

УДК 556.114.7(282.247.211)

СОДЕРЖАНИЕ ОРГАНИЧЕСКОГО ВЕЩЕСТВА И БИОГЕННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ В ГИДРО-КРИОГЕННОЙ СИСТЕМЕ ОНЕЖСКОГО ОЗЕРА

А. В. Сабылина, Т. А. Ефремова, О. И. Икко*

*Институт водных проблем Севера КарНЦ РАН, ФИЦ «Карельский научный центр РАН»
(пр. А. Невского, 50, Петрозаводск, Республика Карелия, Россия, 185030),
vos-olga-zenia@yandex.ru

В статье представлены результаты проведенного в марте 2021 г. исследования содержания биогенных, органических и взвешенных веществ в системе «снег на льду – лед – подледная вода» в центральной части Онежского озера и его крупнейших заливах (Петрозаводская и Кондопожская губы). Установлены закономерности распределения макро- и микроэлементов в сложной гидро-криогенной системе. Наибольшее содержание $P_{\text{общ}}$ и $N_{\text{общ}}$ выявлено в подледной воде. В снежном покрове Петрозаводской губы и центральной части озера среди азотсодержащих веществ преобладали нитраты, в Кондопожской губе – азот аммонийный; $P_{\text{общ}}$ был представлен преимущественно минеральными формами. Верхний слой льда исследованных районов озера характеризуется более высокими концентрациями биогенных веществ, чем нижний. В подледной воде в вершине Петрозаводской губы, куда впадает р. Шуя, преобладал $N_{\text{орг}}$, во внешней ее части – нитраты, в районе влияния очистных сооружений г. Петрозаводска – азот аммонийный, доля $P_{\text{мин}}$ уменьшалась от вершины залива к внешнему району (от 63 до 40 % от $P_{\text{общ}}$). В Кондопожской губе, подверженной влиянию сточных вод ЦБК, азот был представлен преимущественно минеральными формами, их доля снижалась от вершины к внешней части, тогда как в пространственном распределении форм фосфора наблюдалась обратная тенденция. Содержание органического вещества в снеге и во льду в исследованных районах Онежского озера было низким. Повышенная концентрация ОБ в подледной воде заливов по сравнению с центральной частью озера обусловлена влиянием речного стока и сточных вод.

Ключевые слова: снег на льду; лед; подледная вода; Кондопожская губа; Петрозаводская губа; Центральный плес озера

Для цитирования: Сабылина А. В., Ефремова Т. А., Икко О. И. Содержание органического вещества и биогенных элементов в гидро-криогенной системе Онежского озера // Труды Карельского научного центра РАН. 2024. № 5. С. 69–82. doi: 10.17076/lim1949

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

A. V. Sabylina, T. A. Efremova, O. I. Ikko*. CONTENT OF ORGANIC MATTER AND NUTRIENTS IN THE HYDRO-CRYOGENIC SYSTEM OF LAKE ONEGO

Northern Water Problems Institute, Karelian Research Centre, Russian Academy of Sciences (50 Al. Nevsky Ave., 185030 Petrozavodsk, Karelia, Russia), *vos-olga-zenia@yandex.ru

The article presents the results of a survey of the content of nutrients, organic matter and suspended substances in the snow-on-ice/ice/under-ice-water system in the Central part of Lake Onego and its largest bays (Petrozavodsk Bay and Kondopoga Bay) carried out in March 2021. The study revealed patterns in the distribution of macro- and micro-nutrients in a complex hydro-cryogenic system. The highest content of total phosphorus (TP) and total nitrogen (TN) was found in under-ice water. Nitrogen-bearing substances in the snow cover of Petrozavodsk Bay and the central part of the lake were dominated by nitrates, and in Kondopoga Bay by ammonium nitrogen; TP was chiefly represented by mineral forms. The upper layer of ice in the studied areas of the lake is characterized by higher concentrations of nutrients than the lower layer. In under-ice water at the top of Petrozavodsk Bay, where the Shuya River discharges, the prevalent form was total organic nitrogen (TON), in the outer part – nitrates, in the impact area of the Petrozavodsk City water treatment facilities – ammonium nitrogen; the share of inorganic phosphorus decreased from the top of the bay towards its outlet (from 63 to 40 % of TP). In Kondopoga Bay, affected by pulp and paper mill wastewater, nitrogen was represented mainly by mineral forms, their share decreasing from the top towards the outlet, whereas the trend in the spatial distribution of phosphorus forms was the opposite. The content of organic matter (OM) in snow and ice in the studied regions of Lake Onego was low. The higher OM concentration in under-ice water of the bays compared to the central part of the lake is due to the influence of river runoff and wastewater discharges.

Keywords: snow on ice; ice; under-ice water; Petrozavodsk Bay; Kondopoga Bay; Central part of Lake Onego

For citation: Sabylina A. V., Efremova T. A., Ikko O. I. Content of organic matter and nutrients in the hydro-cryogenic system of Lake Onego. *Trudy Karel'skogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of the Karelian Research Centre RAS*. 2024. No. 5. P. 69–82. doi: 10.17076/lim1949

Funding. The article was prepared using federal budget funding under state assignment to KarRC RAS (Northern Water Problems Institute KarRC RAS).

Введение

Атмосферные осадки играют существенную роль в формировании химического состава поверхностных вод, при этом поступление веществ на сушу в различных климатических зонах отличается, и оно, как правило, увеличивается при переходе от зоны тундры к зоне субтропиков [Китаев, 1999]. Снег, обладая высокой сорбционной способностью, сохраняет свой геохимический состав до начала таяния [Алексеев, 2013]. В снежном покрове содержится информация как о локальной деятельности человека (промышленных центров, железных и автомобильных дорог), так и о веществах, поступивших из отдаленных районов.

Ледяной покров участвует в миграции биогенных, органических веществ и микроэлементов в водоем [Котляков, 1994]. При таянии льда биогенные элементы высвобождаются в поверхностные слои воды, где создаются благоприятные экологические условия для развития

гидробионтов, особенно в литоральных областях водоемов [Иванов, 1998; Сабылина, Рыжиков, 2018]. Кроме того, со льдом может происходить перемещение химических, главным образом биогенных, веществ природного и антропогенного происхождения из загрязненных районов водоема в области, не подверженные прямому антропогенному влиянию.

Ледостав на Онежском озере в среднем продолжается с конца ноября по май (5–6 месяцев) [Ефремова, Пальшин, 2015], что обуславливает большой вклад снега и льда в поставку химических веществ в его воды. Значительный объем льдов, сформировавшихся в антропогенно загрязненных заливах Онежского озера (Кондопожская и Петрозаводская губы), выносятся в открытое озеро во время ледохода [Бояринов, Петров, 1991]. В литературе имеются обширные сведения о содержании и распределении биогенных и органических веществ в воде Онежского озера [Сабылина и др., 2010; Органическое ..., 2012, 2017; Лозовик и др., 2016;

Galakhina et al., 2022]. Однако данных по их содержанию во льду и снеге Онежского озера и других водных объектов, находящихся на территории республики и РФ в целом, мало [Анисимова, Роговская, 1974; Иванов, 1998; Воробьева и др., 2010; Алексеев, 2013; Сабылина, Ефремова, 2018; Сабылина и др., 2020]. Поэтому целью работы являлось изучение закономерностей распределения биогенных, органических и взвешенных веществ в системе «снег на льду – лед – подледная вода» и их вовлечения в лед из подледной воды на примере Петрозаводской и Кондопожской губ, подверженных антропогенному воздействию, и относительно чистого Центрального плеса Онежского озера.

Исследование выполнено на научном оборудовании Центра коллективного пользования Федерального исследовательского центра «Карельский научный центр Российской академии наук».

Материалы и методы

Онежское озеро (площадь зеркала 9720 км²), расположенное между 60°53' и 64°55' с.ш., является одним из самых северных среди крупнейших озер мира, что обуславливает особенности его радиационного и термического режима. Онежское озеро отличается сложностью рельефа и морфологии котловины. Северная часть его котловины (80 %) находится в пределах Балтийского кристаллического щита, сложена коренными малорастворимыми породами (граниты, гнейсограниты и др.), а южная – в пределах осадочного чехла Русской платформы. Основная часть озерной котловины – Центральный плес (площадью 6610 км²) – заполнена олиготрофными маломинерализованными (38 мг/л) водами высокого качества с низким содержанием органического вещества ($C_{\text{орг}} = 6,5 \pm 0,5$ мг/л) и биогенных элементов ($P_{\text{общ}} = 8 \pm 1$ мкг/л, $N_{\text{общ}} = 0,39 \pm 0,07$ мг/л) [Сабылина, 2015; Galakhina et al., 2022]. Толщина льда в открытой части озера достигает 40–60 см.

Крупнейшие заливы Онежского озера – Петрозаводская и Кондопожская губы – испытывают существенное антропогенное влияние, связанное с поступлением сточных вод промышленных центров, расположенных на их побережьях [Сабылина, 1999, 2015; Galakhina et al., 2022].

Петрозаводская губа (площадь зеркала 73 км²) выделяется из всех губ озера высокой проточностью, период с учетом внешнего водообмена составляет 0,13 года (без учета – 0,38 года) [Лозовик и др., 2019]. В вершинную часть залива впадает второй по величине приток озера – р. Шуя (среднегодовой объем стока – 3,2 км³), воды которой содержат значительное

количество аллохтонного органического вещества гумусовой природы [Курапцева, Лозовик, 1991]. Во внешнюю часть Петрозаводской губы поступают сточные воды от очистных сооружений г. Петрозаводска, которые оказывают влияние на гидрохимический режим залива, главным образом в зимний период [Efremova et al., 2019]. Воды Петрозаводской губы являются маломинерализованными (34 мг/л) с повышенным содержанием органического вещества ($C_{\text{орг}} = 8,5 \pm 3,1$ мг/л) и биогенных элементов ($P_{\text{общ}} = 17 \pm 8$ мкг/л, $N_{\text{общ}} = 0,45 \pm 0,06$ мг/л) по сравнению с центральной частью озера [Сабылина, 2015; Galakhina et al., 2022]. Ледяной покров в Петрозаводской губе устанавливается в середине декабря, его толщина составляет 40–60 см, очищение залива ото льда происходит в начале мая [Озера..., 2013].

Кондопожская губа (площадь зеркала 223 км²) – один из крупнейших глубоководных заливов Онежского озера, в его вершинную часть через Кондопожский канал поступает около 95 % речного стока р. Суны (объем стока 2,4 км³), третьего притока по объему стока воды в озеро. В этот же район губы сбрасываются сточные воды Кондопожского промцентра, в среднем их объем составляет около 50 млн м³ в год [Государственный..., 2019–2021]. Вода залива характеризуется низкой минерализацией (38 мг/л), повышенным содержанием органического вещества ($C_{\text{орг}} = 8,0 \pm 4,1$ мг/л) и биогенных элементов ($P_{\text{общ}} = 24 \pm 31$ мкг/л, $N_{\text{общ}} = 0,40 \pm 0,10$ мг/л) по сравнению с центральной частью озера [Сабылина, 2015]. Ледяной покров в Кондопожской губе устанавливается в начале декабря, его толщина достигает 40–70 см, очищение ото льда происходит во второй половине мая [Озера..., 2013].

В среднем за год на зеркало Онежского озера выпадает 6,4 км³ атмосферных осадков, из них 55 % приходится на твердые осадки [Озера..., 2013; Ефремова, Пальшин, 2015].

Гидрохимические исследования снега на льду, льда и подледной воды проводились в Петрозаводской (ст. Р1, Р2, Р7, Р4) и Кондопожской (ст. К3, К50, К7) губах и Центральном плесе (ст. С3) Онежского озера с 17 по 31 марта 2021 г. (рис. 1). Эколого-геохимическое исследование гидро-криогенной (трехфазной) системы «снег на льду – лед – подледная вода» выполнено по ранее предложенной схеме [Сабылина, Ефремова, 2018], которая предусматривает разделение ядра льда по его цвету на два образца: верхний слой «а», сравнительно старый, и нижний «б», более молодой. Расплавление льда и снега проводили в лаборатории при температуре 20 °С.

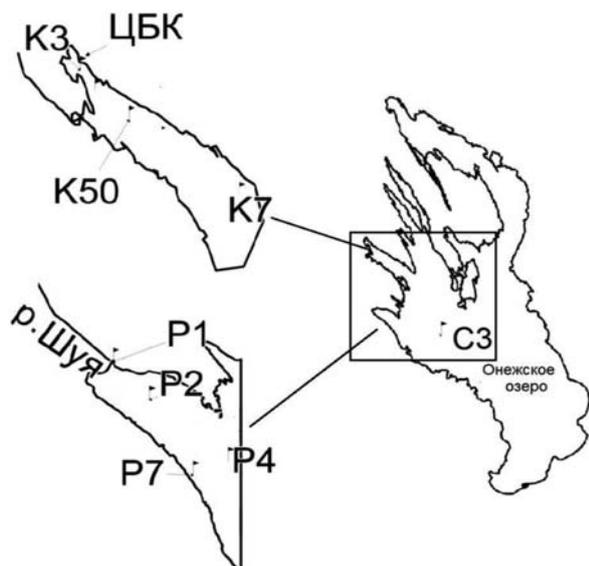


Рис. 1. Схема станций отбора проб снега на льду, льда и подледной воды в Онежском озере в марте 2021 г.

Fig. 1. Schematic map of snow, ice and under-ice water sampling stations in Lake Onego in March 2021

В пробах подледной воды, льда и снега определяли содержание биогенных элементов ($P_{\text{мин}}$, $P_{\text{общ}}$, NH_4^+ , NO_3^- , NO_2^- , $N_{\text{общ}}$, Si), органического вещества по косвенным его показателям (цветность, ПО и ХПК) и взвешенного вещества, анализы проводили по стандартным методикам [Аналитические..., 2017]. Концентрацию $N_{\text{орг}}$ рассчитывали по разности между $N_{\text{общ}}$ и суммой неорганических его форм. Содержание органического углерода определяли только в подледной воде фотохимическим методом с использованием персульфата аммония в качестве окислителя, а также ИК-спектроскопическим детектированием [Зобков, Зобкова, 2015].

Результаты и обсуждение

В гидро-криогенной системе трех исследованных районов Онежского озера наибольшее содержание $P_{\text{общ}}$ и $N_{\text{общ}}$ выявлено в подледной воде (табл. 1), за исключением ст. Р7, находящейся в зоне влияния очистных сооружений г. Петрозаводска. В снеге на этой станции концентрация $N_{\text{общ}}$ была выше в 1,3 раза по сравнению с подледной водой. Соотношение форм азота и фосфора в снеге, льду и подледной воде различалось. В снежном покрове Петрозаводской, Кондопожской губ и центральной части Онежского озера концентрации $N_{\text{общ}}$ и $P_{\text{общ}}$ изменялись в пределах 0,17–0,47 мг/л и 5–40 мкг/л соответственно (табл. 1). Минимальное содержание $N_{\text{общ}}$ установлено в вершине Петрозаводской губы (ст. Р1), в месте впадения

р. Шуи, максимальное – на ст. Р7, находящейся в зоне влияния очистных сооружений г. Петрозаводска. При этом в снеге на ст. Р1, расположенной в непосредственной близости от ООО «Соломенский лесозавод» и автомагистрали, обнаружена высокая концентрация $P_{\text{общ}}$ (табл. 1), который был представлен в основном $P_{\text{мин}}$ (85 % от $P_{\text{общ}}$), она почти в 2 раза превышала его содержание в подледной воде, а во льду – более чем в 4 раза. Среди форм азота в снеге большинства исследованных станций преобладали минеральные (в среднем 89 % от $N_{\text{общ}}$) и только на ст. Р7 $N_{\text{общ}}$ был представлен преимущественно органическими соединениями (57 % от $N_{\text{общ}}$).

В снежном покрове Петрозаводской губы среди минеральных форм азота преобладали нитраты (рис. 2), их среднее содержание составляло 0,12 мг N/л, что в 1,3 раза выше средней концентрации аммонийного азота. В Кондопожской губе, где существенное влияние оказывают аэрозольные поступления от Кондопожского ЦБК, в снежном покрове преобладает аммонийная форма азота (рис. 2). В снеге Центральной плеса озера на долю NH_4^+ приходится 39 %, NO_3^- – 56 % и $N_{\text{орг}}$ – 7 % от $N_{\text{общ}}$.

Среди форм фосфора в снеге большинства исследованных станций преобладал $P_{\text{мин}}$ (57–85 % от $P_{\text{общ}}$), и только на станциях Р7, К3 и К7 его доля не превышала 50 %.

Результаты исследований химического состава обоих образцов льда по вертикальному профилю в подверженных антропогенному влиянию Петрозаводской и Кондопожской губах показали, что верхний слой льда характеризуется более высокими концентрациями биогенных веществ, чем нижний (табл. 1).

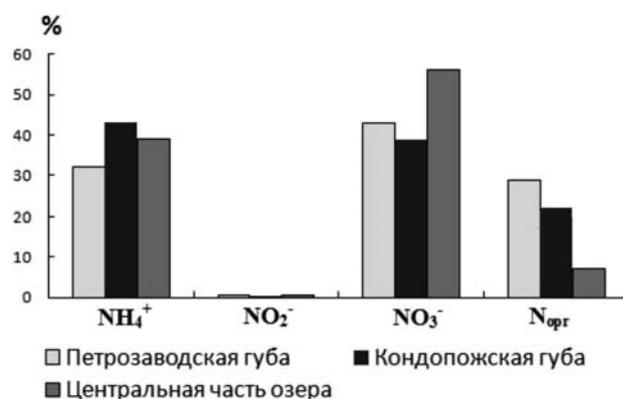


Рис. 2. Соотношение азотсодержащих соединений в снеге на льду в Петрозаводской и Кондопожской губах и центральной части Онежского озера в марте 2021 г.

Fig. 2. Ratio of nitrogen-containing compounds in snow on ice in Petrozavodsk Bay, Kondopoga Bay and the central part of Lake Onego in March 2021

Таблица 1. Содержание биогенных веществ в снеге, во льду и подледной воде в Онежском озере в марте 2021 г.
Table 1. Content of nutrients in snow, ice and under-ice water in Lake Onego in March 2021

№ станции Station number	Объект Object		NO ₂ ⁻	NO ₃ ⁻	NH ₄ ⁺	N _{общ} TN	N _{орг} TON	P _{мин} IP	P _{общ} TP	Si
			мгN/л mgN/L					мкг/л µg/L		мг/л mg/L
С3	Снег Snow		0,002	0,15	0,105	0,27	0,02	4	7	0,03
	Лед Ice	а	0,001	0,03	0,068	0,09	< 0,01	0	4	< 0,01
		б	0,001	< 0,01	0,116	0,12	< 0,01	1	4	< 0,01
Подледная вода Under-ice water			0,001	0,19	0,031	0,40	0,17	3	6	0,39
Р1	Снег Snow		0,002	0,04	0,103	0,17	0,03	34	40	0,06
	Лед Ice	а	0,004	0,03	0,096	0,20	0,07	4	10	0,19
		б	0,002	< 0,01	0,069	0,07	< 0,01	7	8	0,04
Подледная вода Under-ice water			0,001	0,12	0,028	0,49	0,34	15	24	2,71
Р2	Снег Snow		0,002	0,18	0,092	0,28	< 0,01	4	6	0,06
	Лед Ice	а	0,004	0,12	0,098	0,31	0,09	2	4	0,11
		б	0,002	< 0,01	0,062	0,10	0,04	1	4	0,05
Подледная вода Under-ice water			0,001	0,16	0,015	0,44	0,27	7	16	1,51
Р7	Снег Snow		0,001	0,11	0,092	0,47	0,27	4	13	0,01
	Лед Ice	а	0,004	0,13	0,113	0,25	0,01	2	7	0,05
		б	0,002	< 0,01	0,063	0,07	< 0,01	1	5	< 0,01
Подледная вода Under-ice water			0,001	0,07	0,184	0,36	0,11	5	12	0,79
Р4	Снег Snow		0,001	0,14	0,067	0,21	< 0,01	3	5	< 0,01
	Лед Ice	а	0,004	0,03	0,087	0,13	0,01	3	6	0,02
		б	0,002	< 0,01	0,053	0,06	< 0,01	3	4	0,01
Подледная вода Under-ice water			0,001	0,18	0,031	0,36	0,14	4	10	0,79
К3	Снег Snow		0,002	0,12	0,102	0,31	0,09	10	20	0,01
	Лед Ice	а	0,004	0,02	0,067	0,13	0,04	1	7	0,03
		б	0,002	< 0,01	0,050	0,06	0,01	4	5	0,01
Подледная вода Under-ice water			0,002	0,14	0,232	0,48	0,10	1	20	1,94
К50	Снег Snow		0,001	0,07	0,107	0,22	0,05	13	22	0,02
	Лед Ice	а	< 0,001	0,01	0,060	0,09	0,02	23	29	0,04
		б	0,001	< 0,01	0,052	0,06	< 0,01	2	3	< 0,01
Подледная вода Under-ice water			0,001	0,19	0,051	0,34	0,10	10	20	0,87
К7	Снег Snow		0,001	0,07	0,083	0,16	0,01	4	9	< 0,01
	Лед Ice	а	0,002	0,03	0,084	0,13	0,01	2	2	< 0,01
		б	0,002	< 0,01	0,072	0,08	< 0,01	1	3	< 0,01
Подледная вода Under-ice water			0,001	0,23	0,044	0,38	0,11	4	10	0,38

Примечание. Здесь и в табл. 4, 5: а – верхний слой льда, б – нижний слой льда.

Note. Here and in Tables 4, 5: a – top layer of ice, б – bottom layer of ice.

В ледяном покрове исследованных районов озера концентрация аммонийного азота в 1,2–6,5 раза выше, чем в подледной воде (табл. 1). Среди азотсодержащих соединений во льду Петрозаводской и Кондопожской губ среди форм азота преобладают ионы аммония (табл. 2).

Содержание общего фосфора, как и соединений азота, выше в верхнем слое льда исследованных районов Онежского озера и изменялось в пределах 2–29 мкг/л (в среднем 9) и меньше в нижнем – 3–8 мкг/л (в среднем 5). При этом около 85 % $P_{\text{общ}}$ приходится на минеральные формы. Средняя концентрация $P_{\text{мин}}$ в снеге Петрозаводской и Кондопожской губ

выше соответственно в 4 и 1,7 раза по сравнению с подледной водой, а во льду она выше в 11 и 1,7 раза (табл. 3).

В ледяном покрове Петрозаводской губы содержание $P_{\text{общ}}$ изменяется в узких пределах, и в разных по возрасту слоях льда оно близкое: в образце «а» – 4–9 мкг/л (в среднем 7 мкг/л), в образце «б» – 4–8 мкг/л (в среднем 5) (рис. 3). Концентрация $P_{\text{общ}}$ в ледяном покрове Кондопожской губы изменялась от 2 до 29 мкг/л (рис. 4). Максимальная концентрация $P_{\text{общ}}$ обнаружена в верхнем слое льда на ст. К50, что в 1,4 раза выше, чем в подледной воде (см. табл. 1).

Таблица 2. Соотношение азотсодержащих соединений (мгN/л) во льду Петрозаводской и Кондопожской губ в марте 2021 г.

Table 2. Ratio of nitrogen-containing compounds (mgN/L) in ice in Petrozavodsk and Kondopoga Bays in March 2021

	Петрозаводская губа Petrozavodsk Bay	Кондопожская губа Kondopoga Bay
Верхний слой льда Top layer of ice	$\text{NO}_2^- < \text{N}_{\text{орг}} = \text{NO}_3^- < \text{NH}_4^+$ 0,002 0,06 0,06 0,1	$\text{NO}_2^- < \text{N}_{\text{орг}} = \text{NO}_3^- < \text{NH}_4^+$ 0,002 0,02 0,02 0,07
Нижний слой льда Bottom layer of ice	$\text{NO}_2^- < \text{N}_{\text{орг}} < \text{NO}_3^- < \text{NH}_4^+$ 0,002 0,02 0,04 0,06	$\text{NO}_2^- < \text{NO}_3^- < \text{N}_{\text{орг}} < \text{NH}_4^+$ 0,002 0,01 0,02 0,06

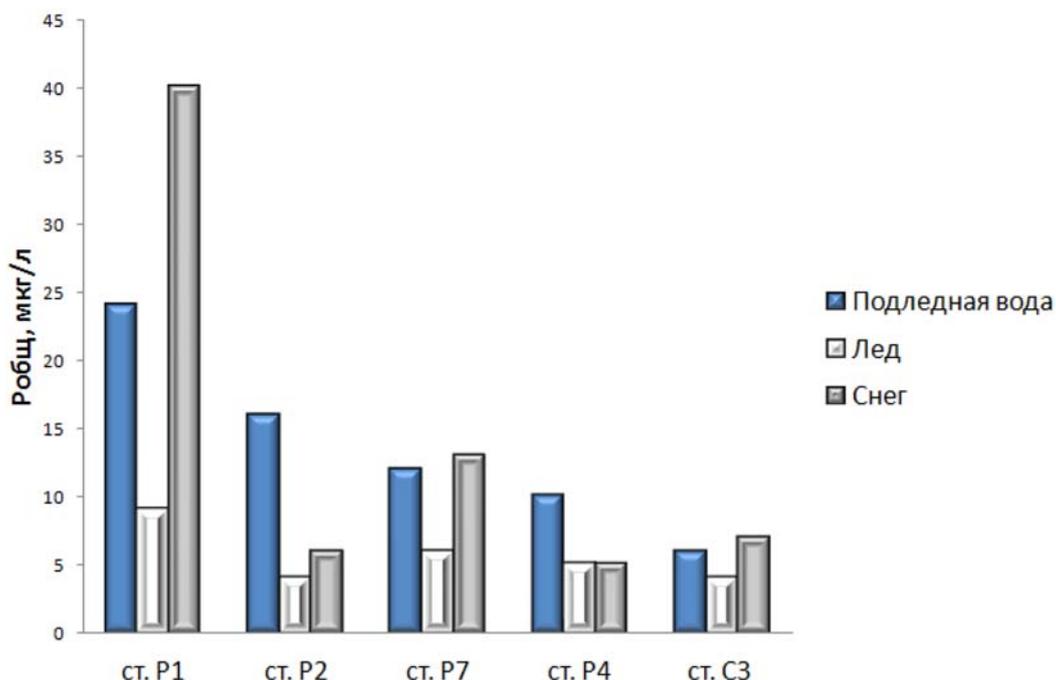


Рис. 3. Распределение концентрации общего фосфора в снеге на льду, во льду (среднее значение) и подледной воде в Петрозаводской губе (ст. P1, P2, P7, P4) и Центральном плесе (ст. C3) Онежского озера в марте 2021 г.

Fig. 3. Distribution of total phosphorus concentration in snow on ice, in ice (average value) and under-ice water in Petrozavodsk Bay (st. P1, P2, P7, P4) and in Central reach (st. C3) of Lake Onego in March 2021

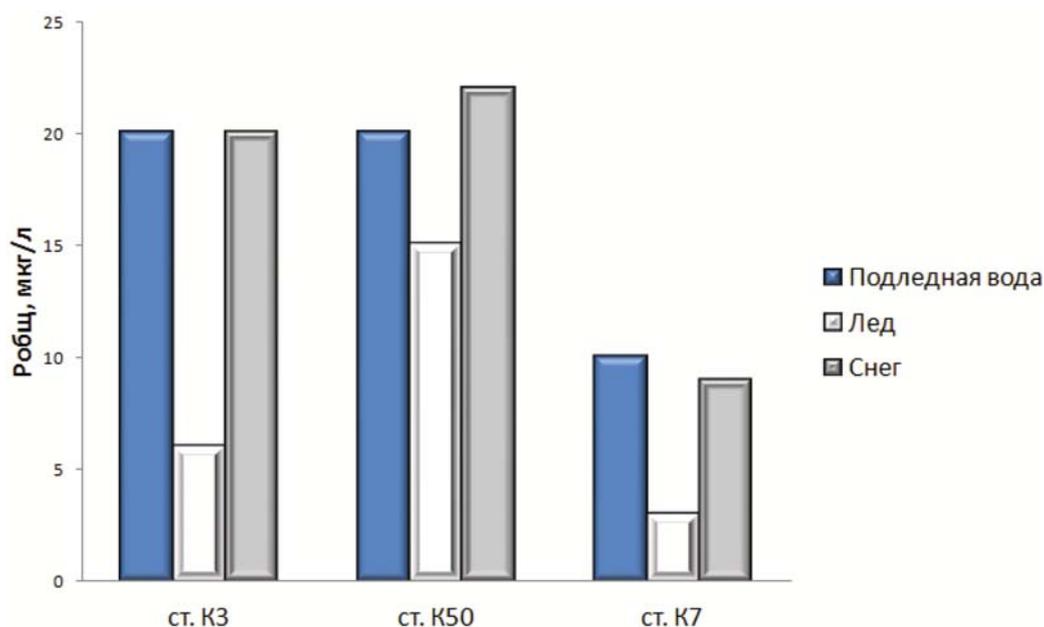


Рис. 4. Распределение концентрации общего фосфора в снеге на льду, во льду (среднее значение) и подледной воде в Кондопожской губе (ст. К3, К50, К7) Онежского озера в марте 2021 г.

Fig. 4. Distribution of total phosphorus concentration in snow on ice, in ice (average value) and under-ice water in Kondopoga Bay (st. K3, K50, K7) of Lake Onego in March 2021

Таблица 3. Среднее содержание $P_{\text{мин}}$ и $P_{\text{общ}}$ (мкг/л) в системе «снег на льду – лед – подледная вода» в Петрозаводской и Кондопожской губах в марте 2021 г.

Table 3. Average IP and TP content ($\mu\text{g/L}$) in the system «snow on ice – ice – under-ice water» in Petrozavodsk and Kondopoga Bays in March 2021

	Петрозаводская губа Petrozavodsk Bay	Кондопожская губа Kondopoga Bay
Снег Snow	$P_{\text{мин}} < P_{\text{общ}}$ IP < TP 34 40	$P_{\text{мин}} < P_{\text{общ}}$ IP < TP 10 20
Лед Ice	$P_{\text{мин}} < P_{\text{общ}}$ IP < TP 3 6	$P_{\text{мин}} < P_{\text{общ}}$ IP < TP 6 8
Подледная вода Under-ice water	$P_{\text{мин}} < P_{\text{общ}}$ IP < TP 8 16	$P_{\text{мин}} < P_{\text{общ}}$ IP < TP 6 17

В Петрозаводской губе в системе «снег на льду – лед – подледная вода» средняя концентрация общего азота в подледной воде (0,41 мг/л) выше, чем в снеге и во льду, в 2,5 и 1,5 раза соответственно (рис. 5). В вершинном районе губы (ст. P1), где влияние высокогумусных вод р. Шуи велико, содержание $N_{\text{орг}}$ в подледной воде в 2,3 раза выше его минеральных форм (см. табл. 1). В центральном (ст. P2) и внешнем (ст. P4) районах губы суммарная концентрация минерального азота в подледной воде сравнима с органическим азотом. Однако в Кондопожской губе в подледной воде содержание $N_{\text{орг}}$ в 1,5–2 раза ниже, чем суммарная концентрация ($\text{NH}_4^+ + \text{NO}_3^-$) (см. табл. 1).

Распределение химических веществ между льдом и подледной водой характеризуется коэффициентом вовлечения, который рассчитывается как отношение концентрации вещества во льду к концентрации вещества в подледной воде [Иванов, 1998]. Средние коэффициенты вовлечения аммонийного (NH_4^+) и фосфатного (PO_4^{3-}) ионов в лед в Петрозаводской губе составляют 2,7 и 0,5, а в Кондопожской – 1 и 1,4. Аммонийный азот – восстановленная форма азота, которая образуется при разложении органического вещества в водах. Концентрация органического вещества в подледных водах Петрозаводской губы ($C_{\text{орг}} = 15$ мг/л) в 2 раза выше, чем в водах

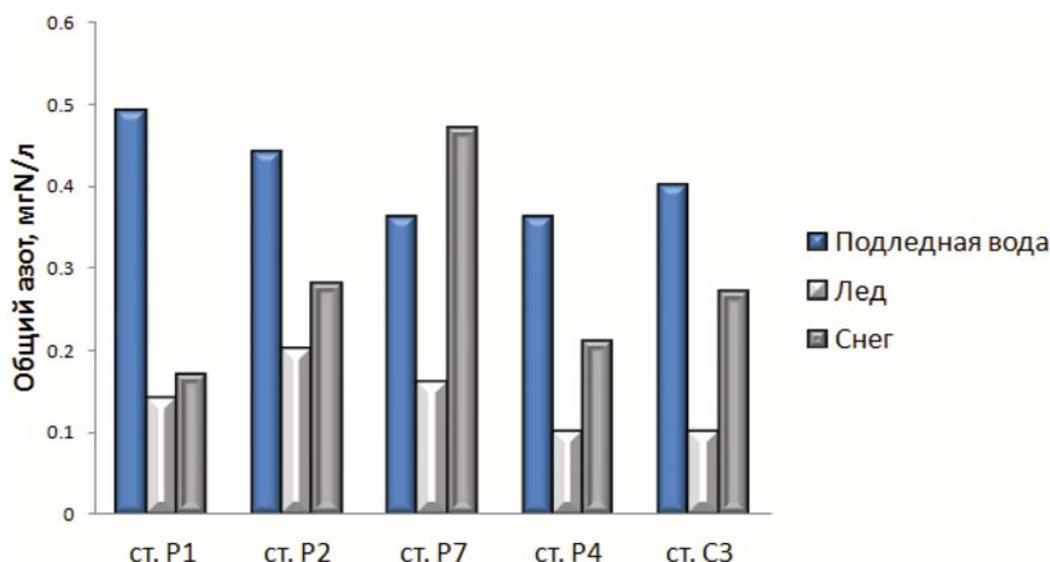


Рис. 5. Распределение концентрации общего азота в снеге, во льду (среднее значение) и подледной воде в Петрозаводской губе (ст. P1, P2, P7, P4) и Центральном плесе Онежского озера (ст. C3) в марте 2021 г.

Fig. 5. Distribution of total nitrogen concentration in snow, ice (average value) and under-ice water in Petrozavodsk Bay (st. P1, P2, P7, P4) and in Central reach of Lake Onego (st. C3) in March 2021

Кондопожской губы. Вовлечение в лед нитрат-ионов в среднем в 10 раз меньше, чем аммонийного иона (табл. 4). Высокий средний коэффициент вовлечения фосфатов в лед в Кондопожской губе обусловлен загрязненными сточными водами ЦБК. Так, в работе [Сергеев, Батюк, 1978] установлено, что дополнительное количество фосфатов образуется в водном растворе при размораживании льда, содержащего фосфорорганические вещества.

Высокая прозрачность пресноводного льда повышает проникновение солнечной радиации. При ледообразовании растущие кристаллы льда захватывают различные примеси, в том числе одноклеточные водоросли, и захваченная примесь имеет высокую подвижность [Ivanov, 1993]. Так, например, во льду Петрозаводской губы концентрация аммонийных (в среднем 0,08 мгN/л), нитратных (в среднем 0,04 мгN/л) и фосфатных (в среднем 6 мкг/л) ионов обеспечивает жизнедеятельность водорослей. С. Ф. Комулайнен с соавторами показали, что во льду небольших озер и рек Карелии среди водорослей преобладают диатомовые (*Aulacoseira islandica*, *Asterionella formosa*) (83 % общей численности) и цианобактерии (5 %) [Komulainen et al., 2012]. В полярных льдах Арктики и Антарктики насчитывается более 100 видов альгофлоры: численность клеток водорослей в ледовой фазе часто бывает

больше, чем в подледной воде [Melnikov, 1998; Мельников, 2003].

Содержание кремния в Петрозаводской губе в подледной воде составляет 0,79–2,71 мг/л (в среднем 1,4), а во льду – 0,01–0,19 мг/л (в среднем 0,06); причем его концентрация в верхних слоях льда в 2–5 раз выше, чем в нижних (см. табл. 1). Коэффициент вовлечения кремния в лед в Петрозаводской губе очень низкий и колеблется от 0,01 до 0,07 (в среднем 0,03), в Кондопожской – от 0,01 до 0,04 (в среднем 0,02). Так, например, в воде оз. Байкал коэффициент вовлечения SiO_2 в лед из подледной воды низкий и колеблется от 0,01 до 0,03 [Анисимова, Роговская, 1974].

Содержание ОВ в снежном покрове определяется множеством факторов, главными из которых являются действие локальных источников загрязнения и трансграничный перенос воздушных масс [Межрегиональное..., 1998]. Содержание органического вещества в снеге на льду в исследованных районах Онежского озера характеризуется как низкое (табл. 5). Диапазон концентраций по косвенному показателю ОВ (по ПО) варьирует от 0,32 до 2,11 мгО/л (в среднем 0,73 мгО/л), что согласуется с данными [Лозовик, Потапова, 2006; Потапова, 2011], согласно которым на территорию Республики Карелия с атмосферными осадками в среднем поступает 0,94 мгО/л ОВ (по ПО).

Таблица 4. Коэффициенты вовлечения биогенных веществ в лед в Петрозаводской и Кондопожской губах и центральной части Онежского озера в марте 2021 г.

Table 4. Coefficients of nutrients entrainment in ice in Petrozavodsk Bay, Kondopoga Bay and the central part of Lake Onego in March 2021

Станция Station	Объект Object	NO ₂ ⁻	NO ₃ ⁻	NH ₄ ⁺	N _{орг} TON	P _{мин} TP	P _{общ} TP
Петрозаводская губа Petrozavodsk Bay							
P1	а	4,0	0,2	3,4	0,2	0,3	0,4
	б	2,0	0,02	2,5	0,03	0,5	0,3
P2	а	4,0	0,07	6,5	0,3	0,3	0,3
	б	2,0	0,001	4,1	1,5	0,1	0,3
P7	а	4,0	1,1	0,6	0,1	0,4	0,6
	б	2,0	0,04	0,3	0,1	0,2	0,4
P4	а	4,0	0,2	2,8	0,07	0,8	0,6
	б	2,0	0,02	1,7	0,07	0,8	0,4
Кондопожская губа Kondopoga Bay							
K3	а	2	0,1	0,3	0,4	1,0	0,4
	б	1	0,01	0,2	0,1	4,0	0,3
K50	а	1	0,6	0,2	0,1	2,3	1,5
	б	1	0,02	2,1	0,2	0,2	0,2
K7	а	2	0,1	1,1	0,1	0,5	0,2
	б	2	0,001	1,9	0,1	0,3	0,3
Центральная часть Central part							
C3	а	1	0,12	2,0	0,06	<0,001	0,7
	б	1	0,05	3,7	0,06	0,3	0,7

Пространственное распределение ОВ в снеге Петрозаводской губы уменьшается от вершинного района (ПО – 0,84 мгО/л) к внешнему (ПО – 0,32 мгО/л) (табл. 5). Максимальная концентрация ОВ в снеге обнаружена в центральной части Кондопожской губы на ст. К50. Содержание ОВ (по ПО) и взвешенных веществ достигало 2,11 мгО/л и 24 мг/л соответственно (табл. 5), что, по всей видимости, обусловлено локальным переносом воздушных масс от Кондопожского ЦБК.

Содержание ОВ в ледяном покрове Петрозаводской, Кондопожской губы и Центрального плеса озера очень низкое. Характерным для всех отобранных кернов льда является повышенное содержание ОВ (по косвенным показателям) в старом по возрасту образце «а». В Петрозаводской губе в профильных колонках льда в его верхнем образце «а» цветность изменяется от 8 до 20 град., ПО – от 0,68 до 3,04 мгО/л, в Кондопожской губе – от 3 до 12 град. и от 0,44 до 2,15 мгО/л соответственно. В нижнем слое льда (образец «б») эти показатели содержания ОВ в Петрозаводской губе ниже в 2–6 раз, в Кондопожской – в 2,3–4,4 раза (см. табл. 5). Во льду Центрального плеса озера перманганатная окисляемость невысокая: в образце

«а» она равна 0,48 мгО/л, в образце «б» – 0,28 мгО/л. В работе [Немировская и др., 2015] авторы также отмечают очень низкие концентрации органических соединений в полярных льдах Антарктики и Арктики.

Подледные воды в Петрозаводской губе содержат большое количество ОВ аллохтонной природы, что обусловлено поступлением в залив вод р. Шуи с высоким содержанием гумусовых веществ. Косвенные показатели содержания ОВ в воде в вершинной части достигают высоких значений: цветность 186 град., ПО – 20,24 мгО/л, во внешней ее части они уменьшаются в 2,9 и 2,2 раза соответственно. Значение косвенных показателей ОВ в подледной воде в вершинной части Кондопожской губы (цветность – 80 град., ПО – 13,76 мгО/л) примерно в 2 раза выше, чем во внешней ее районе (см. табл. 3). Подледные воды Центрального плеса озера характеризуются следующими величинами содержания ОВ: цветность – 36 град., ПО – 7,04 мгО/л, ХПК – 17,6 мгО/л, С_{орг} – 7,10 мг/л.

Коэффициент вовлечения органического вещества в лед по косвенному показателю содержания ОВ (по ПО) и относительному содержанию ПО (лед) / ПО (вода) составляет в среднем 0,08, что говорит об очень низком вовлечении ОВ в лед.

Таблица 5. Значения косвенных и прямых показателей содержания органического вещества в снеге, во льду и подледной воде в Онежском озере в марте 2021 г.

Table 5. Values of indirect and direct indicators of organic matter content in snow, ice and under-ice water in Lake Onego in March 2021

№ станции Station number	Объект Object		Цветность Color	Взв. вещ-во Suspended matter	ПО COD _{Mn}	ХПК COD _{Cr}	C _{орг} TOC
			Град. mg Pt-Co/L	мг/л mg/L	мгО/л mgO/L	мгО/л mg/L	мг/л mg/L
С3	Снег Snow		6	1,5	0,72	3,1	н/о
	Лед Ice	а	1	0,3	0,48	6,3	н/о
		б	1	0,2	0,28	1,6	н/о
Подледная вода Under-ice water		36	1,0	7,04	17,6	7,10	
Р1	Снег Snow		5	10,8	0,84	3,1	н/о
	Лед Ice	а	20	5,0	3,04	н/о	н/о
		б	7	1,8	0,80	н/о	н/о
Подледная вода Under-ice water		186	0,1	20,24	43,5	17,80	
Р2	Снег Snow		6	0,2	0,48	н/о	н/о
	Лед Ice	а	14	1,4	2,44	н/о	н/о
		б	4	0,6	0,40	н/о	н/о
Подледная вода Under-ice water		126	1,0	15,2	36,3	13,41	
Р7	Снег Snow		3	0,6	0,44	н/о	н/о
	Лед Ice	а	8	1,4	1,20	н/о	н/о
		б	2	0,5	0,24	н/о	н/о
Подледная вода Under-ice water		68	0,3	10,56	26,7	9,93	
Р4	Снег Snow		4	2,3	0,32	н/о	н/о
	Лед Ice	а	8	1,3	0,68	н/о	н/о
		б	2	0,4	0,32	н/о	н/о
Подледная вода Under-ice water		65	3,7	9,36	24,7	11,09	
К3	Снег Snow		4	4,0	0,56	н/о	н/о
	Лед Ice	а	12	5,6	2,15	н/о	н/о
		б	4	1,9	0,49	н/о	н/о
Подледная вода Under-ice water		80	1,1	13,76	32,1	12,63	
К50	Снег Snow		6	24,0	2,11	н/о	н/о
	Лед Ice	а	5	2,5	0,77	н/о	н/о
		б	3	1,3	0,28	н/о	н/о
Подледная вода Under-ice water		44	0,6	6,94	22,0	8,01	
К7	Снег Snow		2	1,2	0,40	н/о	н/о
	Лед Ice	а	3	1,5	1,01	н/о	н/о
		б	3	1,1	0,44	н/о	н/о
Подледная вода Under-ice water		32	0,2	8,2	16,5	6,0	

Примечание. н/о – не обнаружено.

Note. н/о – not found.

Выводы

Установлены особенности химического состава в системе «снег на льду – лед – подледная вода» на акватории Петрозаводской и Кондопожской губ и центральной части Онежского озера. Полученные данные по содержанию биогенных и органических веществ в сложной гидро-криогенной системе центральной части озера и крупнейших его заливов позволили установить основные закономерности распределения макро- и микроэлементов в изучаемой системе. В снеге на льду трех исследованных районов озера нитратный ион преобладает над аммонийным ионом. В вершинных районах губ, подверженных наиболее выраженному антропогенному влиянию, средние концентрации минерального фосфора в два раза выше, чем во льду, и близки к их содержанию в подледной воде. Содержание общего фосфора выше в верхнем слое льда и составляет в среднем 9, в нижнем слое – 4 мкг/л. При этом в общем фосфоре около 85 % приходится на минеральный. Коэффициент вовлечения минерального фосфора в лед в Петрозаводской губе равен 0,5, а в Кондопожской – 1,4. Концентрация общего азота в верхнем слое льда в среднем составляет 0,17 мгN/л, а в нижнем – в 2 раза меньше. Сумма минеральных форм азота (NH_4^+ , NO_3^- , NO_2^-) в верхнем и нижнем образцах льда преобладает над органическими, в среднем она равна 0,13 и 0,06 мгN/л соответственно. При этом на долю аммонийных ионов приходится 70 % суммы минеральных соединений азота. Коэффициент вовлечения аммонийного азота в лед в Петрозаводской губе высокий и составляет 0,2–6,5 (в среднем 3,3) и пониженный в Кондопожской губе – 0,1–0,4 (в среднем 0,2). Ледяной покров в Петрозаводской и Кондопожской губах и центральной части Онежского озера характеризуется низким содержанием ОВ. Коэффициент вовлечения в лед органического вещества (по перманганатной окисляемости) очень низкий (в среднем 0,08), при этом его содержание в верхних слоях льда выше, чем в нижних. Подледные воды Петрозаводской губы содержат большое количество органического вещества аллохтонной природы гумусового происхождения (средние величины: цветность – 111 град., ПО – 14 мгО/л). Содержание $\text{C}_{\text{орг}}$ в подледной воде Петрозаводской губы в среднем составляет 13,1 мг/л, что в два раза выше, чем в Кондопожской губе, и в три раза – по сравнению с центральной частью озера.

Литература

- Алексеев В. Р. Снежный покров как индикатор кумулятивного загрязнения земель // Лед и Снег. 2013. Т. 53, № 1. С. 127–140. doi: 10.15356/2076-6734-2013-1-127-140
- Аналитические, кинетические и расчетные методы в гидрохимической практике / Под ред. П. А. Лозовика, Н. А. Ефременко. СПб.: Нестор-История, 2017. 272 с.
- Анисимова Н. П., Роговская Л. Г. Изменение химического состава озерного льда во времени // Озера криолитозоны Сибири. Новосибирск: Наука, 1974. С. 128–137.
- Бояринов П. М., Петров М. П. Процессы формирования термического режима глубоких пресноводных водоемов. Л.: Наука, 1991. 175 с.
- Воробьева И. Б., Напрасникова Е. В., Власова Н. В. Исследование гидрокриогенных компонентов юго-западного побережья Байкала (эколого-геохимический аспект) // Лед и Снег. 2010. № 2(110). С. 56–60.
- Государственный доклад о состоянии окружающей среды Республики Карелия в 2018 г. / Министерство природных ресурсов и экологии Республики Карелия; ред. кол.: А. Н. Громцев (гл. ред.), О. Л. Кузнецов, Г. Т. Шкиперова. Петрозаводск, 2019. 314 с.
- Государственный доклад о состоянии окружающей среды Республики Карелия в 2019 г. / Министерство природных ресурсов и экологии Республики Карелия; ред. кол.: А. Н. Громцев (гл. ред.), О. Л. Кузнецов, Г. Т. Шкиперова. Петрозаводск, 2020. 248 с.
- Государственный доклад о состоянии окружающей среды Республики Карелия в 2020 г. / Министерство природных ресурсов и экологии Республики Карелия; ред. кол.: А. Н. Громцев (гл. ред.), О. Л. Кузнецов, А. Е. Курило, Е. В. Веденцова. Петрозаводск, 2021. 277 с.
- Ефремова Т. В., Пальшин Н. И. Многолетняя изменчивость температуры воды и ледовая фенология // Крупнейшие озера и водохранилища Северо-Запада европейской территории России: современное состояние и изменения экосистем при климатических и антропогенных воздействиях. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2015. С. 38–44.
- Зобков М. Б., Зобкова М. В. Устройство для определения органического углерода в воде с фотохимическим персульфатным окислением в системе непрерывного газового потока и ИК-Фурье спектрометрическим детектированием // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2015. № 8. С. 10–15.
- Иванов А. В. Криогенная метаморфизация химического состава природных льдов, замерзающих и талых вод. Хабаровск: Дальнаука, 1998. 164 с.
- Китаев С. П. Коэффициенты изменения концентраций веществ в воде атмосферных осадков и их биомассы озер различных природных зон Европы и Северной Америки. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 1999. 40 с.
- Котляков В. М. Мир снега и льда. М.: Наука, 1994. 284 с.
- Курапцева С. В., Лозовик П. А. Химический сток воды р. Шуи и ее притоков // Поверхностные воды

озерно-речной системы Шуи в условиях антропогенного воздействия. Петрозаводск: Карелия, 1991. С. 183–189.

Лозовик П. А., Бородулина Г. С., Карпечко Ю. В., Кондратьев А. В., Литвиненко А. В., Литвинова И. А. Биогенная нагрузка на Онежское озеро по данным натуральных наблюдений // Труды Карельского научного центра РАН. 2016. № 5. С. 35–52. doi: 10.17076/lim303

Лозовик П. А., Зобков М. Б., Бородулина Г. С., Токарев И. В. Оценка внешнего водообмена заливов озер по химическим показателям // Водные ресурсы. 2019. Т. 46, № 1. С. 91–101. doi: 10.31857/S0321-059646191-101

Лозовик П. А., Потапова И. Ю. Поступление химических веществ с атмосферными осадками на территорию Карелии // Водные ресурсы. 2006. Т. 33, № 1. С. 111–118.

Межрегиональное атмосферное загрязнение территорий. Республика Карелия / Под ред. В. Б. Миляева, М. С. Фещенко; НИИ охраны атмосферн. воздуха, Гос. ком. охраны окружающей среды по Респ. Карелия. СПб., 1998. 93 с.

Мельников И. А. Экосистемы морских льдов Антарктики: сравнительный анализ // Арктика и Антарктика. 2003. Вып. 2(36). С. 149–164.

Немировская И. А., Кравчишина М. Д., Реджепова З. Ю. Органические соединения и взвесь в снежно-ледяном покрове и почвах в районе антарктических станций России // Лед и Снег. 2015. Т. 55, № 4. С. 114–126. doi: 10.15356/2076-6734-2015-4-114-126

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

Органическое вещество и биогенные элементы во внутренних водоемах и морских водах: Труды V Всерос. симпозиума с междунар. участием (10–14 сентября 2012 г., Петрозаводск, Республика Карелия, Россия). Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2012. 465 с.

Органическое вещество и биогенные элементы во внутренних водоемах и морских водах: Труды VI Всерос. симпозиума с междунар. участием. Барнаул, 2017. 309 с.

Потапова И. Ю. Роль атмосферных осадков в формировании химического состава поверхностных вод Карелии // Труды Карельского научного центра РАН. 2011. № 4. С. 134–138.

Сабылина А. В. Гидрохимические исследования Онежского озера // Крупнейшие озера и водохранилища Северо-Запада европейской территории России: современное состояние и изменения экосистем при климатических и антропогенных воздействиях. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2015. С. 60–88.

Сабылина А. В., Ефремова Т. А. Химический состав льда и подледной воды Онежского озера (на примере Петрозаводской губы) // Лед и Снег. 2018. Т. 58, № 3. С. 417–428. doi: 10.15356/2076-6734-2018-3-417-428

Сабылина А. В., Ефремова Т. А., Икко О. И. Химический состав гидрокриогенной системы озер Мунозеро и Урозера (Республика Карелия, Россия) // Лед и Снег. 2020. Т. 60, № 4. С. 592–600. doi: 10.31857/S2076673420040063

Сабылина А. В., Лозовик П. А., Зобков М. Б. Химический состав воды Онежского озера и его притоков как индикатор экологического состояния // Водные ресурсы. 2010. Т. 37, № 6. С. 717–729.

Сабылина А. В., Рыжаков А. В. Гидрохимическая характеристика литоральной зоны Онежского озера // Водные ресурсы. 2018. Т. 45, № 2. С. 179–187. doi: 10.7868/S0321059618020074

Сабылина А. В. Современный гидрохимический режим Онежского озера // Онежское озеро. Экологические проблемы. Петрозаводск: Карел. науч. центр РАН, 1999. С. 58–109.

Сергеев Г. Б., Батюк В. А. Кримохимия. М.: Химия, 1978. 296 с.

Efremova T. A., Sabylina A. V., Lozovik P. A., Slaveykova V. I., Zobkova M. V., Pasche N. Seasonal and spatial variation in hydrochemical parameters of Lake Onego (Russia): insights from 2016 field monitoring // Inland Waters. 2019. Vol. 9(2). P. 227–238. doi: 10.1080/20442041.2019.1568097

Galakhina N., Zobkov M., Zobkova M. Current chemistry of Lake Onego and its spatial and temporal changes for the last three decades with special reference to nutrient concentrations // Environ. Nanotechnol. Monit. Manag. 2022. Vol. 17. Art. 100619. doi: 10.1016/j.enmm.2021.100619

Ivanov A. V. Natural ice as a component of Biosphere // Proc. 8th Int. Symp. on Okhotsk Sea and Sea Ice, ISY/Polar Ice Extent Workshop (1–5 February 1993. Mombetsu, Hokkaido, Japan). Mombetsu; 1993. P. 463–469.

Komulainen S., Slastina J., Klochkova M. Winter algae communities in the lakes and rivers ecosystems (Karelia, Russia) // Current advances in algal taxonomy and its applications: phylogenetic, ecological and applied perspective / Eds. K. Wolowski, I. Kaczmarek, J. Ehrman, A. Wojtal; W. Szafer Institute of Botany, Polish Academy of Sciences. Krakow, 2012. P. 243–251.

Melnikov I. A. Winter production of sea ice algae in the western Weddell Sea // J. Mar. Syst. 1998. Vol. 17. P. 195–205.

References

Alekseev V. R. Snow cover as an indicator of cumulative land pollution. *Led i Sneg = Ice and Snow*. 2013;53(1):127–140. (In Russ.). doi: 10.15356/2076-6734-2013-1-127-140

Anisimova N. P., Rogovskaya L. G. Changes in the chemical composition of lake ice over time. *Ozera krio-litozony Sibiri = Lakes of the Siberian cryolithozone*. Novosibirsk: Nauka; 1974. P. 128–137. (In Russ.)

Boyarinov P. M., Petrov M. P. The processes of thermal regime formation in deep freshwater reservoirs. Leningrad: Nauka; 1991. 175 p. (In Russ.)

Efremova T. V., Pal'shin N. I. Long-term variability of water temperature and ice phenology. *Krupneishie ozera i 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 part of Russia: current state and changes of ecosystems under climate variability and*

antropogenic impact. Petrozavodsk: KarRC RAS; 2015. P. 38–44. (In Russ.)

Efremova T. A., Sabylina A. V., Lozovik P. A., Slaveykova V. I., Zobkova M. V., Pasche N. Seasonal and spatial variation in hydrochemical parameters of Lake Onego (Russia): insights from 2016 field monitoring. *Inland Waters*. 2019;9(2):227–238. doi: 10.1080/20442041.2019.1568097

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

Galakhina N., Zobkov M., Zobkova M. Current chemistry of Lake Onego and its spatial and temporal changes for the last three decades with special reference to nutrient concentrations. *Environ. Nanotechnol. Monit. Manag.* 2022;17:100619. doi: 10.1016/j.enmm.2021.100619

Gromtsev A. N., Kuznetsov O. L., Shkiperova G. T. (eds.). State report on the environmental conditions in the Republic of Karelia in 2018. Petrozavodsk; 2019. 314 p. (In Russ.)

Gromtsev A. N., Kuznetsov O. L., Shkiperova G. T. (eds.). State report on the environmental conditions in the Republic of Karelia in 2019. Petrozavodsk; 2020. 248 p. (In Russ.)

Gromtsev A. N., Kuznetsov O. L., Kurilo A. E., Vedentsova E. V. (eds.). State report on the environmental conditions in the Republic of Karelia in 2020. Petrozavodsk; 2021. 277 p. (In Russ.)

Ivanov A. V. Cryogenic metamorphization of chemical composition of natural ice, freezing waters and ice-melt waters. Khabarovsk: Dal'nauka; 1998. 164 p. (In Russ.)

Ivanov A. V. Natural ice as a component of Biosphere. *Proc. 8th Int. Symp. on Okhotsk Sea and Sea Ice, ISY/Polar Ice Extent Workshop (1–5 February 1993. Mombetsu, Hokkaido, Japan)*. Mombetsu, 1993. P. 463–469.

Kitaev S. P. Change coefficients of substances concentrations in atmospheric precipitation and their biomass in lakes of various natural areas of Europe and North America. Petrozavodsk: KarRC RAS; 1999. 40 p. (In Russ.)

Komulaynen S., Slastina J., Klochkova M. Winter algae communities in the lakes and rivers ecosystems (Karelia, Russia). *Current advances in algal taxonomy and its applications: phylogenetic, ecological and applied perspective*. Krakow: Szafer Institute of Botany, Polish Academy of Sciences; 2012. P. 243–251.

Kotlyakov V. M. The world of snow and ice. Moscow: Nauka; 1994. 284 p. (In Russ.)

Kuraptseva S. V., Lozovik P. A. Chemical runoff of water from the Shuya River and its tributaries. *Poverkhnostnye vody ozerno-rechnoi sistemy Shui v usloviyakh antropogennogo vozdeistviya = Surface waters of the Shuya lake-river system under conditions of anthropogenic impact*. Petrozavodsk: Kareliya; 1991. P. 183–189. (In Russ.)

Lozovik P. A., Borodulina G. S., Karpechko Yu. V., Kondrat'ev A. V., Litvinenko A. V., Litvinova I. A. Nutrient load on Lake Onego according to field data. *Trudy Karel'skogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of Karelian Research Centre RAS*. 2016;5:35–52. (In Russ.). doi: 10.17076/lim303

Lozovik P. A., Efremenko N. A. (eds.). Analytical, kinetic and calculation methods in hydrochemical

practice. St. Petersburg: Nestor-Istoriya; 2017. 272 p. (In Russ.)

Lozovik P. A., Potapova I. Yu. The receipt of chemicals with atmospheric precipitation into the territory of Karelia. *Vodnye resursy = Water Resources*. 2006;33(1): 111–118. (In Russ.)

Lozovik P. A., Zobkov M. B., Borodulina G. S., Tokarev I. V. Assessing external water exchange of lake bays by water chemistry characteristics. *Vodnye resursy = Water Resources*. 2019;46(1):94–102. (In Russ.). doi: 10.1134/S0097807818050123

Melnikov I. A. Sea ice ecosystems of Antarctica: a comparative analysis. *Arktika i Antarktika = Arctic and Antarctic*. 2003;2(36):149–164. (In Russ.)

Melnikov I. A. Winter production of sea ice algae in the western Weddell Sea. *J. Mar. Syst.* 1998;17:195–205.

Milyaev V. B., Feshchenko M. S. (eds.). Interregional atmospheric pollution of territories. Republic of Karelia. St. Petersburg; 1998. 93 p. (In Russ.)

Nemirovskaya I. A., Kravchishina M. D., Redzhepova Z. U. Organic compounds and suspension in snow-ice covers and soils in the vicinities of the Russian Antarctic stations. *Led i Sneg = Ice and Snow*. 2015;55(4):114–126. (In Russ.). doi: 10.15356/2076-6734-2015-4-114-126

Organic matter and nutrients in inland reservoirs and sea waters. *Trudy V Seros. simpoziuma s mezhdunar. uchastiem (10-14 sent. 2012 g., Petrozavodsk, Respublika Kareliya, Rossiya) = Proceed. V All-Russ. Symposium with int. participation (Sept. 10-14, 2012. Petrozavodsk, Republic of Karelia, Russia)*. Petrozavodsk: KarRC RAS; 2012. 465 p. (In Russ.)

Organic matter and nutrients in inland reservoirs and sea waters. *Trudy VI Seros. simpoziuma s mezhdunar. uchastiem = Proceed. VI All-Russ. Symposium with int. participation*. Barnaul; 2017. 309 p. (In Russ.)

Potapova I. Yu. The role of atmospheric precipitation in the formation of the chemical composition in surface waters of Karelia. *Trudy Karel'skogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of Karelian Research Centre RAS*. 2011;4:134–138. (In Russ.)

Sabylina A. V. Hydrochemical studies of Lake Onego. *Krupneishie ozera i vodokhranilishcha Severo-Zapada evropeiskoi territorii Rossii: sovremennoe sostoyaniye i izmeneniya ekosistem pri klimaticheskikh i antropogennykh vozdeistviyakh = The largest lakes-reservoirs of the North-West of the European part of Russia: current state and changes of ecosystems under climate variability and antropogenic impact*. Petrozavodsk: KarRC RAS; 2015. P. 60–88. (In Russ.)

Sabylina A. V. The current hydrochemical regime of Lake Onego. *Onezhskoe ozero. Ekologicheskie problemy = Lake Onego. Environmental problems*. Petrozavodsk: KarRC RAS; 1999. P. 58–109. (In Russ.)

Sabylina A. V., Efremova T. A. The chemical composition of ice and water under ice of Lake Onego (the case of Petrozavodsk Bay). *Led i Sneg = Ice and Snow*. 2018;58(3):417–428. (In Russ.) doi: 10.15356/2076-6734-2018-1-417-428

Sabylina A. V., Efremova T. A., Ikko O. I. Chemical composition of the hydrocryogenic system of Lakes Munozero and Urozero (Republic of Karelia, Russia). *Led i Sneg = Ice and Snow*. 2020;60(4):592–600. (In Russ.). doi: 10.31857/S2076673420040063

Sabylina A. V., Lozovik P. A., Zobkov M. B. The chemical composition of water in Lake Onego and its tributaries as an indicator of the ecological state. *Vodnye resursy = Water Resources*. 2010;37(6):717–729. (In Russ.)

Sabylina A. V., Ryzhakov A. V. Hydrochemical characteristics of the littoral zone of Lake Onego. *Vodnye resursy = Water Resources*. 2018;45(2):179–187. (In Russ.). doi: 10.7868/S0321059618020074

Sergeev G. B., Batyuk V. A. *Cryochemistry*. Moscow: Chemistry; 1978. 296 p. (In Russ.)

Vorob'eva I. B., Naprasnikova E. V., Vlasova N. V. Study of the hydrocryogenic components on the Southwestern coast of Lake Baikal (ecological and geochemical aspect). *Led i Sneg = Ice and Snow*. 2010;2(110):56–60. (In Russ.)

Zobkov M. B., Zobkova M. V. A device for determining organic carbon in water with photochemical persulfate oxidation in the system of continuous gas flow and FTIR spectrometric detection. *Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov = Industrial laboratory. Diagnostics of materials*. 2015;81(8):10–15. (In Russ.)

Поступила в редакцию / received: 21.08.2024; принята к публикации / accepted: 27.09.2024.
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare no conflict of interest.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

Сабылина Альбина Васильевна

канд. геогр. наук, старший научный сотрудник лаборатории гидрохимии и гидрогеологии

e-mail: efremova.nwpi@mail.ru

Ефремова Татьяна Алексеевна

младший научный сотрудник лаборатории гидрохимии и гидрогеологии

e-mail: efremova.nwpi@mail.ru

Икко Ольга Игоревна

главный химик лаборатории гидрохимии и гидрогеологии

e-mail: vos-olga-zenia@yandex.ru

CONTRIBUTORS:

Sabylina, Albina

Cand. Sci. (Geog.), Senior Researcher

Efremova, Tatyana

Junior Researcher

Ikko, Olga

Principal Chemist