаамского архипелага и прилегающей акватории Ладожского озера: Автореф. дисс. … канд. биол. наук. СПб., 1998. 19 с.
22. *Рыжков Л.П.* Озера бассейна Северной Ладоги. Петрозаводск: Изд-во Петрозаводского государственного университета, 1999. 380 с.

References

1. *Menshutkin V.V., Filatov N.N., Potahin M.S.* «Karelian lakes» expert system: 1. Ordinal and nominal characteristics of lakes. *Vodnye resursy.* Water resources. 2009, 2: 160—171. [In Russian].
2. *Ozera Karelii*. Lakes of Karelia. Petrozavodsk: Karelian research centre of RAS, 2013: 464 p. [In Russian].
3. *Stepanova A.B., SHarafutdinova G.F., Voyakina E.YU.* Hydrochemical features of Valaam Island small lakes. *Uchyonye zapiski RGGMU.* Scientific notes of RSHU. 2010, 12: 97—110. [In Russian].
4. *Gnatyuk E.P., Kryshen' A.M., Kuznecov O.L.* Near-border Karelia biogeographical characterictic. *Trudy KarNC RAN.* Proceedings of KarSC of RAS. 2011, 2: 12—22. [In Russian].

5. *Kuchko A.A., Lazareva I.P., Morozova R.M. Valaam — fenomen prirody.* Valaam — nature phenomenon. Petrozavodsk: Kareliya, 1988: 108 p. [In Russian].
6. *Sheshukova A.A., Shibina T.D., Matinyan N.N.* Mineral composition of magmatic mother rocks of Valaam island. *Vestnik Sankt-Peterburgskogo universiteta.* Herald of Saint Petersburg university. 2006, 1: 125—130. [In Russian].
7. *Ekosistemy Valaamskogo arhipelaga (Ladozhskoe ozero) na rubezhe 20 i 21 vekov. Cherty unikal'nosti i sovremennoe sostoyanie.* Valaam Archipelago (Lake Ladoga) ecosystems at the turn of the 20th and 21st centuries. Unique features and the current state. Saint Petersburg: RSHU, 2016: 44 p. [In Russian].
8. *Boev A.S., Dmitriev F.A.* Soils and plants contamination assessment from heavy metal and petroleum products pollution in Valaam island. *Uchyonye zapiski RGGMU.* Scientific notes of RSHU. 2012, 25: 122—131. [In Russian].
9. *Kuchko A.A., Belousova N.A., Kravchenko A.V, Krutov V.I., Lazareva I.P., Morozova R.M. Ekosistemy Valaama i ih ohrana.* Valaam ecosystems and their protection. Petrozavodsk: *Kareliya*, 1989: 199 p. [In Russian].
10. *Alekin O.A., Semyonov A.D., Skopincev B.A. Rukovodstvo po himicheskomu analizu vod sushi.* Manual for inland waters chemical analysis. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1973: 269 p. [In Russian].
11. *Rukovodstvo po gidrobiologicheskomu monitoringu presnovodnyh ekosistem.* Manual for freshwater ecosystems hydrobiological monitoring. Saint Petersburg: Gidrometeoizdat, 1992: 320 p. [In Russian].
12. *Hammer Ø., Harper D.A.T., Ryan P.D.* PAST: Paleontological statistics software package for education and data analysis. Palaeontologia Electronica. 2001, 4: 1—9.
13. *Kim Dzh.-O., M'yuller CH.U., Klekka U.R. Faktornyj, diskriminantnyj i klasternyj analiz.* Factor, discriminative and cluster analysis. Moscow: Finansy i statistika, 1989: 215 p. [In Russian].
14. *Sukhanova M.P.* The analysis of the spatial regularities of the small rivers hydrochemical characteristics variability in basins with various systems of the natural management (on example Belgorod region). *Uspekhi sovremennogo estestvoznaniya.* Advances in contemporary natural sciences. 2016, 4: 188—196. [In Russian].
15. *Pryadko M.P., Goleusov P.V., Kornilov A.G., Kolmykov S.N., Gordeev L.YU.* The analysis of space-time patterns of the hydrochemical indices variability of the Bolkhovetz river. *Nauchnye vedomosti BelGU.* Scientific bulletin of BelSU. 2012, 2: 160—167. [In Russian].
16. *Goncharov A.V., Zaslavskij M.B., Isaev V.A.* Oxygen regimen types of rivers of Ob river watershed. *Geografiya i prirodnye resursy.* Geography and natural resources. 2013, 3: 69—76. [In Russian].
17. *Kitaev S.P. Osnovy limnologii dlya gidrobiologov i ihtiologov.* Limnology basics for hydrobiologists and ichthyologists. Petrozavodsk: Karelian research centre of RAS, 2007: 395 p. [In Russian].
18. *Rogozin A.G., Snit'ko L.V., Timoshkin O.A.* Temperature-indicating characteristics of zooplankton and their measurement. *Vodnye resursy.* Water resources. 2015, 1: 160—171. [In Russian]. doi: 10.7868/S0321059615010125.
19. *Andronnikova I.N. Strukturno-funkcional'naya organizaciya zooplanktona ozernyh ekosistem raznyh troficheskih tipov.* Structural and functional zooplankton organization of different trophic types lake ecosystems. Saint Petersburg: Nauka, 1996: 189 p. [In Russian].
20. *Voyakina E.YU. Fitoplankton vnutrennih vodoemov Valaamskogo arhipelaga i prilegayushchej akvatorii Ladozhskogo ozera.* Phypoplankton of the inland water reservoirs of the Valaam archipelago and near Lake Ladoga water area. Saint Petersburg: Federal State Budget Scientific Institution "Russian Federal Research Institute of Fisheries and oceanography". 2007: 22 p. [In Russian].
21. *Stepanova A.B. Zooplankton vnutrennih vodoemov Valaamskogo arhipelaga i prilegayushchej akvatorii Ladozhskogo ozera.* Zooplankton of the inland water reservoirs of the Valaam archipelago and near Lake Ladoga water area. Limnology institute of RAS. 1998: 19 p. [In Russian].
22. *Ryzhkov L.P. Ozera bassejna Severnoj Ladogi.* Lakes of the North Ladoga watershed. Izd-vo Petrozavodskogo gosudarstvennogo universitet, 1999: 380 p. [In Russian].

Конфликт интересов: конфликт интересов отсутствует.

Статья поступила 15.04.2020
Принята после доработки к публикации 27.06.2020

Сведения об авторах

Чернышев Александр Николаевич, магистрант, Российский государственный гидрометеорологический университет, chernyshev.alexander2015@yandex.ru.

Сергеева Вероника Олеговна, магистрант, Российский государственный гидрометеорологический университет, sergeevaveronika@bk.ru.

Котова Анастасия Константиновна, магистрант, Российский государственный гидрометеорологический университет, nasty-1255@mail.ru.

Никитина Светлана Николаевна, магистрант, Российский государственный гидрометеорологический университет, svetansn@yandex.ru.

Бабин Александр Валерьевич, старший преподаватель кафедры прикладной и системной экологии, Российский государственный гидрометеорологический университет, alex-babin@yandex.ru.

Воякина Екатерина Юрьевна, канд. биол. наук, доцент кафедры прикладной и системной экологии, Российский государственный гидрометеорологический университет, katerina.voyakina@gmail.com.

Степанова Анастасия Борисовна, канд. биол. наук, доцент кафедры прикладной и системной экологии, начальник Учебно-научной станции на о. Валаам, Российский государственный гидрометеорологический университет, ab-stepanova@yandex.ru.

Information about authors

Chernyshev Alexandr Nikolaevich, master student, Russian State Hydrometeorological University.

Sergeeva Veronika Olegovna, master student, Russian State Hydrometeorological University.

Kotova Anastasiya Konstantinovna, master student, Russian State Hydrometeorological University.

Nikitina Svetlana Nikolaevna, master student, Russian State Hydrometeorological University.

Babin Aleksandr Valer'evich, senior teacher, Department of Applied and Systems Ecology, Russian State Hydrometeorological University.

Voyakina Ekaterina YUr'evna, PhD (Biol. Sci.), Associate Professor, Department of Applied and Systems Ecology, Russian State Hydrometeorological University.

Stepanova Anastasiya Borisovna, PhD (Biol. Sci.), Associate Professor, Department of Applied and Systems Ecology, Head of Education and Scientific Station "Valaam", Russian State Hydrometeorological University.