

УДК 556.114:556.55 (470.22)

## ИЗМЕНЕНИЕ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА ВОДЫ ОЗЕРА МУНОЗЕРО (КАРЕЛИЯ) ЗА ПОСЛЕДНИЕ 60 ЛЕТ

**А. В. Сабылина, О. И. Икко**

*Институт водных проблем Севера КарНЦ РАН, ФИЦ «Карельский научный центр РАН»,  
Петрозаводск, Россия*

Проведен анализ изменения химического состава воды в олиготрофном оз. Мунозеро за период с 1959 по 2019 г. Озеро находится в верхней части Кончезерской озерно-речной системы (Мунозеро, Пертозеро, Габозеро, Кончезеро, Укшезеро). Кончезерская группа озер входит в число уникальных озер Карелии. Из всех озер этой группы оз. Мунозеро выделяется высокой минерализацией (100 мг/л), малым содержанием органических ( $C_{\text{орг}} = 2\text{--}4$  мг/л) и биогенных веществ. Для его вод характерны низкие величины цветности (20–30 град) и высокие значения прозрачности (4–5 м). По питьевым качествам воды это один из лучших водоемов Карелии. В данной работе показаны изменения, произошедшие за 60 лет в ионном составе воды, в содержании биогенных веществ и кислородном режиме в результате влияния как естественных (изменение климата), так и антропогенных факторов.

**Ключевые слова:** минерализация; ионный состав; органические и биогенные вещества; кислород; диоксид углерода; pH воды.

### **A. V. Sabylina, O. I. Ikko. CHANGES IN THE CHEMICAL COMPOSITION OF LAKE MUNOZERO (KARELIA) WATER OVER THE PAST 60 YEARS**

The article presents an analysis of changes in the chemical composition of water in the oligotrophic Lake Munozero for the period from 1959 to 2019. The lake is located in the upstream part of the Konchezero lake-river system (Munozero, Pertozero, Gabozero, Konchezero, Ukshezero). The Konchezero group of lakes is among Karelia's unique water bodies. Of all the lakes in this group, Lake Munozero stands out for its high mineralization (100 mg/l) and low content of organic matter ( $C_{\text{org}} = 2\text{--}4$  mg/l) and nutrients. Lake Munozero water features a low color index (20–30 degrees) and high transparency (4–5 m). This lake is one of the best water bodies in Karelia in terms of potable water quality. The article gives an account of the changes that have occurred over the past 60 years in the ionic composition of lake water, the content of nutrients, and the oxygen regime under the impact of both natural (climate change) and anthropogenic factors.

**Keywords:** total dissolved solids; ionic composition; organic matter and nutrients; oxygen; carbon dioxide; water pH.

#### **Введение**

Озеро Мунозеро является верхним звеном в Кончезерской группе озер, расположен-

ной в нижней левобережной части водосбора р. Шуи. На побережье оз. Мунозеро обнаружена древнейшая стоянка человека [Фосс, 1952]. В юго-западной и западной частях водо-

сборной территории озера располагаются ряд населенных пунктов, санаторий «Марциальные воды» и сельскохозяйственные угодья. Озеро используется для водоснабжения, рекреации и для сброса сточных вод. Северная и северо-восточная части бассейна озера и прилегающая акватория входят в состав территории заповедника «Кивач». Южная и юго-западная части водосбора озера и их акватория подвергаются антропогенному воздействию в результате сброса хозяйственно-бытовых сточных вод пос. Марциальные Воды, санаториев «Марциальные воды» и «Дворцы» в систему, сообщаются с озером, а также стоков с сельскохозяйственно освоенных территорий. В 2003 г. в северо-восточной части акватории озера построена небольшая форелеводческая ферма. Выращивание товарной форели в садках обогащает воду озера органическими остатками корма форели.

Исследование химического состава воды оз. Мунозеро имеет длительную историю. Первые сведения о гидрохимии озера были получены Бородинской пресноводной биологической станцией [Зеленкова-Перфильева, 1927]. Обобщение материалов по химическому составу воды озера с 1959 по 1987 г. выполнено Н. С. Харкевич [1991а, б]. В 1992 и 2018–2019 гг. нами были также проведены сезонные исследования химического состава воды озера. Эпизодические наблюдения были осуществлены в летние сезоны 1983, 1987, 2004, 2011 гг.

Анализ данных по химическому составу воды оз. Мунозеро основан на сравнении с литературными данными прежних лет, среди которых особенно ценны материалы сезонных исследований 1959–1960 гг. [Харкевич, 1991а, б]. Это позволило оценить изменения в химическом составе воды, которые произошли в водной экосистеме озера в связи с хозяйственным использованием его бассейна, сбросом сточных вод и другими антропогенными факторами.

## Материалы и методы

Озеро Мунозеро расположено в южной Карелии (62°14' с. ш., 33°49' в. д.) на высоте 74,5 м н. у. м. Площадь водной поверхности – 14,4 км<sup>2</sup>, максимальная глубина – 50 м, средняя – 13,2 м. Озеро имеет семь притоков – это небольшие речки и ручьи, длина которых не превышает 1–3 км. Водоем характеризуется малым объемом годового притока (5–10 м<sup>3</sup>) и замедленным водообменом (15 лет). Мунозеро находится подо льдом 5–6 месяцев, разрушение льда обычно происходит в конце 3-й

декады апреля. В озере в течение всего летнего периода сохраняется устойчивая стратификация температур. Поверхностные слои воды прогреваются до 20–26 °С, в придонных горизонтах температура воды изменяется в пределах 4–6 °С [Поляков, Фрейндлинг, 1991].

Озерная котловина, образовавшаяся в результате денудационно-тектонической деятельности, имеет сложное строение. Максимальные глубины сосредоточены в северной части водоема. Территория водосборного бассейна озера отличается от других озер Кончезерской группы по почвенно-геологическим условиям, особенностью которых является наличие в его бассейне темноцветных плодородных почв (буроземов), основных пород (зеленокаменных сланцев, амфиболитов, габбро-диабазов и карбонатов). Заболоченность водосбора – 3–5 % [Бискэ, 1959; Еруков, Лак, 1985].

Для сравнения данных по химическому составу воды озера, полученных в начале 1960-х годов, с нашими материалами исследований в 1992 и 2018–2019 гг. в озере были выбраны два участка: северо-западный плес (ст. М3) и южный плес (ст. М1) (рис. 1). Эти районы озера отличаются по морфометрии котловины, глубинам и степени антропогенного воздействия.

Химический анализ проб воды выполнялся по методам, изложенным в руководствах [Руководство..., 1977; Аналитические..., 2017].

## Результаты и обсуждение

**Химический состав воды притоков озера.** Все притоки представляют собой небольшие ручьи. Они несут в водоем минерализованные, довольно окрашенные, богатые органическим веществом гумусовой природы воды.

Сумма главных ионов ( $\Sigma_i$ ) в приточных водах в весенний, летний и осенний сезоны 2018 г. изменяется в пределах 66,6–372,2 мг/л. В катионном составе воды ручьев преобладают ионы кальция, в анионном – гидрокарбонаты. Колебания  $\Sigma_i$  в приточных водах значительные. Так, в северном руч. Мустаоя (ст. М6), вытекающем из небольшого оз. Мустлампи, проходящем коротким участком до оз. Мунозеро, амплитуда колебания минерализации воды составила лишь 4 мг/л, в то время как в ручье № 2 (ст. М7), дренирующем зеленокаменные сланцы и карбонатные породы, впадающем в юго-западную часть озера, – 173,8 мг/л (табл. 1).

Анализ произошедших изменений в содержании главных ионов в воде притоков в летние сезоны с 1983 и 1987 по 1992 и 2018 гг. возможен только на примере трех притоков – Мустаоя, Утокоя и Редуоя. По сравнению с 80-ми го-

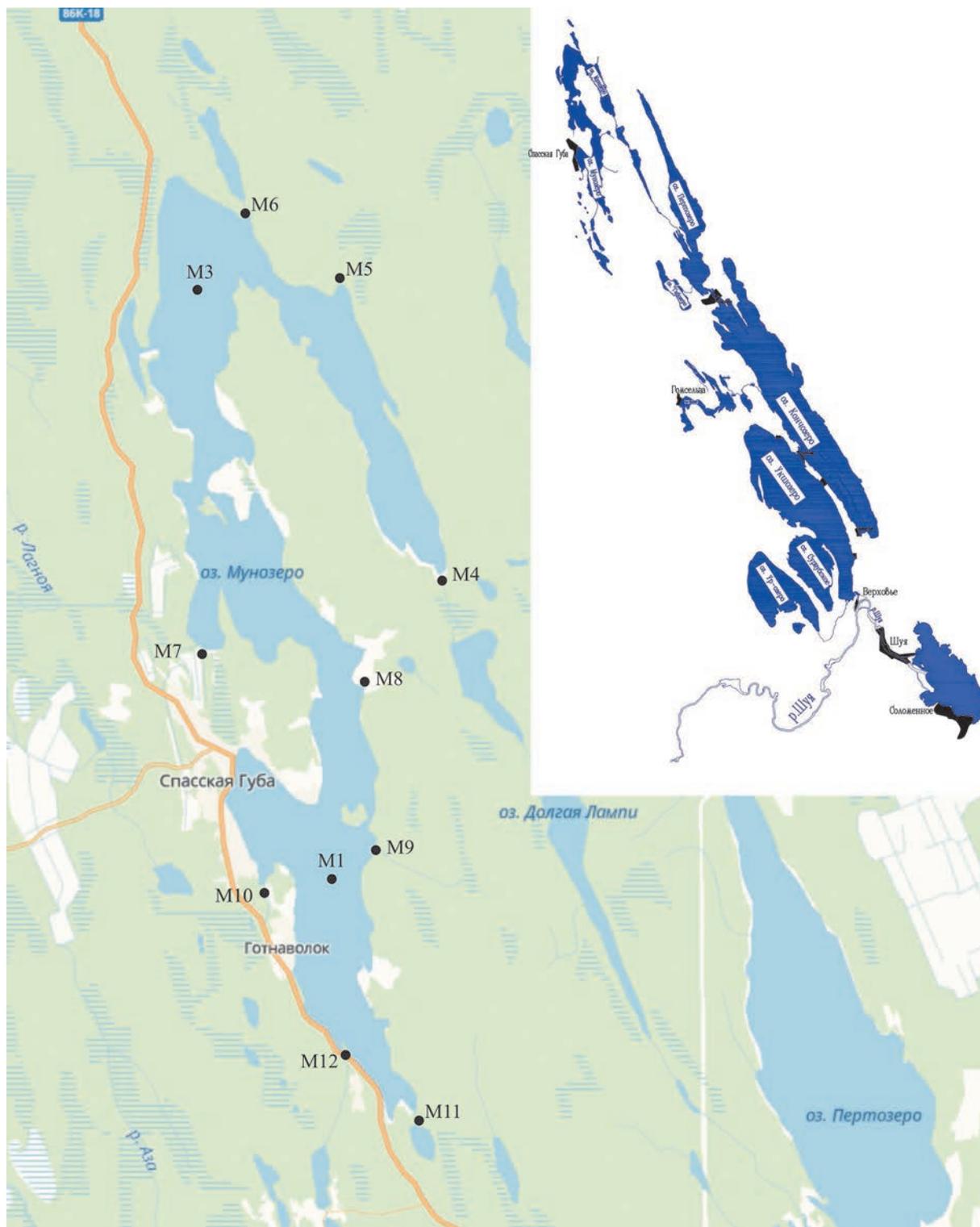


Рис. 1. Схема расположения станций отбора проб в оз. Мунозеро в 2018–2019 гг.

Fig. 1. The scheme of sampling stations in Lake Munozero in 2018–2019

дами прошлого столетия основные изменения в ионном составе воды произошли в руч. Редуоя, тогда как в первых двух притоках они незначительны (табл. 2). Эти изменения коснулись в основном концентрации ионов натрия в кати-

онном составе воды, а в анионном – ионов хлора. Если раньше концентрация ионов натрия в летнюю межень 1987 г. равнялась 3,4 мг/л, то в 1992 и 2018 гг. она увеличилась в 1,5 и 1,8 раза соответственно. Более контрастно повы-

Таблица 1. Минерализация ( $\Sigma_{и}$ ), показатели содержания органического вещества и взвешенных веществ в воде притоков оз. Мунозеро в весенний, летний и осенний периоды 2018 г.

Table 1. Mineralization ( $\Sigma_{и}$ ), indicators of organic and suspended matter content in the water of the Lake Munozero tributaries in spring, summer, and autumn of 2018

Притоки Tributaries of Lake Munozero	Дата отбора Sampling date	$\Sigma_{и}$ , мг/л $\Sigma_{и}$ , mg/l	Цветность, град. Color, degrees	ПО	ХПК	$C_{орг}$ , мг/л $C_{орг}$ , mg/l	ПО/ХПК, % PO/COD, %	БПК <sub>5</sub> , мгО <sub>2</sub> /л BOD <sub>5</sub> , mgO <sub>2</sub> /l	Взвешенные вещества, мг/л Suspended matter, mg/l
				РО	COD				
Северный приток (М6) Northern tributary	17.05.18	72,2	64	10,8	31,3	11,4	34	1,66	2,4
	25.07.18	72,1	53	10,1	28,3	10,6	36	1,05	1,6
	25.09.18	76,1	63	11,7	33,7	12,6	35	3,84	2,0
Приток восточного побережья (М8) East coast tributary	17.05.18	78,1	118	18,3	40,6	15,2	45	0,53	2,4
	25.07.18	107,9	118	18,8	49,2	18,5	38	1,25	6,0
	25.09.18	167,5	60	10,7	44,0	19,2	24	2,53	4,2
Приток западного побережья (М7) West coast tributary	17.05.18	258,3	146	22,2	54,7	20,5	41	1,54	3,8
	25.07.18	198,9	124	21,1	57,3	21,5	37	0,95	1,4
	25.09.18	372,7	99	20,0	55,1	20,7	36	3,55	0,4
Приток южного побережья Редуоя (М11) South coast tributary (Reduoya)	17.05.18	98,9	44	7,7	23,1	8,7	33	1,89	1,6
	25.07.18	120,3	42	5,6	24,8	9,3	23	1,62	4,5
	25.09.18	157,3	68	13,5	42,5	16,0	32	7,66	15,1
	07/1983	73	40	9,5	23,4	8,8	41	1,74	-
Приток южного побережья Утокоя (М12) South coast tributary (Utokoia)	17.05.18	66,5	59	9,6	28,3	10,6	34	1,42	2,3
	25.09.18	71,1	41	9,1	24,1	9,0	38	1,93	2,2
	07/1983	69,4	50	8,7	23,4	8,8	37	1,38	-
Исток р. Мунозерка (М4) Source of the Munozerkka River	17.05.18	94,6	10	4,1	12,3	4,6	33	0,72	0,8
	25.07.18	96,5	11	3,3	13,2	4,9	25	0,91	2,2
	25.09.18	98,3	7	3,9	12,4	4,6	31	1,77	2,2
	07/1983	97,6	7	3,2	11,2	4,2	29	0,70	-

Таблица 2. Минерализация и ионный состав воды в некоторых притоках оз. Мунозеро в летний сезон 1987 и 2018 гг., мг/л

Table 2. Values of mineralization and ionic water composition of some Lake Munozero tributaries in summer seasons of 1987 and 2018, mg/l.

Притоки Tributaries	Год наблюдений Year of observation	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	K <sup>+</sup>	Na <sup>+</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Cl <sup>-</sup>	$\Sigma_{и}$ $\Sigma_{и}$
руч. Мустаоя (М6) Stream Mustaoya	1987	8,0	5,9	0,8	2,4	47,6	6,9	1,0	72,6
	2018	8,9	5,5	0,9	2,6	46,0	7,2	1,1	72,2
руч. Редуоя (М11) Stream Reduoya	1987	14,0	6,7	1,1	3,4	71,9	6,6	1,3	105,0
	2018	15,7	6,9	1,3	6,3	73,8	7,9	8,5	120,4
руч. Утокоя (М12) Stream Utokoia	1987	8,2	4,0	0,9	2,0	52,0	3,9	1,1	72,1
	2018	8,4	4,5	1,0	2,4	49,0	4,6	1,3	71,2

силось содержание ионов хлора – с 1,3 (1987 г.) до 6,3 (1992 г.) и 8,5 (2018 г.) мг/л, и связано это со сбросом хозяйственно-бытовых сточных вод пос. Марциальные Воды, санаториев «Марциальные воды» и «Дворцы». Сточные воды поступают в небольшое оз. Редулампи (0,07 км<sup>2</sup>), из которого с водой руч. Редуоя они поступают в южный плес озера. Эти данные свидетельствуют о неэффективной работе станции биологической очистки сточных вод пос. Марциальные Воды и санатория «Марциальные воды»,

либо сточные воды до момента поступления в оз. Редулампи хлорируются и поступают без очистки в озеро. Так, по данным статотчетности «2ТП-водхоз», концентрация хлоридных ионов в оз. Редулампи в 2015 г. составляла 56,9, а в 2016 г. – 55,6 мг/л. В озеро с водой руч. Редуоя поступило хлоридов соответственно 13,5 и 12,6 т/год.

Высокие показатели содержания ОВ в притоках западного и восточного побережья озера обусловлены заболоченностью бассейнов

Таблица 3. Содержание биогенных элементов в воде притоков в весенний, летний и осенний периоды 2018 г.  
Table 3. Content of biogenic elements in the tributaries' water in spring, summer, and autumn periods of 2018

Притоки Tributaries	Сезон Season	Фосфор, мкг/л Phosphorus, mcg/l		Азот, мгN/л Nitrogen, mgN/l				Fe <sub>общ'</sub> Fe <sub>tot'</sub> mg/l	Si, мг/л mg/l
		P <sub>мин</sub> P <sub>min</sub>	P <sub>общ</sub> P <sub>tot</sub>	N <sub>орг</sub> N <sub>org</sub>	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	N <sub>общ</sub> N <sub>tot</sub>		
Северный приток (М6) Northern tributary	17.05.18	3	22	0,60	0,02	0,04	0,66	0,18	2,8
	25.07.18	1	17	0,37	0,03	0,01	0,40	0,13	1,8
	25.09.18	3	26	0,37	0,02	0,19	0,58	0,23	1,8
Приток восточного побережья (М8) East coast tributary	17.05.18	23	49	0,78	0,04	0,08	0,9	0,54	2,9
	25.07.18	8	53	0,94	0,01	0,05	1,00	0,86	2,9
	25.09.18	14	27	0,46	0,02	0,01	0,49	0,91	3,9
Приток западного побережья (М7) West coast tributary	17.05.18	19	43	0,99	0,03	1,08	2,10	0,48	3,1
	25.07.18	33	74	0,87	0,05	0,24	1,16	0,45	3,8
	25.09.18	34	81	1,00	0,01	0,14	1,14	0,74	4,4
Приток южного побережья Редуоя (М11) South coast tributary (Reduoya)	17.05.18	45	112	0,69	0,06	0,18	0,94	0,30	3,3
	25.07.18	101	167	0,43	0,04	0,23	0,70	0,20	2,2
	25.09.18	90	295	1,35	0,03	0,02	1,40	1,83	6,0
Приток южного побережья Утокоя (М12) South coast tributary (Utokoja)	17.05.18	2	20	0,57	0,02	0,25	0,84	0,20	2,8
	25.09.18	1	21	0,60	0,01	0,03	0,64	0,10	2,3
Исток р. Мунозерка (М4) Source of the Munozerka River	17.05.18	1	9	0,25	0,01	0,14	0,40	0,05	2,4
	25.07.18	1	11	0,25	0,04	0,01	0,30	0,07	1,9
	25.09.18	1	10	0,49	0,01	0,03	0,53	0,14	1,9

этих притоков, тогда как в воде р. Мустаоя (ст. М6), вытекающей из оз. Мустлампи, содержание ОВ сравнительно низкое в течение всего вегетационного периода (среднесезонная цветность – 60 град., ПО – 10,9 мгО/л) (см. табл. 1). Цветность воды притоков варьирует в широких пределах – 41–146 град., перманганатная окисляемость (ПО) – 5,6–22,2 мгО/л, химическое потребление кислорода (ХПК) – 23,1–57,3 мгО/л (см. табл. 2).

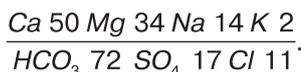
За последние три десятилетия в воде руч. Редуоя величины БПК<sub>5</sub> возросли в период паводков с 1,38 мгО<sub>2</sub>/л в начале 1990-х годов до 7,66 мгО<sub>2</sub>/л в 2018 г. Содержание общего фосфора в воде притоков изменяется в широких пределах: весной – от 22 до 112, а летом и осенью – от 17 до 295 мкг/л (табл. 3). Обращают на себя внимание высокие концентрации P<sub>общ</sub> (112–295 мкг/л) в южном ручье Редуоя (ст. М11), в который поступают сточные воды пос. Марциальные Воды и санатория «Марциальные воды». Содержание общего азота в воде притоков колеблется от 0,40 до 2,10 мгN/л. Максимальные концентрации N<sub>общ</sub> приурочены к притокам западного заболоченного побережья. Органическая форма азота превалирует в воде притоков во все сезоны, минеральные формы азота (NO<sub>3</sub><sup>-</sup> и NH<sub>4</sub><sup>+</sup>) ассимилируются в наибольшей степени в летний период (см. табл. 3). Концентрация общего железа в воде притоков не превышает 1 мг/л, за исключением южного руч. Редуоя

(1,83 мг/л). Вода ручьев западного и южного побережий обогащена растворенным кремнием, концентрация его в открытый период года в среднем равняется 3,8 мг/л.

Вода всех притоков в открытый период года недонасыщена кислородом (в среднем 60 % насыщения). Низким содержанием кислорода отличаются притоки восточного и южного побережий – Редуоя (10–76 %) и Курий (30–68 %). Величина рН в воде ручьев близка к нейтральной (6,8–7,6). Содержание диоксида углерода в воде притоков высокое и в открытый период года изменяется в широких пределах – от 4,3 до 43,4 мг/л. Максимальная концентрация СО<sub>2</sub> приурочена к осеннему периоду.

**Химический состав воды озера.** Особенности геологического строения, почвенного покрова и в целом характера водосбора оз. Мунозеро обусловили относительно высокую минерализацию его воды. Среднегодовая минерализация в 1959–1960 гг. составляла 92,8 мг/л, колебания средних их величин по сезонам составляли от 87,2 до 99,0 мг/л. Во все сезоны 1992 и 2018–2019 гг. сумма главных ионов равнялась 98,2 и 100,6 мг/л соответственно. При средних колебаниях по сезонам от 94,4 до 116,3 мг/л (табл. 4) минерализация воды в озере начиная с 90-х годов прошлого столетия увеличилась на 6–8 мг/л.

Формула ионного состава воды оз. Мунозеро, выраженная в %-экв, имеет следующий вид:



Как видно из таблицы 4, в катионном составе за 60-летний период заметного изменения концентраций ионов кальция и магния не произошло, увеличилось содержание ионов натрия. Концентрации гидрокарбонатных и сульфатных ионов за многолетний период исследований остались практически постоянными (рис. 2).

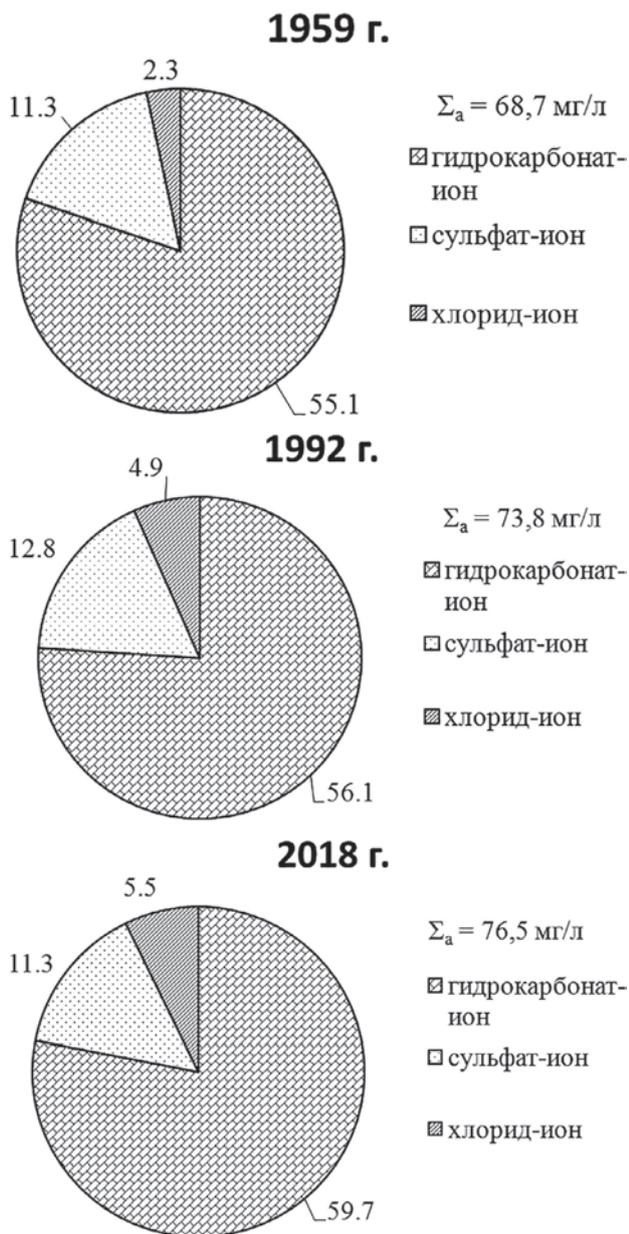


Рис. 2. Динамика изменения средних концентраций гидрокарбонатных, сульфатных и хлоридных ионов ( $\Sigma_a$ ) в воде оз. Мунозеро в течение 1959–1960, 1992 и 2018–2019 гг.

Fig. 2. Dynamic changes in average concentration of hydrocarbonate, sulphate, and chloride ions ( $\Sigma_a$ ) in the water of Lake Munozero in 1959–1960, 1992 and 2018–2019

Однако в анионном составе с 90-х годов прошлого столетия отмечены значительные изменения в содержании хлоридных ионов (см. рис. 2). Это обусловлено поступлением натрия и хлора с хозяйственно-бытовыми сточными водами пос. Марциальные Воды и санатория «Марциальные воды», а также в незначительном количестве от рассеянных источников загрязнения (пос. Спасская Губа, Мунозеро) и сточных вод сельскохозяйственных угодий. Среднегодовая сумма щелочных катионов ( $K^+$  и  $Na^+$ ) в 1959–1960 гг. составила 2,9 мг/л, в 1992 г. она возросла в 1,7 раза, а в 2018–2019 гг. в 2 раза.

Среднегодовая концентрация хлоридных ионов, по данным 1959–1960 гг., равнялась 2,3 мг/л, в 1992 г. она увеличилась в 2 раза, а в 2018–2019 гг. – в 2,5 раза. Различия в содержании ионов хлора по акватории озера незначительные (см. табл. 4). Следует отметить, что поступление хлоридных ионов с атмосферными осадками над территорией исследования низкое (0,39 мг/л), и они не оказывают существенного влияния на увеличение концентрации этих ионов в озере [Потапова, Лозовик, 2007].

Интересно проследить за изменением концентрации катионов щелочных металлов и хлоридных ионов в нижележащем оз. Пертозеро с 1959 по 2004 г. В оз. Пертозеро с юго-восточного побережья впадает р. Мунозерка, а водосборная территория озера не испытывает значительного антропогенного влияния. Среднегодовая сумма катионов щелочных металлов в воде озера в 1959–1960 гг. равнялась 2,3 мг/л, а содержание хлоридных ионов – 1,5 мг/л. По материалам сезонных наблюдений 1992 г. и осенним данным 2004 г., среднегодовая концентрация суммы  $K^+$  и  $Na^+$  составляла 3,7 мг/л, а  $Cl^-$  – 2,9 мг/л, т. е. в воде нижележащего озера изменение содержания этих ионов не произошло.

Для оценки влияния выпуска хозяйственно-бытовых сточных вод в южный плес оз. Мунозеро был проведен статистический дисперсионный анализ (ANOVA) концентрации хлоридных ионов и  $P_{общ}$  в каждом плесе в отдельности. Дисперсионный анализ показал, что разница в концентрации хлоридных ионов до 1990 г. (группа 1) и после 1990 г. (группа 2) является статистически значимой как в озере в целом ( $p = 1,79 \cdot 10^{-32} < 0,001$ ; число степеней свободы  $dF = 51$ ), так и в южном ( $p = 1,32 \cdot 10^{-18} < 0,001$ ;  $dF = 24$ ) и северном ( $p = 6,76 \cdot 10^{-15} < 0,001$ ; число степеней свободы  $dF = 25$ ) плесах в отдельности. Это позволяет утверждать, что увеличение содержания хлоридов в озере после 1990 г. было статистически значимым.

Таблица 4. Минерализация и ионный состав воды оз. Мунозеро (средние по четырем сезонам) в 1959–1960, 1992, 2018–2019 гг. и летом 1983 и 2004 гг., мг/л

Table 4. Values of mineralization and ionic water composition of Lake Munozero (average values for the four seasons) in 1959–1960, 1992, 2018–2019 and in the summer of 1983 and 2004, mg/l

Плес Reach of the lake	Сезон Season	Год наблюдений Year of observation	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	K <sup>+</sup>	Na <sup>+</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Cl <sup>-</sup>	Σ <sub>и</sub> Σ <sub>1</sub>
Северо-западный North-western reach	Весна Spring	1960	12,9	5,0	2,8		55,0	11,2	2,1	89,0
		1992	13,0	6,0	0,9	3,6	55,6	11,1	4,7	94,9
		2018	12,7	5,1	1,1	4,1	56,2	11,4	5,3	95,9
Южный Southern reach		1960	13,7	5,2	3,0		55,7	11,6	2,2	91,4
		1992	13,4	6,4	0,9	3,9	55,6	15,1	4,9	100,2
		2018	12,7	5,1	1,2	3,8	58,4	10,3	5,2	96,7
Северо-западный North-western reach	Лето Summer	1959	12,1	5,0	2,7		48,7	10,9	2,3	81,7
		1992	13,3	6,2	0,9	3,9	56,9	10,7	4,6	96,5
		2018	13,7	5,6	1,1	4,1	58,3	10,9	5,5	99,2
Южный Southern reach		1959	12,9	5,6	2,9		50,0	11,2	2,3	84,9
		1992	13,4	6,6	1,0	4,0	54,9	11,2	4,8	95,9
		2018	14,2	5,9	1,2	4,3	61,8	11,2	5,2	103,8
Северо-западный North-western reach	Осень Autumn	1959	13,0	5,1	2,7		55,3	11,0	2,4	89,5
		1992	13,1	5,3	1,1	3,8	56,3	11,9	5,5	97,0
		2018	13,4	15,5	1,2	4,1	57,1	12,4	5,6	109,3
Южный Southern reach		1959	13,5	5,4	2,8		56,3	11,5	2,4	91,9
		1992	12,9	6,9	1,0	3,8	55,2	9,8	5,3	94,9
		2018	13,7	5,9	1,2	4,1	58,3	12,3	5,4	100,9
Северо-западный North-western reach	Зима Winter	1960	14,0	5,8	3,0		61,1	11,1	2,2	97,2
		2019	13,8	5,5	1,2	4,5	60,0	11,4	5,7	102,1
Южный Southern reach		1960	14,7	5,9	3,2		59,3	11,9	2,2	97,2
		1992	15,2	6,6	1,5	3,3	58,7	15,0	4,4	104,7
		2019	15,4	5,8	1,3	4,8	67,7	10,7	5,8	111,5
		1983	13,6	6,0	3,5		55,8	16,6	2,4	97,9
Центральный Central reach	Лето Summer	2004	13,6	5,7	1,5	4,6	58,2	13,5	6,6	103,5

Как видно из таблицы 5, величины соотношения Ca<sup>2+</sup> : Mg<sup>2+</sup>, рассчитанные в абсолютных и относительных концентрациях, не изменились за 60-летний период. Они возрастают в воде в период половодья и паводков, а отношение HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> : SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> в эти периоды уменьшается. Величины отношения SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> : Cl<sup>-</sup> по данным 1950–1960 гг. в абсолютных и относительных концентрациях изменялись в пределах 4,9–5,3 и 3,4–4,0 соответственно. В 2018–2019 гг. это отношение уменьшилось в 2,4 раза, что обусловлено возрастанием абсолютных и относительных концентраций ионов хлора (см. табл. 5).

Таким образом, вода оз. Мунозеро, по классификации О. А. Алекина [1970], относится к гидрокарбонатному классу, группе кальция, второму типу, индекс C<sub>II</sub><sup>Ca</sup>. Благодаря сравнительно высокой минерализации и доминированию в ионном составе гидрокарбонатов озеро обладает высокой устойчивостью к процессам

закисления. Однако с 90-х годов прошлого столетия в катионном составе воды отмечено увеличение концентрации ионов натрия, а в анионном составе – значительное увеличение ионов хлора, и связано это со сбросом хозяйственно-бытовых сточных вод пос. Марциальные Воды и санатория «Марциальные воды». Увеличение концентрации такого агрессивного иона, как хлор, может в дальнейшем отрицательно сказаться на жизнедеятельности всей биоты в экосистеме озера, в которой несколько организмов зоопланктона являются реликтовыми [Ильмаст и др., 2008].

В воде оз. Мунозеро содержится очень мало ОВ, и в первую очередь гуминовых веществ. Изменение цветности воды в озере по сезонам и годам связано с водностью соответствующего периода (табл. 6). Цветность воды в начале 60-х годов XX в. колебалась в пределах 5–12 град. Воды в южной части озера были более окрашены, чем в северной. Величины цветно-

Таблица 5. Соотношение между главными ионами (по средним величинам) в воде оз. Мунозеро в 1959–1960 и 2018–2019 гг.

Table 5. The ratio between the main ions (by average values) in the water of Lake Munozero in 1959–1960 and 2018–2019

Сезон Season	Год наблюдений Year of observation	Ca <sup>2+</sup> : Mg <sup>2+</sup>		HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> : Cl <sup>-</sup>		HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> : SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>		SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> : Cl <sup>-</sup>	
		мг/л mg/l	% экв % equiv	мг/л mg/l	% экв % equiv	мг/л mg/l	% экв % equiv	мг/л mg/l	% экв % equiv
Весна Spring	1960	2,7	1,7	25,3	15,2	4,8	3,8	5,3	4,0
	2018	2,5	1,5	11,0	6,3	5,3	4,3	2,1	1,5
Лето Summer	1959	2,3	1,4	21,7	13,7	4,5	3,6	4,9	3,8
	2018	2,4	1,5	11,1	6,5	5,5	4,3	2,0	1,5
Осень Autumn	1959	2,5	1,5	23,4	13,1	4,9	3,8	4,8	3,4
	2018	2,4	1,4	10,5	6,1	4,7	3,7	2,2	1,7
Зима Winter	1960	2,4	1,5	27,8	16,7	5,5	4,3	5,0	3,8
	2019	2,6	1,6	11,2	6,5	5,6	4,4	2,0	1,5
Средние за 4 сезона 1959–1960 гг. Average values for 4 seasons 1959–1960		2,5	1,5	24,6	14,7	4,9	3,9	5,0	3,8
Средние за 4 сезона 2018–2019 гг. Average values for 4 seasons 2018–2019		2,4	1,5	11,0	6,4	5,3	4,2	2,1	1,6

Таблица 6. Показатели содержания органических (средние по горизонтам) и взвешенных веществ во все гидрологические сезоны в воде оз. Мунозеро в 1992 и 2018–2019 гг.

Table 6. Indicators of organic (average by horizons) and suspended matter content in all hydrological seasons in the water of Lake Munozero in 1992 and 2018–2019

Плес Reach of the lake	Сезон Season	Год наблюдений Year of observation	ЦВ, град. Color, degrees	ПО	ХПК	БПК <sub>5</sub> , мгО <sub>2</sub> /л BOD <sub>5</sub> , mgO <sub>2</sub> /l	C <sub>орг</sub> <sup>1</sup> , мг/л C <sub>орг</sub> <sup>1</sup> , mg/l	ПО/ХПК, % PO/COD, %	БПК <sub>5</sub> /ХПК, % BOD <sub>5</sub> /COD, %	Взвеш. в-ва, мг/л Susp. matter, mg/l
				РО	КОД					
Северо-западный North-western reach	Весна Spring	2018	13	3,4	13,5	0,69	5,5	25	5	0,8
Южный Southern reach		1992	11	5	-	2,20	4,8	-	-	1,1
		2018	18	4,3	14,9	1,15	5,6	29	8	1,0
Северо-западный North-western reach	Лето Summer	2018	11	3,3	14,5	0,58	5,4	23	4	2,0
Южный Southern reach		1992	10	5,8	-	1,20	5,0	-	-	1,7
		2018	13	3,8	14,5	0,71	5,4	26	5	1,6
Северо-западный North-western reach	Осень Autumn	2018	8	3,1	9,9	0,75	3,7	31	8	0,6
Южный Southern reach		1992	5	8,5	-	1,20	7,6	-	-	0,5
		2018	12	3,8	12,1	1,79	4,5	31	15	1,5
Северо-западный North-western reach	Зима Winter	2019	9	2,7	9,6	0,74	3,6	28	8	0,1
Южный Southern reach		1992	6	3,3	15,7	1,30	5,9	21	8	0,5
		2019	12	3,5	11,0	0,65	4,1	32	6	0,1

сти воды, по данным сезонных исследований в 1992 и 2018–2019 гг., сохранили свое значение (см. табл. 6). Незначительные вариации данного показателя по акватории обусловлены

степенью заболоченности территории южного и восточного водосбора озера, а также масштабным зарастанием литорали южной части водоема высшей водной растительностью на-

Таблица 7. Изменение показателей содержания ОВ в воде оз. Мунозеро в июле 1960, 1968, 1983, 2004 и 2018 гг. (в числителе – поверхностный слой, в знаменателе – придонный)

Table 7. Change in the OS (organic substances) content in the water of Lake Munozero in July 1960, 1968, 1983, 2004 and 2018 (above the line – the surface layer, under the line – the bottom layer)

Район исследования Study area	Год Year	ЦВ, град. Color, degree	ПО, мгО/л PO, mgO/l	ХПК, мгО/л COD, mgO/l	$C_{орг}$ , мг/л $C_{org}$ , mg/l	ОВ, мг/л OM, mg/l	БПК <sub>5</sub> , мгО <sub>2</sub> /л BOD <sub>5</sub> , mgO <sub>2</sub> /l	ПО/ХПК, % PO/COD, %	БПК <sub>5</sub> /ХПК, % BOD <sub>5</sub> /COD, %
Северный плес (ст. М3) Northern reach (st. M3)	1960	$\frac{5}{6}$	$\frac{3,0}{2,6}$	$\frac{27,6}{25,7}$	$\frac{10,4}{9,6}$	$\frac{21,8}{20,2}$	$\frac{0,98}{0,80}$	$\frac{11}{10}$	$\frac{4}{3}$
	1968	$\frac{9}{9}$	$\frac{3,0}{2,9}$	$\frac{13,1}{12,6}$	$\frac{4,9}{4,6}$	$\frac{10,4}{9,6}$	$\frac{0,70}{0,56}$	$\frac{23}{22}$	$\frac{5}{4}$
	1983	$\frac{7}{8}$	$\frac{3,6}{3,2}$	$\frac{13,0}{12,0}$	$\frac{4,9}{4,2}$	$\frac{10,3}{9,9}$	$\frac{1,38}{0,90}$	$\frac{24}{23}$	$\frac{13}{9}$
	2018	$\frac{11}{11}$	$\frac{4,0}{2,6}$	$\frac{14,7}{13,6}$	$\frac{5,5}{5,1}$	$\frac{11,6}{10,7}$	$\frac{1,62}{0,98}$	$\frac{27}{19}$	$\frac{11}{7}$
	2004	$\frac{16}{14}$	$\frac{3,1}{2,7}$	-	-	-	$\frac{0,9}{0,6}$	-	-
Южный плес (ст. М1) Southern reach (st. M1)	1960	$\frac{7}{8}$	$\frac{3,9}{3,0}$	$\frac{30,0}{28,0}$	$\frac{12}{11}$	$\frac{25,2}{23,0}$	$\frac{1,02}{0,93}$	$\frac{12}{9}$	$\frac{3}{3}$
	1968	$\frac{9}{10}$	$\frac{3,8}{3,2}$	$\frac{15,8}{14,5}$	$\frac{6}{5}$	$\frac{12,6}{10,2}$	$\frac{1,23}{0,96}$	$\frac{24}{22}$	$\frac{8}{7}$
	1983	$\frac{8}{9}$	$\frac{3,6}{3,2}$	$\frac{14,9}{13,6}$	$\frac{6}{5}$	$\frac{12,6}{10,2}$	$\frac{1,53}{1,00}$	$\frac{24}{23}$	$\frac{10}{7}$
	2018	$\frac{12}{15}$	$\frac{4,0}{3,7}$	$\frac{15,9}{14,3}$	$\frac{6,0}{5,4}$	$\frac{12,5}{11,3}$	$\frac{1,75}{1,69}$	$\frac{25}{26}$	$\frac{5}{5}$
	2004	$\frac{19}{20}$	$\frac{4,3}{4,7}$	-	-	-	$\frac{0,8}{0,9}$	-	-

чая с 90-х годов прошлого столетия [Фрейндлинг, 1983]. В процессе разложения водной растительности в воду дополнительно поступает значительное количество гуминовых веществ.

В соответствии с низкими величинами цветности невелики и значения перманганатной окисляемости (ПО): по 4 сезонам в 1960 г. они в среднем равнялись 3,1, а в 2018 г. – 3,5 мгО/л. В южной части озера значения ПО чуть выше, чем в северной. С глубиной, особенно на глубоководных участках, они немного снижаются (табл. 7). Значения величин химического потребления кислорода (ХПК) в 2018–2019 гг. превышали значения ПО в 3–4 раза и составляли зимой 8,3–10,8, весной 13,4–16,0, летом 13,2–15,9 и осенью 9,6–13,6 мгО/л. Отношение ПО/ХПК в 1959–1960 гг. в среднем составляло 22 %, в 2018–2019 гг. – 28 %, в летний период 1983 и 2018 гг. – 24 %. В озере в течение года преобладает планктоногенное ОВ. Подтверждением этого являются также низкие величины соотношения БПК<sub>5</sub>/ХПК, которые в озере колеблются от 2 (летом) до 16 (осенью). Среднегодовая концентрация  $C_{орг}$  мало изменяется по годам и сезонам. Так, в 1992 г. она составила 5,8 мг/л, а в 2018–2019 гг. – 5,0 мг/л.

В 2018–2019 гг. величины БПК<sub>5</sub> в северной части озера изменяются в пределах 0,27–0,98

мгО<sub>2</sub>/л, максимальные их значения отмечены в летний сезон на горизонте 8,0 м в районе форелевых садков. Выращивание товарной форели в садках обогащает воду озера легкогидролизуемым органическим веществом (остатки корма форели) и биогенными элементами, что отрицательно сказывается на трофическом состоянии озера. Более того, садки в озере установлены в уязвимой части его акватории, где водообмен и так незначительный.

В южной части озера величины БПК<sub>5</sub> колеблются в пределах 0,69–2,12 мгО<sub>2</sub>/л. В аномально теплую осень 2018 г. в южной части озера величины БПК<sub>5</sub> достигали максимальных значений в году (2,12 мгО<sub>2</sub>/л, ПДК для рыбохозяйственных водоемов составляет 2,0 мгО<sub>2</sub>/л). В этот же период величины БПК<sub>5</sub> в истоке руч. Редуоя, впадающего в южную часть, достигали очень высоких значений и составляли 7,66 мгО<sub>2</sub>/л.

Северный плес озера сохраняет олиготрофный характер, о чем свидетельствуют низкие величины БПК<sub>5</sub> (0,58–0,75 мгО<sub>2</sub>/л), соотношение значений БПК<sub>5</sub>/ХПК (4–8) и соотношение значений ПО/ХПК (22,8–31,3). В южном плесе эти значения выше, что свидетельствует о растущем эвтрофировании этой части озера (см. табл. 7).

Содержание взвешенных веществ в озере невысокое, и по данным 2018–2019 гг. оно

Таблица 8. Содержание биогенных элементов (по средним величинам) в воде оз. Мунозеро во все гидрологические сезоны 1959–1960, 1992, 2018–2019 гг. и в летние периоды 1968, 1983, 2004 гг.

Table 8. The content of biogenic elements (by average values) in the water of Lake Munozero in all hydrological seasons of 1959–1960, 1992, 2018–2019 and in the summer periods of 1968, 1983, 2004

Сезон Season	Год наблюдений Year of observation	Фосфор, мкг/л Phosphorus, mcg/l		Азот, мгN/л Nitrogen, mgN/l				Fe <sub>общ.</sub> мг/л Fe total, mg/l	Si, мг/л mg/l
		P <sub>мин</sub> P <sub>min</sub>	P <sub>общ.</sub> P <sub>total</sub>	N <sub>орг</sub> N <sub>org</sub>	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	N <sub>общ.</sub> N <sub>total</sub>		
Весна Spring	1960	3	14	0,29	0,08	0,01	0,38	0,00	1,4
	1992	1	6	0,15	0,01	0,16	0,32	0,05	2,4
	2018	1	9	0,16	0,01	0,18	0,31	0,06	2,5
Лето Summer	1960	2	-	0,19	0,08	0,01	0,28	0,01	1,4
	1968	2	18	0,44	0,01	0,03	0,48	0,02	1,3
	1992	1	6	0,19	0,02	0,09	0,30	0,04	2,2
	2004	2	10	0,37	0,03	0,04	0,44	0,03	1,7
	2018	0	10	0,21	0,02	0,08	0,31	0,04	2,3
Осень Autumn	1959	2	16	0,24	0,08	0,02	0,34	0,02	2,0
	1992	1	7	0,20	0,02	0,10	0,32	0,03	2,4
	2018	2	10	0,19	0,02	0,12	0,32	0,04	2,5
Зима Winter	1959	1	9	0,20	0,02	0,01	0,23	0,04	1,9
	1992	2	6	0,17	0,03	0,16	0,36	0,03	2,6
	2019	3	10	0,18	0,03	0,16	0,34	0,04	3,1

составляет 0,6–2,0 мг/л. Максимальные величины отмечены в северной части озера (район форелевых садков). С низкой комплексообразующей способностью вод оз. Мунозеро связано очень малое содержание органических и взвешенных веществ.

В озере летом 1968, 1983, 2004 и 2018 гг. проводилось определение содержания нефтепродуктов. Концентрация их в единичных пробах воды составляла 0,02–0,10 мг/л. Предельно допустимые концентрации нефтепродуктов для питьевых вод и рыбохозяйственных водоемов составляют 0,3 и 0,05 мг/л соответственно.

Как видно из таблицы 7, значения всех показателей содержания ОВ в летний сезон 2018 г. примерно в 1,3–1,5 раза выше, чем в предыдущие годы исследования, что свидетельствует о растущем загрязнении озера лабильными органическими веществами. В будущем это может привести к деградации озерной экосистемы.

Содержание биогенных элементов в водоеме определяется рядом факторов, таких как морфометрия озерной котловины, проточность, величина удельного водосбора, термический и динамический режим водных масс.

С концентрацией двух биогенных элементов – азота и фосфора – тесно связан процесс антропогенного эвтрофирования озер. В оз. Мунозеро в период зимней межени 1960 и 2019 гг. концентрация минерального фосфора в воде низкая (1–3 мкг/л). В период весен-

ней циркуляции водных масс (май) содержание минерального фосфора уменьшается до 1 мкг/л (табл. 8). В летнюю межень потребление минерального фосфора фитопланктоном приводит к полному его исчезновению по акватории озера и во всей водной толще. В осенний паводок наблюдается едва заметное накопление фосфатов вследствие автолиза и гидролиза фитопланктона и высшей водной растительности (см. табл. 8).

Содержание общего фосфора в воде озера в течение многолетнего периода наблюдений изменялось от 9 до 18 мкг/л (см. табл. 8). Среднегодовая концентрация P<sub>общ.</sub> в настоящее время в озере увеличивается. Так, в 1992 г. она равнялась 6 мкг/л, а в 2018–2019 гг. возросла до 10 мкг/л, при этом на долю P<sub>орг.</sub> приходится до 98 %, что свидетельствует о растущей трофии озера.

Два района озера – северный и южный – стали значительно отличаться концентрацией общего фосфора в период летней стагнации и осеннего паводка. Содержание общего фосфора в эти периоды в южной части озера изменяется от 9 до 13 мкг/л (в среднем по вертикали 12 мкг/л), а в северной – от 5 до 9 мкг/л (в среднем по вертикали 8 мкг/л) (табл. 9). Развитию процесса эвтрофирования в южном плесе озера способствуют следующие факторы: мелководность, быстрое весеннее прогревание, а также обогащение его вод биогенными элементами сточных вод и ОВ. Литоральная

Таблица 9. Концентрация биогенных элементов по сезонам 2018–2019 гг.

Table 9. The concentration of biogenic elements for the seasons 2018–2019

Район исследования Study area	Сезон Season	Горизонт, м Horizon, m	Фосфор, мкг/л Phosphorus, mcg/l		Азот, мгN/л Nitrogen, mgN/l				Fe <sub>общ'</sub> мг/л Fe <sub>tot'</sub> mg/l	Si, мг/л mg/l
			P <sub>мин</sub> P <sub>min</sub>	P <sub>общ</sub> P <sub>tot</sub>	N <sub>орг</sub> N <sub>org</sub>	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	N <sub>общ</sub> N <sub>tot</sub>		
Северный Northern	Весна 2018 г. Spring of 2018	0,5	1	8	0,11	0,01	0,13	0,25	0,05	2,4
		38,0	1	8	0,14	0,01	0,29	0,28	0,04	2,4
Южный Southern		0,5	1	11	0,21	0,01	0,13	0,34	0,07	2,5
		19,0	1	11	0,19	0,01	0,17	0,34	0,07	2,6
<b>Средние Middle</b>	<b>Северный Northern</b>		<b>1</b>	<b>8</b>	<b>0,13</b>	<b>0,01</b>	<b>0,21</b>	<b>0,27</b>	<b>0,05</b>	<b>2,4</b>
	<b>Южный Southern</b>		<b>1</b>	<b>11</b>	<b>0,20</b>	<b>0,01</b>	<b>0,15</b>	<b>0,34</b>	<b>0,07</b>	<b>2,6</b>
Северный Northern	Лето 2018 г. Summer of 2018	0,5	0	9	0,25	0,02	0,01	0,28	0,03	1,9
		8,0	0	9	0,20	0,02	0,01	0,23	0,04	1,9
		37,0	0	9	0,15	0,02	0,17	0,34	0,05	2,5
Южный Southern		0,5	0	9	0,21	0,02	0,01	0,24	0,04	2,1
		10,0	0	11	0,21	0,02	0,04	0,27	0,05	2,2
		18,0	0	13	0,23	0,02	0,24	0,49	0,05	2,9
<b>Средние Middle</b>	<b>Северный Northern</b>		<b>0</b>	<b>9</b>	<b>0,20</b>	<b>0,02</b>	<b>0,06</b>	<b>0,28</b>	<b>0,04</b>	<b>2,3</b>
	<b>Южный Southern</b>		<b>0</b>	<b>12</b>	<b>0,21</b>	<b>0,02</b>	<b>0,10</b>	<b>0,33</b>	<b>0,05</b>	<b>2,6</b>
Северный Northern	Осень 2018 г. Autumn of 2018	0,5	1	8	0,23	0,02	0,01	0,25	0,05	1,9
		30,0	1	5	0,14	0,01	0,27	0,42	0,03	2,6
Южный Southern		0,5	2	13	0,23	0,02	0,02	0,27	0,04	2,3
		18,0	2	13	0,15	0,02	0,18	0,35	0,05	3,0
<b>Средние Middle</b>	<b>Северный Northern</b>		<b>1</b>	<b>6</b>	<b>0,19</b>	<b>0,02</b>	<b>0,14</b>	<b>0,34</b>	<b>0,04</b>	<b>2,4</b>
	<b>Южный Southern</b>		<b>2</b>	<b>13</b>	<b>0,19</b>	<b>0,02</b>	<b>0,10</b>	<b>0,31</b>	<b>0,05</b>	<b>2,7</b>
Северный Northern	Зима 2019 г. Winter of 2019	0,5	1	6	0,13	0,03	0,13	0,29	0,05	2,3
		37,0	3	7	0,13	0,03	0,18	0,29	0,05	2,9
Южный Southern		0,5	2	7	0,15	0,02	0,11	0,28	0,03	2,6
		19,0	4	14	0,28	0,02	0,19	0,49	0,04	4,4
<b>Средние Middle</b>	<b>Северный Northern</b>		<b>2</b>	<b>7</b>	<b>0,13</b>	<b>0,03</b>	<b>0,16</b>	<b>0,29</b>	<b>0,05</b>	<b>2,6</b>
	<b>Южный Southern</b>		<b>3</b>	<b>11</b>	<b>0,22</b>	<b>0,02</b>	<b>0,15</b>	<b>0,39</b>	<b>0,04</b>	<b>3,5</b>

часть плеса в настоящее время плотно заросла высшей водной растительностью, при деструкции которой в воду выделяется ОВ и биогенные вещества.

Поскольку сброс хозяйственно-бытовых сточных вод в оз. Мунозеро начался в середине 1990 г., то все данные по концентрации фосфора были разделены на две выборки: полученные до 1990-х гг. (1) и в последующий период (2). В 1960-х гг. анализ концентрации общего фосфора выполнялся по устаревшей методике, дававшей существенный разброс в результатах анализа, поэтому для анализа изменения содержания фосфора были использованы только данные за 1992 и 2018–2019 гг. В этом случае данные были разделены на две группы по годам: 1992 г. (3) и 2018–2019 гг. (4). В случае с содержанием фосфора это не противоречит исходной гипотезе, поскольку процесс эвтрофирования является постепенным и в начале 1990-х гг. был выражен слабо. Дисперсионный анализ содержания общего фосфора меж-

ду группами (3) и (4) по плесам озера и годам показал следующие результаты. Изменение содержания общего фосфора в северном плесе озера не являлось статистически значимым ( $p = 0,06 \gg 0,001$ ;  $dF = 14$ ), однако в южном плесе оно было таковым ( $p = 1,93 \cdot 10^{-4} < 0,001$ ;  $dF = 15$ ). Это позволяет сделать вывод, что в южном плесе озера происходит статистически значимое увеличение содержания фосфора, однако в северном плесе это изменение пока незначительно. Вместе с тем для озера в целом эта тенденция статистически значима ( $p = 5,20 \cdot 10^{-4} < 0,001$ ;  $dF = 31$ ).

Среднемноголетние концентрации общего азота в воде озера Мунозеро также невысокие и варьируют в пределах 0,23–0,48 мгN/л (см. табл. 8). Преобладающей его формой является органическая. Так, в вегетационный период 1960 г. она составляла в среднем 72, в 2018 г. – 60 %. Убывание концентрации органического азота в сумме общего азота произошло за счет возрастания концентраций нитратов (см.

табл. 8). Максимальное содержание нитратных ионов в открытый период 2018 г. наблюдалось в северном плесе озера (см. табл. 9). Ассимиляция нитратов фитопланктоном в мелководном и более прогреваемом южном плесе озера выше, чем в северном. В период летней температурной стратификации в обоих районах озера отчетливо выражена вертикальная неоднородность содержания нитратов. Разница между его концентрациями в поверхностном и придонном горизонтах воды составила в северном районе 0,01–0,17, в южном – 0,01–0,24 мгN/л. В поверхностных слоях воды ассимиляция нитратных ионов фитопланктоном приводит к почти полному его потреблению по всей акватории озера, что в 1959–1960 гг. отмечалось редко и только в прибрежных частях озера [Харкевич, 1991а]. В 2018 г. в эпилимнионе озера почти полностью отсутствуют минеральные формы фосфора и азота, что обусловлено ассимиляцией их фитопланктоном. Этот процесс следует считать признаком мезотрофии озера (см. табл. 8 и 9).

Соединения азота в оз. Мунозеро также присутствуют преимущественно в органической форме. Концентрация  $N_{\text{орг}}$  весной изменялась от 0,11 до 0,21, летом от 0,15 до 0,25 и осенью от 0,14 до 0,23 мгN/л. Максимальное его содержание обнаружено в южном районе озера в весенний период. Азот минеральный представлен в озере небольшими концентрациями. Содержание аммонийного азота редко превышает 0,02 мгN/л. Нитратный азот в воде озера изменяется от 0,01 до 0,27 мгN/л. Минимальные его количества – 0,01 мгN/л – приурочены к 0–8-метровому слою воды в летний период (см. табл. 9).

Крайне бедна вода озера железом: концентрации его весной равны 0,05–0,07, а летом и осенью – 0,03–0,05 мг/л. Кремния в воде больше: 1,9–3,0 мг/л (см. табл. 9).

Во все сезоны открытого периода года основная толща воды хорошо насыщена кислородом, а в придонных слоях дефицит кислорода высок летом и осенью и составляет соответственно 59 и 48 % насыщения. Весной и летом поверхностные слои воды на 2–6 % перенасыщены кислородом (табл. 10).

Кислородные условия в водоеме являются хорошим индикатором изменения его биопродуктивности. Весенняя циркуляция водных масс в озере происходит при низких температурах воды и охватывает всю толщу. Насыщение ее кислородом довольно равномерное – в среднем 95 %. К моменту установления температурной стратификации озеро обладает хорошим его запасом.

В летний период основными факторами, влияющими на газовый режим озера, являются биологические и биохимические процессы. Относительное содержание кислорода в водной толще в период летней стагнации в настоящее время составляет 38–95 % (см. табл. 10). В прошлом в оз. Мунозеро оно равнялось 65–105 % насыщения [Харкевич, 1991а]. Летом 1959 и 2018 гг. средние значения температуры воды были близкими в 0–10-метровом слое воды и составляли 21,9 и 22,3 °С соответственно, т. е. развитие фотосинтезирующих организмов (фотоавтотрофов) проходило приблизительно в одинаковых температурных условиях. Однако в настоящее время величины рН воды в поверхностных слоях увеличились до 8,23, в прошлом они составляли 7,59. Перенасыщение поверхностных слоев воды кислородом в летний сезон 2018 г. наблюдается по всей акватории озера, что в прошлом было приурочено только к южному его участку. Возможно, это происходит за счет усилившегося фотосинтеза. В эпилимнионе озера (0–10 м) наблюдается полное отсутствие фосфатов и нитратов. Большое количество кислорода расходуется в гипolimнионе озера на деструкцию (минерализацию) новообразованного органического вещества. Абсолютные и относительные концентрации кислорода уменьшились в настоящее время в придонных слоях воды северо-западного плеса с 8,3 (1983 г.) до 7,7 (2018 г.) мг/л и с 66 до 59 % насыщения соответственно. В южном плесе озера абсолютные и относительные концентрации кислорода составляли в этих слоях воды 9,0 (1983 г.) и 4,3 (2018 г.) мг/л и 80 и 38 % насыщения соответственно. Резкое понижение содержания кислорода в придонных слоях южного плеса связано с повышенным окислением (деструкцией) лабильных органических веществ планктоногенного происхождения. В придонных слоях воды наблюдается накопление диоксида углерода до 11,0 в северном плесе и 14,8 мг/л в южном. Ухудшение кислородного режима в придонных слоях в летнее время может привести к заморным явлениям и гибели донных организмов, составляющих основу кормовой базы рыб, а также замене ценных в промысловом отношении рыб (например, сиговых) малоценными видами. Кроме того, дефицит кислорода в гипolimнионе ведет к подавлению активности гетеротрофной микрофлоры, что сопряжено с уменьшением скорости разложения новообразованного органического вещества и накоплением его в донных отложениях.

Осень 2018 г. была аномально теплой. В конце сентября в озере наблюдалась прямая тем-

Таблица 10. Содержание диоксида углерода, кислорода и pH воды в оз. Мунозеро в 2018–2019 гг.

Table 10. Content of carbon dioxide, oxygen, and the pH values of the water in Lake Munozero in 2018–2019

Место отбора Sampling location	Сезон Season	Горизонт, м Horizon, m	pH	CO <sub>2</sub> , мг/л mg/l	O <sub>2</sub> , мг/л mg/l	O <sub>2</sub> , % нас. % of O <sub>2</sub> saturation	T, °C
Северо-западный плес North-western reach	Весна (16.05.18) Spring	0,5	7,74	2,5	10,8	101	13,4
		38,0	7,46	4,8	11,0	83	4,0
Южный плес Southern reach		0,5	7,61	3,7	11,3	106	13,4
		19,0	7,45	5,7	10,5	80	4,5
Северо-западный плес North-western reach	Лето (26.07.18) Summer	0,5	8,09	1,0	8,3	94	23,8
		8,0	7,95	1,5	9,5	92	14,8
		37,0	7,12	11,0	7,7	59	4,5
Южный плес Southern reach		0,5	8,23	0,5	8,4	95	23,6
		10,0	7,35	7,2	6,9	63	12,5
		18,0	7,05	14,8	4,3	38	9,8
Северо-западный плес North-western reach	Осень (25.09.18) Autumn	0,5	7,80	2,8	9,4	89	14,0
		39,0	7,01	14,6	6,3	48	4,5
Южный плес Southern reach		0,5	7,54	4,0	8,7	83	14,2
		18,0	7,09	14,2	2,3	21	11,0
Северо-западный плес North-western reach	Зима (26.02.19) Winter	0,5	7,56	2,53	13,1	89	0,1
		37,0	7,18	7,92	7,0	51	3,0
Южный плес Southern reach		0,5	7,93	2,42	13,0	89	0,1
		19,0	7,24	9,24	3,6	27	3,6

пературная стратификация. Так, в северном плесе температура в поверхностном слое воды равнялась 14,0, в придонном – 4,5 °C. В озере активно шли фотосинтетические процессы. Абсолютные концентрации кислорода в верхнем 5-метровом слое воды в озере составляли 8,7–9,4 мг/л (83–89 % насыщения). В придонных слоях воды северного плеса озера концентрация кислорода равнялась 6,3 мг/л (48 % насыщения), в южном плесе озера она уменьшилась до критической – 2,3 мг/л (21 % насыщения), что может привести к заморным явлениям (см. табл. 10).

Содержание диоксида углерода осенью в придонных слоях воды во всей акватории озера очень высокое и в среднем составляет 14,4 мг/л. В глубоководном районе озера величины pH воды изменяются от 7,80 до 7,01, в мелководном (южном) – от 7,54 до 7,09.

Кислородные условия в зимний период в оз. Мунозеро неблагоприятные. По данным 2019 г., дефицит кислорода в среднем по озеру достигал 36 %, т. е. насыщение составляло 64 %. В южном районе озера (ст. М1) содержание кислорода в поверхностном слое воды составляло 13,0 мг/л (89 % насыщения), в придонном – 3,6 мг/л (27 % насыщения). Содержание диоксида углерода на ст. М1 в поверхностном слое воды составляло 2,4, а в придонном – 9,2 мг/л (см. табл. 10).

Таким образом, в оз. Мунозеро сезонная динамика и вертикальное распределение раство-

ренных газов и величин pH воды за 60-летний период заметно изменились. Наиболее негативное последствие антропогенного воздействия на озеро – это возникновение высокого дефицита кислорода в глубоководных (41 %) и мелководных (62 %) его участках в летний период вследствие увеличения интенсивности процессов деструкции органического вещества.

## Выводы

Экосистема оз. Мунозеро, сформировавшаяся в результате взаимодействия многообразного комплекса природных процессов, развивающихся в водной среде и на водосборе, находится в настоящее время под влиянием антропогенной нагрузки.

Вода озера характеризуется высокой минерализацией (среднемноголетняя 98,4 мг/л), относится к выраженному гидрокарбонатному классу, группе кальция. Заметные изменения за 60-летний период наблюдений произошли в ионном составе воды озера. Начиная с 1990-х годов наблюдается увеличение хлоридных ионов в 2,5 раза, ионов натрия – в 1,5 раза (по сравнению с 1959–1960 гг.).

В воде оз. Мунозеро содержится очень мало органического вещества, и оно в основном планктоногенное. Цветность воды менее 20 град. Значения перманганатной окисляемости низкие (в среднем 3,6 мг/л). За последние три десятилетия изменения величин перманга-

натной окисляемости стали заметны в южном плесе озера и практически не произошли в северном плесе. Однако почти в 2 раза выросли величины БПК<sub>5</sub>, что свидетельствует об увеличении содержания биохимически легкоокисляемых ОБ, и их увеличение обусловлено поступлением в озеро загрязняющих веществ.

Концентрация общего фосфора в водоеме до начала 1990-х годов в среднем составляла 9 мкг/л, в настоящее время – 11 мкг/л. В южной части озера, где водообмен низкий, концентрация Р<sub>общ</sub> не изменяется во времени и колеблется от 10 до 13 мкг/л. Соединения азота в озере представлены преимущественно органической формой (в среднем 0,24 мгN/л). Среди минеральных форм азота преобладают нитраты (0,10 мгN/л). Железом вода озера крайне бедна.

Начиная с 1992 г. процент насыщения кислородом придонных слоев воды стал снижаться в северном плесе осенью до 48 %, зимой – до 51 %, а в южном плесе до 21 и 27 % соответственно.

Величина рН воды изменяется от нейтральной до слабощелочной (7,01–8,23) в открытый период года. В зимнюю межень в поверхностных слоях воды она составляла 7,56–7,93, у дна – 7,18–7,24.

Увеличение за последние три десятилетия содержания хлоридных ионов и ионов натрия, биохимического потребления кислорода, общего фосфора свидетельствует о загрязнении водоема, что впоследствии может привести к деградации озерной экосистемы.

Учитывая высокое качество воды оз. Мунозеро, своеобразие ее химического состава, а также возрастающее антропогенное воздействие на водосборную территорию и акваторию озера, необходимо принять срочные меры по его охране.

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

## Литература

Алекин О. А. Основы гидрохимии. Л.: Гидрометеоиздат, 1970. 442 с.

## References

Alekin O. A. Osnovy gidrokhimii [Fundamentals of hydrochemistry]. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1970. 442 p.

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

*Бискэ Г. С. Четвертичные отложения и геоморфология Карелии. Петрозаводск: Карел. фил. АН СССР, 1959. 307 с.*

*Еруков Г. В., Лак Г. Ц. Почвы и почвенный покров денудационно-тектонических ландшафтов Заонежья // Исследования почв лесных ландшафтов Карелии. Петрозаводск: Карел. фил. АН СССР, 1985. С. 5–46.*

*Зеленкова-Перфильева М. К. К гидрохимии Кончезерской группы озер // Тр. Бородинской пресноводной биол. станции Карелии. Л., 1927. Т. V. С. 64–101.*

*Ильмаст Н. В., Китаев С. П., Кучко Я. А., Павловский С. А. Гидроэкология разнотипных озер южной Карелии. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2008. 92 с.*

*Меншуткин В. В., Петрова Н. А., Иофина И. В., Петрова Т. Н., Сусарева О. М. Ладожское озеро: теория и реальность. СПб.: Нестор-История, 2015. 76 с.*

*Поляков Ю. К., Фрейндлинг В. А. Общая гидрологическая характеристика бассейна р. Шуя // Поверхностные воды озерно-речной системы Шуи в условиях антропогенного воздействия. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 1991. С. 25–33.*

*Потапова И. Ю., Лозовик П. А. Характеристика химического состава атмосферных осадков и химических выпадений на территории Карелии // Состояние водных объектов Республики Карелия. По результатам мониторинга 1998–2006 гг. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2007. С. 174–187.*

*Руководство по химическому анализу поверхностных вод суши / Под ред. А. Д. Семенова. Л.: Гидрометеоиздат, 1977. 542 с.*

*Фосс М. Е. Древнейшая история Севера Европейской части СССР. № 29 (МИА). М.: АН СССР, 1952. 280 с.*

*Фрейндлинг А. В. К вопросу о деструкции макрофитов южной и северной Карелии // Органическое вещество и биогенные элементы во внутренних водоемах: Тез. докл. IV всесоюз. симпоз. (Петрозаводск, 3–5 окт. 1983 г.). Петрозаводск: Карел. фил. АН СССР, 1983. С. 111–114.*

*Харкевич Н. С. Гидрохимия Кончезерской группы озер – уникальных водных объектов Карелии. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 1991. 126 с.*

*Харкевич Н. С. Гидрохимия Кончезерской группы озер // Поверхностные воды озерно-речной системы Шуи в условиях антропогенного воздействия. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 1991. С. 80–86.*

*Поступила в редакцию 05.04.2019*

*Analiticheskie, kineticheskie i raschetnye metody v gidrokhimicheskoi praktike [Analytical, kinetic and calculation methods in hydrochemical practice].*

Eds. P. A. Lozovik, N. A. Efremenko. St. Petersburg: Nestor-Istoriya, 2017. 272 p.

*Biske G. S.* Chetvertichnye otlozheniya i geomorfologiya Karelii [Quaternary deposits and geomorphology of Karelia]. Petrozavodsk: Karel. fil. AN SSSR, 1959. 307 p.

*Erukov G. V., Lak G. Ts.* Pochvy i pochvennyi pokrov denudatsionno-tektonicheskikh landshaftov Zaonezh'ya [Soils and soil cover of the denudation-tectonic landscapes in Zaonezhye]. *Issled. pochv lesnykh landshaftov Karelii* [Soil studies of forest landscapes in Karelia]. Petrozavodsk: Karel. fil. AN SSSR, 1985. P. 5–46.

*Foss M. E.* Drevneishaya istoriya Severa Evropeiskoi chasti SSSR. № 29 (MIA) [Ancient history of the North European part of the USSR. No. 29 (Materials Research Archaeology)]. Moscow: AN SSSR, 1952. 280 p.

*Freindling A. V.* K voprosu o destruktсии makrofitov yuzhnoi i severnoi Karelii [On the question of the macrophytes' destruction in southern and northern Karelia]. *Organicheskoe veshchestvo i biogennye elementy vo vnutrennikh vodoemakh*: Tez. dokl. IV vsesoyuz. simpoz. (Petrozavodsk, 3–5 okt. 1983 g.). [The organic matter and biogenic elements in inland reservoirs: Abs. IV All-Union symp. (Petrozavodsk, Oct. 3–5, 1983)]. Petrozavodsk: Karel. fil. AN SSSR, 1983. P. 111–114.

*Il'mast N. V., Kitaev S. P., Kuchko Ya. A., Pavlovskii S. A.* Gidroekologiya raznotipnykh ozer yuzhnoi Karelii [Hydroecology of diverse lakes in southern Karelia]. Petrozavodsk: KarRC RAS, 2008. 92 p.

*Kharkevich N. S.* Gidrokimiya Konchezerskoi gruppy ozer – unikal'nykh vodnykh ob'ektov Karelii [Hydrochemistry of the Konchezero group of lakes – unique water bodies in Karelia]. Petrozavodsk: KarRC RAS, 1991. 126 p.

*Kharkevich N. S.* Gidrokimiya Konchezerskoi gruppy ozer [Hydrochemistry of the Konchezero group

of lakes]. *Poverkhnostnye vody ozerno-rechnoi sistemy Shui v usloviyakh antropogennogo vozdeistviya* [The surface waters of the Shuya lake-river system in conditions of anthropogenic impact]. Petrozavodsk: KarRC RAS, 1991. P. 80–86.

*Men'shutkin V. V., Petrova N. A., Iofina I. V., Petrova T. N., Sysareva O. M.* Ladozhskoe ozero: teoriya i real'nost' [Lake Ladoga: theory and reality]. St. Petersburg: Nestor-Istoriya, 2015. 76 p.

*Polyakov Yu. K., Freindling V. A.* Obshchaya gidrologicheskaya kharakteristika basseina r. Shuya [General hydrological characteristics of the Shuya River basin]. *Poverkhnostnye vody ozerno-rechnoi sistemy Shui v usloviyakh antropogennogo vozdeistviya* [The surface waters of the Shuya lake-river system in conditions of anthropogenic impact]. Petrozavodsk: KarRC RAS, 1991. P. 25–33.

*Potapova I. Yu., Lozovik P. A.* Kharakteristika khimicheskogo sostava atmosferykh osadkov i khimicheskikh vypadenii na territorii Karelii [Characteristics of the chemical composition of precipitation and chemical fallout in Karelia]. *Sostoyanie vodnykh ob'ektov Respubliki Kareliya. Po rezul'tatam monitoringa 1998–2006 gg.* [Status of water bodies in the Republic of Karelia according to the results of the monitoring in 1998–2006]. Petrozavodsk: KarRC RAS, 2007. P. 174–187.

*Rukovodstvo po khimicheskomu analizu poverkhnostnykh vod sushi* [Guidelines for chemical analysis of surface waters]. Ed. A. D. Semenov. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1977. 542 p.

*Zelenkova-Perfil'eva M. K.* K gidrokhimii Konchezerskoi gruppy ozer [To the hydrochemistry of the Konchezero group of lakes]. *Tr. Borodinskoi presnovodnoi biol. stantsii Karelii* [Proceed. Borodinskaya freshwater biol. station in Karelia]. Leningrad, 1927. Vol. V. P. 64–101.

Received April 05, 2019

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

### **Сабылина Альбина Васильевна**

старший научный сотрудник лаб. гидрохимии и гидрогеологии, к. х. н.  
Институт водных проблем Севера КарНЦ РАН,  
Федеральный исследовательский центр  
«Карельский научный центр РАН»  
пр. А. Невского, 50, Петрозаводск, Республика Карелия,  
Россия, 185030  
эл. почта: lgh-ivps@yandex.ru

### **Икко Ольга Игоревна**

ведущий химик лаб. гидрохимии и гидрогеологии  
Институт водных проблем Севера КарНЦ РАН,  
Федеральный исследовательский центр  
«Карельский научный центр РАН»  
пр. А. Невского, 50, Петрозаводск, Республика Карелия,  
Россия, 185030  
эл. почта: vos-olga-zenia@yandex.ru

## CONTRIBUTORS:

### **Sabylina, Albina**

Northern Water Problems Institute,  
Karelian Research Centre, Russian Academy of Sciences  
50 Al. Nevsky St., 185030 Petrozavodsk, Karelia, Russia  
e-mail: lgh-ivps@yandex.ru

### **Ikko, Olga**

Northern Water Problems Institute,  
Karelian Research Centre, Russian Academy of Sciences  
50 Al. Nevsky St., 185030 Petrozavodsk, Karelia, Russia  
e-mail: vos-olga-zenia@yandex.ru