

УДК 556.555 : 574.55:504.61(282.247.211.1)

ИЗМЕНЕНИЕ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА ВОД ОЗЕРА ВЕДЛОЗЕРО И ОТДЕЛЬНОГО ЕГО ЗАЛИВА В РЕЗУЛЬТАТЕ АНТРОПОГЕННОГО ЭВТРОФИРОВАНИЯ

А. В. Сабылина, Т. А. Ефремова*

*Институт водных проблем Севера КарНЦ РАН, ФИЦ «Карельский научный центр РАН»
(пр. А. Невского, 50, Петрозаводск, Республика Карелия, Россия, 185030),
efremova.nwpi@mail.ru

Озеро Ведлозеро является аккумулирующей системой многопланового антропогенного воздействия. В его бассейне начиная с 70-х годов прошлого столетия произошли значительные изменения ландшафтной структуры водосборов рек и ручьев в юго-восточной и западной частях озера. Сведение лесов, распашка и мелиорация земель – все это обогатило озерные воды биогенными и органическими веществами. В воды северо-восточного залива озера поступает значительное количество сточных вод поселка Ведлозеро и воды р. Вохтозерки, водосбор которой освоен в сельскохозяйственном отношении. Высокие среднегодовые концентрации общего фосфора 47–173 мкг/л в воде залива обуславливают постоянное цветение воды в период открытой воды. В водах залива интенсивно развиваются сине-зеленые водоросли (цианобактерии *Synechocystis* sp.), которые при жизни выделяют токсичные вещества (нейро-, гепато- и дерматотоксины), опасные для людей и животных. Массовое развитие цианобактерий в воде северо-восточного залива оз. Ведлозеро в летний период стало вызывать у купающихся жителей пос. Ведлозеро, особенно у детей, поражение кожного покрова – аллергический дерматит.

Ключевые слова: озеро Ведлозеро; антропогенное эвтрофирование; цветение воды; органическое вещество; биогенные элементы; минерализация; кислород; рН воды

Для цитирования: Сабылина А. В., Ефремова Т. А. Изменение химического состава вод озера Ведлозеро и отдельного его залива в результате антропогенного эвтрофирования // Труды Карельского научного центра РАН. 2022. № 8. С. 20–30. doi: 10.17076/esc01718

Финансирование. Финансовое обеспечение исследований осуществлялось из средств федерального бюджета на выполнение государственного задания КарНЦ РАН (Институт водных проблем Севера КарНЦ РАН).

A. V. Sabylina, T. A. Efremova*. CHANGES IN WATER CHEMICAL COMPOSITION IN LAKE VEDLOZERO AND ONE OF ITS BAYS AS A RESULT OF ANTHROPOGENIC EUTROPHICATION

Northern Water Problems Institute, Karelian Research Centre, Russian Academy of Sciences (50 Al. Nevsky Ave., 185030 Petrozavodsk, Karelia, Russia), *efremova.nwpi@mail.ru

Lake Vedlozero is an accumulating system of a variety of anthropogenic impacts. Since the 1970s, significant changes have occurred in the landscape structure of stream catchments in the southeastern and western parts of the lake's drainage basin. Deforestation, conversion to arable land and drainage have enriched the lake water with nutrients and organic matter. The northeastern bay of the lake receives substantial amounts of wastewater from the village of Vedlozero and water from the River Vokhtozerkka, affected by agriculture in the catchment. High average annual concentrations of total phosphorus (47–173 µg/l) in the water of the bay cause continuous blooming during the open water period. Blooming intensively in the bay, blue-green algae (cyanobacteria) release toxic substances (neuro-, hepato-, and dermatotoxins) dangerous for humans and animals. Massive development of cyanobacteria in the northeastern bay of Lake Vedlozero in summer now causes skin disorders, specifically allergic dermatitis, in Vedlozero village inhabitants (especially children) who swim in the lake.

Keywords: Lake Vedlozero; anthropogenic eutrophication; algal blooms; organic matter; nutrients; total dissolved solids; oxygen; water pH

For citation: Sabylina A. V., Efremova T. A. Changes in water chemical composition in Lake Vedlozero and one of its bays as a result of anthropogenic eutrophication. *Trudy Karel'skogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of the Karelian Research Centre RAS*. 2022. No. 8. P. 20–30. doi: 10.17076/eco1718

Funding. The study was financed from the Russian federal budget through government assignment to KarRC RAS (Northern Water Problems Institute KarRC RAS).

Введение

Озеро Ведлозеро – мезотрофный водоем в южной части Карелии [Озера..., 2013]. Его водосбор хорошо освоен в хозяйственном отношении. Здесь высокая плотность населения, развито сельское хозяйство. Озеро используется для водоснабжения, рекреации, рыбного промысла. Современное состояние экосистемы оз. Ведлозеро, сформировавшееся в результате взаимодействия природных процессов, развивающихся в водной среде и на водосборе озера, находится под повышенным влиянием антропогенной нагрузки. Особенное воздействие испытывает экосистема его северо-восточной части, где располагается поселок Ведлозеро и куда впадает р. Вохтозерка. В реку из очистных сооружений поступают сточные воды поселка, а в 70-е годы прошлого века прибрежную территорию озера соединили с островом дамбой, что резко изменило здесь гидрологический режим. В результате этой постройки появился искусственно созданный залив, мелководный и непроточный. Воды залива подвержены интенсивному цветению вследствие увеличения концентрации сине-зеленых водорослей (цианобактерий), ко-

торые при жизни выделяют токсичные вещества, опасные для людей и животных. Массовое развитие цианобактерий в воде северо-восточного залива оз. Ведлозеро в летний период стало вызывать у купающихся жителей пос. Ведлозеро, особенно у детей, поражение кожного покрова – аллергический дерматит. Цианобактерии продуцируют опасные для жизни нейро-, гепато- и дерматотоксины [Белых и др., 2013; Румянцев и др., 2022]. Употребление воды цветущего залива в питьевых целях стало опасно для жителей и домашнего скота. Токсический эффект воды может привести к гаффской (юксовской) болезни, которая как раз проявляется в районах умеренной климатической зоны (Юксовское озеро в Ленинградской области, Сартланское – в Новосибирской и Котокель – в Республике Бурятия). Цианотоксины сложно устранить как термической обработкой, так и длительным хранением при минусовой температуре [Лудупова и др., 2009]. Наблюдающееся с 1989 г. устойчивое повышение температуры воздуха в южной части Карелии [Назарова, 2015] способствует развитию в летне-осенний период токсичных цианобактерий, что усугубляет экологическое состояние озера Ведлозеро.

Целью настоящей работы является исследование химического состава воды оз. Ведлозеро и его северо-восточного залива, находящихся под влиянием природной и антропогенной нагрузки.

Объекты и методы исследования

Озеро Ведлозеро расположено на водосборе р. Видлицы – притока Ладожского озера. В озеро впадают реки Няльма и Вохтозерка (Вухтанеги) и несколько ручьев. Площадь озера – 58 км², площадь водосбора – 564 км², показатель условного водообмена – 1,6 год⁻¹. Средняя глубина озера 7 м, максимальная – 14,6 м.

Характеристика современного химического состава вод оз. Ведлозеро и притока р. Вохтозерка приводится по результатам исследований, выполненных на пяти станциях во все гидрологические сезоны (зима, весна, лето, осень) 2021 г. (рис.). Станция 1 располагалась в изолированном дамбой заливе в 50 м от бе-

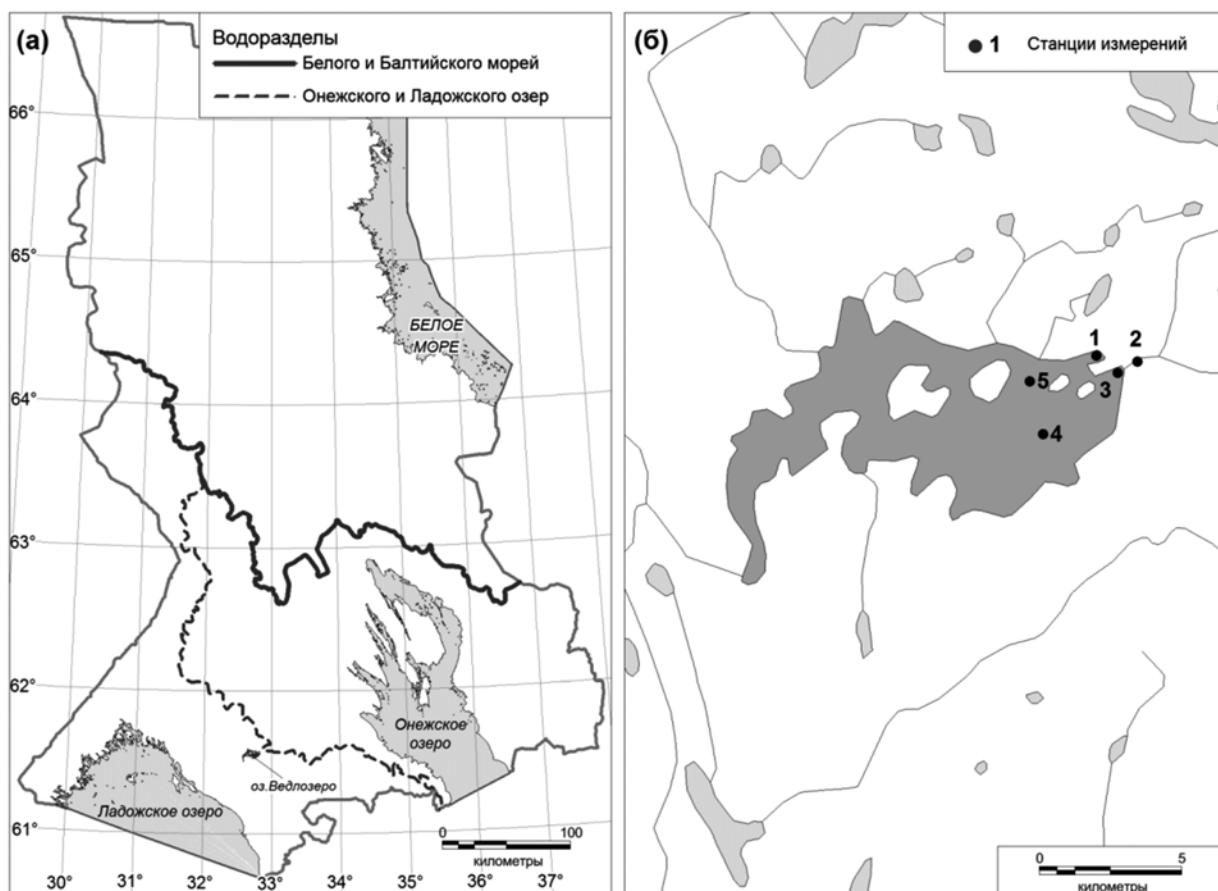
рега, на глубине около 1,5 м. Станция 2 – в р. Вохтозерка вблизи ее впадения в оз. Ведлозеро. Станция 3 находилась вблизи устья р. Вохтозерка в 50 м от берега, глубина станции 1,7 м. Станция 4 располагалась в центральной глубоководной части озера в весенний период на глубине 7 м. Станция 5 находилась также в центральной глубоководной части озера между островами (глубина 8 м) в летний и осенний периоды. Пробы воды отбирались со стандартных горизонтов (0,5; 2,0; 5,0 и т. д.).

Химический анализ воды проводили по следующим показателям:

1. Минерализация, электропроводность и ионный состав воды (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , HCO_3^- , SO_4^{2-} , Cl^-).

2. Органическое вещество (ОВ): цветность, перманганатная окисляемость (ПО), химическое потребление кислорода (ХПК), биохимическое потребление кислорода за 5 суток (БПК₅).

3. Биогенные элементы: $\text{P}_{\text{общ}}$, $\text{P}_{\text{мин}}$, NH_4^+ , NO_2^- , NO_3^- , $\text{N}_{\text{орг}}$, Si, Fe, Mn.



Расположение оз. Ведлозеро на карте Карелии (а), схема отбора проб воды в оз. Ведлозеро в 2021 г. (б)
Location of Lake Vedlozero on the map of Karelia (a) and the scheme of the water sampling stations in Lake Vedlozero in 2021 (b)

4. pH воды, взвешенное вещество.

5. Загрязняющие вещества: нефтепродукты.

При выполнении химических анализов использовали методы, описанные в пособии [Аналитические..., 2017]. Щелочность (Alk, мг-экв/л) определялась потенциометрическим методом с двухточечным титрованием до pH 4,5 и 4,2; Na⁺ и K⁺ – пламенно-фотометрическим; Ca²⁺ и Mg²⁺ – атомно-абсорбционным; SO₄²⁻ – фотометрическим с хлоридом бария и сульфазо III; Cl⁻ – фотометрическим с тиоцианатом ртути и нитратом железа (III); NH₄⁺ – фотометрическим индофенольным; NO₃⁻ – восстановлением на кадмиевом редуторе и с последующим анализом нитритов с сульфаниламидом и N-(1-нафтил)-этилендиамина дигидрохлоридом; N_{общ} – персульфатным окислением в щелочной среде; Fe_{общ} – атомно-абсорбционным; P_{общ} – персульфатным окислением и последующим анализом фосфора минерального; P_{мин} – фотометрическим методом Морфи и Райли; нефтепродукты – экстракционно-хроматографическим ИК-спектрометрическим методом; взвешенное вещество – гравиметрическим; Si – фотометрическим методом в виде желтой кремниймолибденовой гетерополиокислоты.

В работе применялись ПДК для водоемов рыбохозяйственного назначения [Нормативы..., 2016].

Результаты и обсуждение

В настоящее время трофический статус водоема принято оценивать по концентрации общего фосфора. Именно за счет увеличения его концентрации происходит рост биопродуктивности водоема.

Сезонные исследования химического состава воды проведены на главном притоке оз. Ведлозеро – **р. Вохтозерка**. Амплитуда сезонных колебаний минерализации воды этой реки выражена и составляет от 25,5 мг/л в весеннее половодье до 58,8 мг/л в осенний паводок (табл. 1). Во все сезоны года речная вода относится к гидрокарбонатному классу (доля HCO₃⁻ – 79,2 % экв), группе кальция (в среднем – 43,7 % экв). Косвенные показатели органического вещества (ОВ) – цветность, перманганатная окисляемость, ХПК и БПК₅ – претерпевают значительные изменения (табл. 2). Наибольшие величины цветности, ПО и величин ХПК приходятся на период весеннего половодья. ОВ в воде реки стойкое к биохимическому окислению; величины БПК₅ колеблются от 0,8 до 1,6 мгO₂/л, отношение ПО : ХПК колеблется от 36 до 71 % в течение года.

Главную роль в формировании химического состава вод оз. Ведлозеро играют воды р. Вохтозерка, в которую сбрасываются недостаточ-

Таблица 1. Минерализация и ионный состав воды р. Вохтозерка в 2021 г. (ст. 2)

Table 1. Mineralization and ionic composition of water in the Vokhtozzerka River in 2021 (St. 2)

Дата отбора Date	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Na ⁺	HCO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	Cl ⁻	Σ _и	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Na ⁺	HCO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	Cl ⁻
	мг/л mg/l								% экв % equiv.						
02.03	5,6	2,4	0,9	3,3	33,7	1,0	2,5	49,4	43,4	30,7	3,6	22,3	85,8	3,2	11,0
14.05	3,1	1,3	0,9	2,4	14,9	1,1	1,8	25,5	39,8	27,5	5,9	26,8	76,8	7,2	16,0
13.07	5,8	2,5	0,7	2,2	13,2	0,9	2,5	27,8	47,6	33,8	2,9	15,7	70,8	6,1	23,1
30.09	7,9	3,4	1,2	4,4	37,3	1,3	3,3	58,8	44,0	31,2	3,4	21,4	83,6	3,7	12,7

Таблица 2. Показатели содержания органических веществ, кислорода и величины pH в воде р. Вохтозерка в 2021 г.

Table 2. Indicators of organic matter, oxygen content and pH in the water of the Vokhtozzerka River in 2021

Дата отбора Date	Цв., град. Color, PCU*	ПО COD _{Mn}	ХПК COD _{Cr}	БПК ₅ , мг O ₂ /л BOD ₅ , mg O ₂ /l	O ₂ , мг/л mg/l	O ₂ , %	pH	ПО : ХПК, % COD _{Mn} : COD _{Cr} , %
		мгO/л mgO/l						
02.03	61	8,5	23,4	1,3	9,2	63	6,59	36
14.05	105	14,4	32,1	1,1	8,6	79	6,71	45
13.07	60	13,0	18,3	1,6	6,1	58	6,95	71
30.09	67	11,8	27,1	0,8	8,3	69	6,89	43

Примечание. * Здесь и далее PCU – Platinum Color Units.

Note. * Here and further PCU – Platinum Color Units.

но очищенные коммунально-бытовые сточные воды пос. Ведлозеро. Содержание минерального фосфора в воде северо-восточного залива в период зимней стагнации достигает очень высоких величин – 120 мкг/л, а нитратного азота – 0,21 мг/л, что благоприятствует высокой биологической продуктивности вод залива в период открытой воды. Сезонные изменения содержания минерального фосфора в воде р. Вохтозерка выраженные: максимум наблюдается летом и осенью, причем осенний больше, чем летний (табл. 3). В эти периоды он в значительной степени поступает с селитебной территории п. Ведлозеро и с сельскохозяйственных угодий, находящихся на водосборе реки. Среднегодовое содержание общего фосфора в воде реки очень высокое и составляет 89 мкг/л. Максимальное его содержание отмечено в период зимней межени (см. табл. 3).

Внутригодовое изменение концентраций аммонийного азота в отличие от нитратного наиболее выражено в речных водах. Содержание его изменяется в пределах 0,01–0,17 мг/л. Наиболее высокие концентрации определены летом (см. табл. 3). Условия среды (низкий процент насыщения воды кислородом – 58 %) способствуют отставанию скорости процесса нитрификации от скорости аммонификации. Содержание нитратного азота в воде реки низкое:

0,02–0,07 мг/л. Максимальные его концентрации обнаружены осенью (см. табл. 3).

Концентрация общего железа в воде р. Вохтозерка колеблется в узких пределах – от 0,7 до 1,3 мг/л с летне-осенним максимумом его концентрации. Содержание растворенного кремния в речных водах в течение года варьирует от 2,9 до 5,2 мг/л (см. табл. 3). Низкие концентрации кремния приурочены к половодью.

Воды р. Вохтозерка постоянно имеют дефицит кислорода от 21 до 42 % (см. табл. 2). Наибольший дефицит кислорода наблюдается в летний и зимний период. Величина рН воды в реке в течение года нейтральная – 6,59–6,95. Она минимальна в зимнюю межень.

Химический состав воды оз. Ведлозеро.

Формирование химического состава воды озера происходит в условиях слабой растворимости коренных пород (граниты, гнейсо-граниты и др.), хорошо промытых четвертичных отложений и значительного количества атмосферных осадков (среднее 630 мм в год). Эти факторы обуславливают низкую минерализацию вод оз. Ведлозеро ($\Sigma_{и} < 100$ мг/л; табл. 4). Среднегодовая концентрация суммы главных ионов, по данным 2021 г., составляет 23,6 мг/л. По ионному составу вода относится к гидрокарбонатному классу. На долю HCO_3^- в анионном составе воды приходится в среднем 74,4 % экв.

Таблица 3. Содержание биогенных элементов в воде р. Вохтозерка в 2021 г.

Table 3. Nutrients content in the Vokhtozerka River in 2021

Дата отбора Date	Р _{мин} ³ мкг/л Р _{мин} ³ µg/l	Р _{общ} ³ мкг/л TP, µg/l	NH ₄ ⁺	NO ₃ ⁻	N _{орг} N _{орг}	N _{общ} TN	Fe _{общ} ³ мг/л Fe _{tot} ³ mg/l	Si, мг/л mg/l
02.03	38	124	0,01	0,07	0,22	0,3	0,7	4,8
14.05	36	66	0,03	0,03	0,37	0,43	0,8	2,9
12.07	55	77	0,17	0,04	0,25	0,46	1,2	3,3
30.09	69	87	0,09	0,02	0,33	0,44	1,3	5,2

Таблица 4. Среднесезонная концентрация главных ионов в оз. Ведлозеро в 2021 г. (ст. 1, 3, 4, 5).

Table 4. Seasonal concentration (mean values) of the main ions in Lake Vedlozero in 2021 (St. 1, 3, 4, 5)

Дата отбора Date	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Na ⁺	HCO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	Cl ⁻	Σ _и	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Na ⁺	HCO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	Cl ⁻
	мг/л mg/l								% экв % equiv.						
02.03	3,1	1,4	0,7	2,3	12,5	1,0	1,7	22,7	39,9	29,7	4,6	25,8	74,9	7,6	17,5
14.05	2,8	1,3	0,6	2,1	13,9	1,4	1,7	23,8	39,5	30,3	4,4	25,8	74,7	9,6	15,7
13.07	3,1	1,4	0,6	2,1	13,5	1,7	1,7	24,1	41,1	30,6	4,1	24,3	72,6	11,6	15,7
30.09	3,3	1,4	0,7	2,4	13,4	1,7	1,3	24,2	41,0	28,6	4,5	26,0	75,3	12,1	12,6

Ион кальция – доминирующий в катионной группе (40,4 % экв). Минерализация воды озера Ведлозеро в настоящее время изменилась мало и близка к минерализации вод, исследованных в середине 80-х годов XX века [Озера..., 2013].

Органическое вещество. По содержанию ОВ (в период открытой воды: цветность – 76 град., ПО – 14,4 мгО/л, ХПК – 34,2 мгО/л) озеро соответствует мезогумусному типу (табл. 5) [Лозовик, 2006].

Новообразование ОВ в водоеме за счет интенсивной фотосинтетической деятельности фитопланктона наиболее выражено в весенне-летний период в районе дамбы (ст. 1). Так, величины ХПК и БПК₅ в июле очень высокие

и составляли соответственно 61,3 мгО/л и 7,51 мгО₂/л, что в два раза выше, чем в период половодья (табл. 6). Высока обеспеченность вод в этом районе озера биогенными элементами в зимнюю межень: содержание минерального фосфора очень высокое – 120 мкг/л, нитратного азота – 0,21 мг/л, благоприятствует биологической продуктивности (табл. 7). В результате интенсивных фотосинтетических процессов в слое 0,5 м наблюдалось летом: перенасыщение кислородом – до 123 %, возрастание величин БПК₅ – до 7,51 мгО₂/л, ХПК – до 61,3 мгО/л, рН – до 8,39. По содержанию ХПК, БПК₅ и величине цветности вода в районе дамбы (ст. 1, 3) не соответствует требованиям ПДК для рыбохозяйственных водоемов (см. табл. 6).

Таблица 5. Показатели содержания ОВ в воде оз. Ведлозеро в 2021 г. (ст. 4, 5)

Table 5. Parameters of content organic matter in the water of Lake Vedlozero in 2021 (St. 4, 5)

Дата отбора Date	Горизонт Water horizon	Цв., град. Color, PCU	ПО COD _{Mn}	ХПК COD _{Cr}	C _{орг} , мг/л ТОС, mg/l	БПК ₅ , мгО ₂ /л BOD ₅ , mgO ₂ /l	Нефтепродукты, мг/л Total petroleum hydrocarbons, mg/l
			мгО/л mgO/l				
14.05	Поверхностный Surface	101	14,0	34,8	13,1	1,20	0,10
	Придонный Near-bottom	103	14,8	32,5	12,2	1,45	0,11
13.07	Поверхностный Surface	78	15,4	49,6	18,6	2,10	0,11
	Придонный Near-bottom	81	13,0	30,3	11,4	1,66	0,11
30.09	Поверхностный Surface	61	12,6	32,9	12,3	0,73	0,18
	Придонный Near-bottom	61	12,6	31,6	11,9	0,78	0,18

Таблица 6. Показатели содержания ОВ, кислорода и величин рН в районе дамбы (ст. 1, 3) в оз. Ведлозеро в 2021 г.

Table 6. Parameters of organic matter, oxygen content and water pH in the area of the dam (St. 1, 3) in Lake Vedlozero in 2021

Дата отбора Date	Цв., град. Color, PCU	ПО COD _{Mn}	ХПК COD _{Cr}	БПК ₅ , мгО ₂ /л BOD ₅ , mgO ₂ /l	O ₂ , мг/л mg/l	O ₂ , %	рН
		мгО/л mgO/l					
02.03	101	15,6	36,3	1,23	10,7	73	6,55
14.05	82	13,6	32,1	2,12	11,6	106	7,38
13.07	77	18,2	61,3	7,51	9,8	123	8,39
30.09	55	15,4	53,1	5,35	11,3	97	7,02
ПДК для рыбо- хозяйственных водоемов MPC substances for fishery water	20	10,0	-	2,00	6,0	-	-

Показатели содержания ОВ в центре озера на ст. 4 в период весенней гомотермии выравнены по вертикали. В период летней межени в результате интенсивного фотосинтеза фитопланктона в поверхностном слое воды наблюдались: небольшое перенасыщение кислородом (до 104 %), низкое содержание CO₂ (0,77 мг/л), увеличение pH воды до 7,78. Концентрация O₂ снизилась от 8,2 в поверхностном слое до 3,4 мг/л в придонном вследствие расхода его на деструкцию новообразованного ОВ (табл. 8). В летний период средние значения БПК₅ (2,10 мгO₂/л) максимальные в году.

Осенью с установлением гомотермии глубинные слои воды в озере вовлекаются в общую циркуляцию, химический состав воды выравнивается по вертикали. В теплую осень 2021 г. в районе дамбы, где циркуляция воды замедлена, фотосинтетические процессы фито-

планктона шли интенсивно, о чем свидетельствуют высокие величины деструкции органического вещества – БПК₅ равно 5,35 мгO₂/л.

Загрязнение воды озера Ведлозеро нефтепродуктами максимально в северо-восточном заливе. Концентрация их в весенне-летний период составляет 0,10–0,11, в осенний – 0,18 мг/л (ПДК для рыбохозяйственных водоемов 0,05 мг/л). В центральном плесе озера (ст. 4) содержание нефтепродуктов в период открытой воды равно 0,10–0,11 мг/л.

Биогенные и литофильные элементы.

Важнейшим фактором, определяющим биопродуктивность водной экосистемы, является содержание биогенных (N, P) и литофильных (Si, Fe, Mn и др.) элементов.

Концентрация общего фосфора в период открытой воды в центральном плесе оз. Ведлозеро изменяется в пределах 36–90 мкг/л

Таблица 7. Показатели содержания биогенных веществ в поверхностном слое воды в районе дамбы (ст. 1) в оз. Ведлозеро в 2021 г.

Table 7. Parameters of nutrients content in surface water in the area of dam (St. 1) in Lake Vedlozero in 2021

Время отбора Date	Азот, мг/л Nitrogen, mg/l				Фосфор, мкг/л Phosphorus, µg/l		Fe _{общ} , мг/л Fe _{от} , мг/л	Si, мг/л mg/l
	NH ₄ ⁺	NO ₃ ⁻	N _{орг} N _{орг}	N _{общ} TN	P _{мин} P _{мин}	P _{общ} TP		
2.03	0,01	0,21	0,29	0,51	120	120	0,34	2,70
14.05	0,05	0,02	0,46	0,51	6	47	0,30	0,45
12.07	0,05	0,00	1,27	1,32	5	84	0,41	1,52
30.09	0,04	0,00	1,24	1,28	20	173	0,45	0,09

Таблица 8. Пределы колебаний величин pH, содержания диоксида углерода и кислорода в поверхностных и придонных слоях воды оз. Ведлозеро в период открытой воды (ст. 4, 5)

Table 8. Variation in water pH, carbon dioxide and oxygen content in the surface and near-bottom water horizons of Lake Vedlozero in the open water period (St. 4, 5)

Время отбора Date	Горизонт Water horizon	pH		CO ₂ , мг/л mg/l		O ₂			
		Мин. Min	Макс. Max	Мин. Min	Макс. Max	мг/л mg/l		%	
						Мин. Min	Макс. Max	Мин. Min	Макс. Max
14.05	Поверхностный Surface	6,98	7,38	1,5	3,1	10,8	11,6	86	106
	Придонный Near-bottom	6,97	-	2,9	3,1	10,6	10,8	86	91
13.07	Поверхностный Surface	7,25	8,39	0,77	10,8	8,2	9,8	104	123
	Придонный Near-bottom	6,73	6,95	1,98	6,49	3,4	-	37	-
30.09	Поверхностный Surface	6,94	7,02	4,40	4,84	9,4	11,3	78	97
	Придонный Near-bottom	6,97	6,97	4,40	4,49	9,1	9,1	78	78

(в среднем 56 мкг/л), в северо-восточном районе (залив возле дамбы) – 47–173 мкг/л (в среднем 78 мкг/л).

Как показали исследования Института озераведения РАН по ряду озер Латгальской возвышенности (Латвия) и Ленинградской области, если большую часть года средние концентрации $P_{\text{общ}}$ выше 30 мкг/л, то они стимулируют развитие фитопланктона, если выше 100 мкг/л (критическая концентрация), то они угнетающе действуют на водоросли, нарушается сбалансированность экосистемы. В водоемах, где концентрация общего фосфора равна критической или приближается к ней, первичная продукция усваивается гетеротрофными организмами на 40–60 % [Геринг, 1976; Алекин и др., 1985; Савенко, Савенко, 2007].

По заключению Sayer [1947], основанному на большом количестве натуральных данных по североамериканским озерам штата Висконсин, летнее цветение воды становится вероятным, если концентрация минерального фосфора к концу зимней стагнации равняется 10–20 мкг/л. В озере Ведлозеро к концу зимней стагнации в северо-восточном заливе в районе дамбы (ст. 1) концентрация минерального фосфора ($P_{\text{мин}}$) в воде достигает 120 мкг/л и составляет 100 % от $P_{\text{общ}}$ (табл. 7), что и обуславливает активное цветение воды в вегетационный период года. В конце сентября 2021 г. концентрации $P_{\text{общ}}$ в районе дамбы были выше критических и составляли 178 мкг/л. Содержание $P_{\text{общ}}$ выше 160 мкг/л тормозит биологические процессы [Алекин и др., 1985; Гусаков, 1987; Савенко, Савенко, 2007].

В летнюю межень в поверхностных слоях воды центрального плеса озера фосфаты полностью потребляются фитопланктоном. Перенасыщение воды кислородом изменяется от 104 до 123 %, величины pH воды – от 7,23 до 8,39. В период осенней гомотермии концентрация $P_{\text{мин}}$ повышается в поверхностных слоях воды до 41 мкг/л, в придонных – до 48 мкг/л, а доля $P_{\text{мин}}$ составляет соответственно 46 и 63 % от $P_{\text{общ}}$ (табл. 9).

Азот является вторым компонентом, влияющим на продукционные процессы в водоеме. Нитратный азот поступает в водоем с речным стоком, атмосферными осадками и в результате бактериальной трансформации соединений азота при деструкции и минерализации автохтонного и аллохтонного ОВ.

Концентрация нитратного азота в конце зимней межени определялась только в воде в районе дамбы (ст. 1) и равнялась 0,21 мг/л. В весенний период нитрат-ионы начинают активно ассимилироваться развивающимся фитопланктоном; концентрация их в воде в районе дамбы уменьшается в 10 раз (см. табл. 7). В летний и осенний периоды в поверхностных слоях этого участка озера отсутствуют нитраты, но это не полное их исчезновение, а лишь отставание скорости процесса нитрификации от скорости их ассимиляции, так как поверхностные слои воды перенасыщены кислородом до 123 %.

Концентрация аммонийного азота в оз. Ведлозеро в районе дамбы в зимний период невысокая (0,01 мг/л), и он не накапливается, потому что параллельно процессу аммонификации

Таблица 9. Показатели содержания биогенных веществ в поверхностном и придонном слоях воды в оз. Ведлозеро (ст. 4, 5) в 2021 г.

Table 9. Parameters of nutrients content in surface and near-bottom horizons in Lake Vedlozero in 2021

Время отбора Date	Горизонт Water horizon	Азот, мг/л Nitrogen, mg/l				Фосфор, мкг/л Phosphorus, µg/l		$Fe_{\text{общ}}$, мг/л Fe_{tot} , mg/l	Si, мг/л mg/l
		NH_4^+	NO_3^-	$N_{\text{орг}}$ $N_{\text{орг}}$	$N_{\text{общ}}$ TN	$P_{\text{мин}}$ $P_{\text{мин}}$	$P_{\text{общ}}$ TP		
14.05	Поверхностный Surface	0,05	0,09	0,42	0,56	18	45	0,43	2,56
	Придонный Near-bottom	0,05	0,07	0,40	0,52	20	47	0,43	2,10
12.07	Поверхностный Surface	0,02	0,00	0,64	0,66	0	36	0,25	1,42
	Придонный Near-bottom	0,07	0,01	0,50	0,58	16	45	0,40	1,91
30.09	Поверхностный Surface	0,05	0,03	0,47	0,55	41	90	0,48	1,28
	Придонный Near-bottom	0,07	0,02	0,37	0,47	48	76	0,54	1,28

идет процесс окисления аммония нитрифицирующими бактериями. Условия среды (содержание O_2 10,6 мг/л, pH 7) способствуют окислению аммиака до нитратов. В период открытой воды содержание аммонийного азота в воде этого участка озера небольшое и в среднем равняется 0,05 мг/л (см. табл. 7).

В центральном плесе озера в летнее время в поверхностном слое воды концентрация аммонийного азота низкая – 0,02 мг/л. Потребление его фитопланктоном увеличивается при отсутствии нитратов. Максимальные концентрации аммонийного азота приурочены к придонным слоям глубоководных районов озера, где обнаружен дефицит O_2 (63 %) и идет процесс отдачи (диффузии) ионов аммония из донных отложений (см. табл. 9).

Преобладающей формой азота в исследуемом водоеме в течение года является органическая форма. Концентрация его в воде в районе дамбы колеблется в пределах 0,29–1,27, в центральном плесе озера – 0,37–0,64 мг/л. Содержание органического азота в северо-восточном районе озера в открытый период года очень высокое и составляет 90–97 % от общего азота. В центральном плесе озера его концентрация меньше – 76–82 %.

Содержание растворенного кремния в воде в районе дамбы составляет 0,09–2,70 мг/л, в центральном плесе озера – 1,28–2,56 мг/л (см. табл. 7, 9). Главным источником поступления кремния в водоем является речной сток (ст. 2). В конце зимней стагнации в воде в районе дамбы концентрация растворенного кремния высокая – 2,70 мг/л, в весенний и осенний сезоны она снижается до 0,45 и 0,09 мг/л, что свидетельствует об увеличении биогенного извлечения его диатомовым планктоном и является одним из признаков антропогенного эвтрофирования. Часть SiO_2 изымается из круговорота и захоранивается в осадках.

Содержание общего железа ($Fe_{общ}$) в воде оз. Ведлозеро в районе дамбы изменяется от 0,30 до 0,45, в открытом плесе озера – от 0,25 до 0,54 мг/л (см. табл. 7, 9). В начале марта концентрация $Fe_{общ}$ в воде в районе дамбы составляет 0,34 мг/л. В весеннее половодье содержание $Fe_{общ}$ в открытом плесе озера равняется 0,43 мг/л, в районе дамбы – 0,30 мг/л. К концу сентября концентрация общего железа возрастает в центре озера в среднем до 0,52, а в районе дамбы до 0,45 мг/л, что связано с увеличением поверхностного стока, понижением pH среды до 7 и повышением концентрации свободной двуокиси углерода до 4,5 мг/л.

Газовые условия и pH воды. Кислородные условия в озере тесно связаны с уровнем биопродуктивности и являются хорошим его индикатором.

В период исследования кислородные условия были благоприятными: в поверхностных слоях воды концентрация кислорода составляла 8,2–9,8 мг/л (63–128 % насыщения), в придонных слоях снижалась до 3,4 мг/л (37 % насыщения).

Весенняя циркуляция водных масс, происходящая при низких температурах воды, приводит к довольно равномерному распределению кислорода по глубине. Насыщение воды кислородом в этот период в среднем равно 96 % (см. табл. 8).

В летний период процессы фотосинтеза фитопланктона обогащают растворенным кислородом поверхностные слои воды. В результате развития фотосинтетических организмов (фотоавтотрофов) в районе дамбы в поверхностном слое воды полностью потребляется диоксид углерода, активная реакция среды увеличивается до 8,39, появляются карбонаты (CO_3^{2-}) в очень небольшом количестве 1,2 мг/л.

Биохимические процессы окисления OB в гиполимнионе приводят к дефициту кислорода в придонных слоях озера. Так, в оз. Ведлозеро на ст. 5 в середине июля 2021 г. в 2-метровом поверхностном слое дефицит кислорода составлял 26 %, а в придонном слое воды он возрос до 66 %, накопилась двуокись углерода (6,5 мг/л) и уменьшилась величина pH до 6,73. Ухудшение кислородного режима в придонных слоях воды в летнее время приводит к перестройке жизнедеятельности гидробиологических сообществ и даже может привести к гибели донных организмов.

Осенью с установлением гомотермии кислородом обогащается вся водная толща озера. Кислородные условия в оз. Ведлозеро в зимний период исследовались только в районе дамбы (ст. 1). Содержание кислорода было высокое и составляло 10,6 мг/л (73 % насыщения).

Заключение

По результатам исследований установлено, что химический состав основной водной массы озера Ведлозеро характеризуется удовлетворительным качеством. Вода маломинерализованная, выраженного гидрокарбонатного класса, группы кальция. По величине гумусности, количеству биогенных элементов и величине pH в воде озеро следует отнести к мезогумусному, эвтрофному и нейтральному. Северо-восточный залив озера, где расположена дамба, испытывает большую антропогенную нагрузку. Высокое

содержание биогенных элементов, особенно фосфора, в водах р. Вохтозерки свидетельствует о крайне неудовлетворительной очистке хозяйственно-бытовых сточных вод. В заливе, в который поступают стоки селитренных и точечных источников загрязнения, содержание биогенных элементов наиболее высокое в течение всего года, что обуславливает крайне неблагоприятное экологическое состояние этого района озера, наиболее востребованного населением с точки зрения водопользования. В летне-осенний период вода озера активно подвержена цветению вследствие развития сине-зеленых водорослей, которые в процессе жизнедеятельности выделяют опасные для человека и животных токсины.

В Англии, Финляндии, Норвегии, Швеции цианобактериальное цветение водоемов рассматривается как национальная проблема, в этих странах созданы государственные службы мониторинга массового развития цианобактерий и научные центры по изучению этого явления и методам борьбы с ним. Развитие цианобактерий сдерживается многими методами: применением синтетических альгицидов, применением эффективных видов гидробионтов-антагонистов в конкурентной борьбе за пищевые ресурсы. Из физических методов в различных странах мира применяют ультразвуковые устройства малой интенсивности (с частотой > 20 кГц). По нашему мнению, в районе северо-восточного залива озера наиболее целесообразно использовать именно ультразвуковой метод, который минимально воздействует на экосистему в целом и подавляет развитие цианобактерий.

Авторы благодарны д. г. н. проф. В. А. Дау-вальтеру и руководителю лаборатории гидрохимии ИНОЗ РАН – СПб ФИЦ РАН к. г. н. Н. В. Игнатьевой за продуктивное обсуждение рукописи, а также признательны О. В. Дерусовой за подготовку рисунка к рукописи.

Литература

Алекин О. А., Драбкова В. Г., Коплан-Дикс И. С. Проблема эвтрофирования континентальных вод // Антропогенное эвтрофирование природных вод. Т. 1. Черноголовка, 1985. С. 25–34.

Аналитические, кинетические и расчетные методы в гидрохимической практике / Под ред. П. А. Лозовика, Н. А. Ефременко. СПб.: Нестор-История, 2017. 272 с.

Белых О. И., Гладких А. С., Сороковикова Е. Г., Тихонова И. В., Потапов С. А., Федорова Г. А. Микроцистин-продуцирующие цианобактерии в водоемах России, Беларуси и Украины // Химия в интересах устойчивого развития. 2013. № 21. С. 363–378.

Геринг Д. Д. Роль азота в эвтрофических процессах // Микробиология загрязненных вод. М.: Медицина, 1976. С. 48–68.

Гусаков Б. Л. Критическая концентрация фосфора в озерном притоке и ее связь с трофическим уровнем водоема // Элементы круговорота фосфора в водоемах. Л.: Наука, 1987. С. 7–17.

Лозовик П. А. Гидрогеохимические критерии состояния поверхностных вод гумидной зоны и их устойчивости к антропогенному воздействию: Дис. ... докт. хим. наук. Петрозаводск, 2006. 481 р.

Лудупова Е. Ю., Сергеева Л. А., Гыргешкина Н. Г., Олоева Э. В., Бадмаева В. Я., Будашеева А. Б. Случай возникновения гаффской болезни (алиментарно-токсической пароксизмальной миоглобинурии) в Республике Бурятия в селах Прибайкальского района, расположенных у озера Котокель // Бюл. ВСНЦ СО РАМН. 2009. № 3(67). С. 92–94.

Назарова Л. Е. Современное состояние и изменчивость климата на водосборах Онежского озера и Выгозерско-Ондского водохранилища // Крупнейшие озера-водохранилища Северо-Запада европейской территории России: современное состояние и изменения экосистем при климатических и антропогенных воздействиях. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2015. С. 10–19.

Нормативы качества воды водных объектов рыбохозяйственного значения, в том числе нормативов предельно допустимых концентраций вредных веществ в водах водных объектов рыбохозяйственного значения (Утв. Приказом Минсельхоза России от 13.12.2016 г. № 552).

Озера Карелии. Справочник / Под ред. Н. Н. Филатова, В. И. Кухарева. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2013. 464 с.

Румянцев А. В., Рыбакин В. Н., Рудский И. В., Павлова О. А., Капустина Л. Л., Митрукова Г. Г., Коровин А. Н. Проблема регуляции токсигенного цветения пресноводных водоемов // Водные ресурсы. 2022. Т. 49, № 2. С. 238–248. doi: 10.31857/S0321059622020134

Савенко В. С., Савенко А. В. Геохимия фосфора в глобальном гидрологическом цикле. М.: ГЕОС, 2007. 248 с.

Sayer C. N. Fertilization of lakes by agricultural and urban drainage // Journal of New Water Lakes Association. 1947. Vol. 51. P. 109–127.

References

Alekin O. A., Drabkova V. G., Koplan-Diks I. S. The problem of eutrophication of continental waters. *Antropogennoe evtrofirovanie prirodnyh vod = Anthropogenic eutrophication of natural waters*. Vol. 1. Chernogolovka; 1985. P. 25–34. (In Russ.)

Belykh O. I., Gladkikh A. S., Sorokovikova E. G., Tikhonova I. V., Potapov S. A., Fedorova G. A. Microcystin-producing cyanobacteria in water reservoirs of Russia, Belarus and Ukraine. *Khimiya v interesakh ustoychivogo razvitiya = Chemistry for Sustainable Development*. 2013;21:363–378. (In Russ.)

Filatov N. N., Kukharev V. I. (eds.). Lakes of Karelia. A reference book. Petrozavodsk: KarRC RAS; 2013. 464 p. (In Russ.)

Gering D. D. The role of nitrogen in eutrophic processes. *Mikrobiologiya zagryaznennykh vod = Microbiology of polluted waters*. Moscow: Meditsina; 1976. P. 48–68. (In Russ.)

Gusakov B. L. The critical concentration of phosphorus in the lake tributary and its relationship with the trophic level of the reservoir. *Elementy krugovorota fosfora v vodoemakh = Elements of the phosphorus cycle in water bodies*. Leningrad: Nauka; 1987. P. 7–17. (In Russ.)

Lozovik P. A., Efremenko N. A. Analytical, kinetic and computational methods in hydrochemical practice. St. Petersburg: Nestor-Istoriya; 2017. 272 p. (In Russ.)

Lozovik P. A. Hydrogeochemical criteria of the surface water state in humid zone and their tolerance to anthropogenic impact: DSc (Dr. of Chem.) thesis. Petrozavodsk; 2006. 481 p. (In Russ.)

Ludupova E. Yu., Sergeeva L. A., Gyrgeshkino-va N. G., Oloeva E. V., Badmaeva V. Ya., Budasheeva A. B. A case of haff disease (alimentary toxic paroxysmal myoglobinuria) in Buryat Republic in villages of Baikal Region near the Kotokel. *Byull. VSNC SO RAMN = Acta Biomedica Scientifica (East Siberian Biomedical Journal)*. 2009;3(67):92–94. (In Russ.)

Nazarova L. E. Current state and climate variability in the catchments of Lake Onega and the Vygozero-Onda

reservoir. *Krupneishie ozera-vodokhranilishcha Severo-Zapada evropeiskoi territorii Rossii: sovremennoe sostoyanie i izmeneniya ekosistem pri klimaticheskikh i antropogennykh vozdeistviyakh = The largest lakes-reservoirs of the North-West of the European territory of Russia: Current state and changes in ecosystems under climatic and anthropogenic impacts*. Petrozavodsk: KarRC RAS; 2015. P. 10–19. (In Russ.)

Rumyantsev V. A., Rybakin V. N., Rudsky I. V., Pavlova O. A., Kapustina L. L., Mitrukova G. G., Korovin A. N. The problem of regulation of toxigenic blooming in freshwater bodies. *Water Resources*. 2022;49(2):311–320. doi: 10.1134/S0097807822020129 (In Russ.)

Savenko V. S., Savenko A. V. Phosphorus geochemistry in the global hydrological cycle. Moscow: GEOS; 2007. 248 p. (In Russ.)

Sayer C. N. Fertilization of lakes by agricultural and urban drainage. *Journal of New Water Lakes Association*. 1947;51:109–127.

Water quality standards for fishery water bodies, including standards for maximum permissible concentrations of harmful substances in the waters of fishery water bodies. Approved by Order of the Ministry of Agriculture of Russia, dated December 13, 2016. No. 552. (In Russ.)

Поступила в редакцию / received: 31.10.2022; принята к публикации / accepted: 08.11.2022.
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare no conflict of interest.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

Сабылина Альбина Васильевна

канд. хим. наук, старший научный сотрудник

e-mail: tanyusha_ptz@mail.ru

Ефремова Татьяна Алексеевна

младший научный сотрудник

e-mail: efremova.nwpi@mail.ru

CONTRIBUTORS:

Sabylina, Albina

Cand. Sci. (Chem.), Senior Researcher

Efremova, Tatyana

Junior Researcher