ЛЁД И СНЕГ, 2023, том 63, № 1, с. 104–115

МОРСКИЕ, РЕЧНЫЕ И ОЗЁРНЫЕ ЛЬДЫ

УДК 551.322 (282.256.341)

ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ ГИДРОКРИОГЕННОЙ СИСТЕМЫ: СНЕГ НА ЛЬДУ–ЛЁД–ПОДЛЁДНАЯ ВОДА ОЗЕРА БАЙКАЛ

© 2023 г. И. Б. Воробьева[1,*], Н. В. Власова[1], И. А. Белозерцева[1]

[1] *Институт географии им. В.Б. Сочавы СО РАН, Иркутск, Россия*

**e-mail: irina-vorobyeva@yandex.ru*

Поступила в редакцию 23.03.2022 г.
После доработки 27.10.2022 г.
Принята к публикации 06.03.2023 г.

Представлены результаты исследований гидрокриогенной системы: снег на льду–лёд–подлёдная вода, полученные в зимний период 2016/17 г. на акватории озера Байкал. Показаны особенности химического состава, распределение водородного показателя, минерализации, ионный состав и основные закономерности миграции макро- и микроэлементов гидрокриогенной системы снег на льду–лёд–подлёдная вода.

Ключевые слова: гидрокриогенная система, снег, лёд, подлёдная вода, ионный состав, коэффициент вовлечения, микроэлементы, коэффициент миграции, озеро Байкал

DOI: 10.31857/S2076673423010155, **EDN:** MAVNNX

ВВЕДЕНИЕ

Интенсивное рекреационное освоение территории озера Байкал в зимний и летний периоды и связанное с ним антропогенное воздействие на все компоненты ландшафта увеличили интерес учёных к проблеме рационального использования и сохранения. В настоящее время усиливается техногенный пресс на все компоненты ландшафтов Байкала, что определяет актуальность исследования химического состава снега в акватории озера, льда и подлёдной воды.

На Байкальской природной территории снежный покров находится 5–6 месяцев в году. Снежный покров является одним из компонентов окружающей среды, оказывающим непосредственное влияние на водный режим. Накопленные в виде снега атмосферные осадки питают поверхностные и грунтовые воды, режим которых в значительной мере зависит от распределения снежного покрова, его физических свойств и характера снеготаяния. Исследования Воейкова А.И. еще в 1885 г. показали, что снежный покров, являясь продуктом климата, сам становится мощным климатообразующим фактором.

С середины прошлого века, в связи с развитием промышленности и процессами урбанизации, большое внимание стали уделять экологической направленности в исследованиях снежного покрова, то есть снежный покров изучается, как депонирующая поверхность(Воейков, 1949; Прокачева, Усачев, 1989; Сает и др., 1990; Дончева, 1992 и др.). Снег захватывает загрязнения из атмосферы и откладывает их на земной поверхности на протяжении всего зимнего периода. В снежном покрове накапливаются естественные и техногенные компоненты. Исследования взаимодействия снежного покрова с другими компонентами и закономерности их взаимного влияния в настоящее время чрезвычайно актуальны как реакция на воздействие комплекса климатических и антропогенных факторов. Особенно важно понимание загрязненности снега в зоне влияния промышленных предприятий и населенных пунктов, что оказывает локальное воздействие на окружающую среду.

Исследования последних лет рассматривают различные компоненты – снежный и ледяной покровы, поверхностные воды – на отдельных территориях (Воропай, Власов, 2017; Карнаухова, 2018; Парадина и др., 2019; Блинов и др., 2019). Близкие по тематике работы проводились на морских льдах, минеральных озерах и ледниках (Немировская, 2004; Звалинский и др., 2016; Смахтин, 2018; Захарченко и др., 2020). Подход авторов отличается от общепринятого тем, что изучаемая гидрокриогенная система рассматривается как цельная система, в которой все компоненты изучаются единовременно.

Озеро Байкал расположено, в центре евроазиатского материка и является самым большим природным хранилищем пресной воды. Объём воды в Байкале около 23 тыс. км^3, что составляет 20% мировых и 90% российских запасов пресной воды. Ежегодно экосистема Байкала воспроизво-

дит около 60 км^3 прозрачной, насыщенной кислородом воды.

На протяжении десятилетий антропогенный пресс на водную часть экосистемы озера недопустимо высок. В 2015 г., по сравнению с 2014 г. количество загрязняющих веществ, поступивших на акваторию озера Байкал, увеличилось в Байкальске на 13%, на острове Ольхон и п. Хужир на 10% (Обзор состояния и загрязнения..., 2016). По данным Государственного доклада о состоянии и охране окружающей среды Иркутской области в 2016/17 г., общая масса загрязняющих веществ, поступивших в оз. Байкал, составила 362.47 т (в 2014 г. – 288.09 т, в 2015 г. – 360.91 т). В 2016 г. со сточными водами поступило больше, чем в 2015 г., сульфатов, хлоридов, взвешенных веществ, нитратов, нитритов, аммонийного азота, фосфатов. Хлорид- и сульфат-ионы и азот аммонийный возросли соответственно от 0.3 до 38%. Основные источники загрязнения – промышленные предприятия и населенные пункты на побережье, порты южной и северной частей озера, устьевые части рек Тыя, Кичера, Верхняя Ангара, Баргузин и Селенга.

Цель исследования – изучить современное состояние гидрокриогенной системы снег–лёд–подлёдная вода в акватории озера, показать закономерности миграции макро- и микроэлементов в гидрокриогенной системе в текущих условиях. Для достижения этой цели сформулированы следующие задачи: дать характеристику климатических условий формирования снежного покрова в зимний период 2016/17 г.; определить колебания величины pH и количество взвешенного вещества, минерализацию и ионный состав, содержание микроэлементов в гидрокриогенной системе: снег на льду–лёд–подлёдная вода; установить специфичность распределения веществ между льдом и подлёдной водой по коэффициенту вовлечения (Кв); представить по полученным результатам химический состав гидрокриогенной системы: снег на льду–лёд–подлёдная вода озера Байкал.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Объектом детальных геохимических исследований послужила гидрокриогенная система: снег на льду–лёд–подлёдная вода в акватории озера (табл. 1). Ледяной покров на озере Байкал изучали с начала XX века (Шостакович, 1908; Сокольников, 1957; 1960; 1967; Шимараев, 1977). Ледостав на Байкале наступает гораздо позднее, чем на других водоемах. Причиной этого является колоссальная водная масса озера, требующая длительного периода для своего охлаждения, а также ветровая деятельность, которая преимущественно проявляется в осенне-зимний период. Формирование устойчивого ледяного покрова первоначально происходит в мелководных заливах и приурочено ко второй декаде ноября. В глубоководных частях северной и средней котловин озера ледостав наступает в первых числах января, а в южной котловине – 10–14 января. Толщина льда в день ледостава колеблется от 10 до 40 см, а затем быстро увеличивается, причем нарастание ледяного покрова на бесснежных участках происходит быстрее, так как теплопроводность льда на порядок выше теплопроводности снега. Максимальной мощности лёд достигает в конце марта, изменяясь по акватории Байкала в среднем от 70 до 115 см. Наименьшая толщина льда наблюдается на южном Байкале, где выпадает больше всего снега. На северном Байкале из-за более низких температур и на Малом Море из-за частого отсутствия снежного покрова толщина льда достигает максимальных значений (Беркин и др., 2009).

Образцы снега отбирались снегомером ВС-43 по всей толще с определением высоты и плотности (веса) для изучения распределения снежного покрова на территории исследования и определения запасов содержащейся в нём воды и взвешенных веществ. Пробы льда (верхняя часть, которая не соприкасается с подлёдной водой) отбирались на глубину 0–50 см; пробы подлёдной воды отбирались стеклянной бутылью и батометром.

Пробы переводили в талую воду при комнатной температуре. Время таяния снега при комнатной температуре составляет 6–12 часов, что соответствует “быстрому таянию”, применяемому в целях минимизации сорбции вещества пробы на стенках сосуда и уменьшению перехода взвешенных веществ в растворимые формы (Глазовский и др., 1983).

Исследование снега предполагает раздельный анализ снеговой воды и твёрдого осадка, который состоит из атмосферной пыли, осажденной на поверхность снежного покрова. Нерастворимая фаза выделяется путем фильтрации на беззольном фильтре (синяя лента); просушиванием при комнатной температуре, просеиванием для освобождения от посторонних примесей и взвешивания. Разница в массе фильтра до и после фильтрования характеризует массу пыли в пробе. Количество выпадающего со снегом твёрдого осадка характеризует запыленность территории, а фильтрат талого снега отражает степень загрязнения воздушного бассейна растворимыми формами элементов (Ажаев, 2007).

Химические анализы выполнены в лаборатории геохимии ландшафтов и географии почв и химико-аналитическом центре Института географии им. В.Б. Сочавы СО РАН по стандартным методикам. Величину pH, содержание фторидов, хлоридов, гидрокарбонатов, фосфатов, аммония, нитритов, взвешенных веществ в воде определяли в полевых условиях с помощью полевой ком-

Таблица 1. Местоположение и координаты станций отбора проб: снег на льду–лёд–подлёдная вода в акватории оз. Байкал

№ п/п	Местоположение	№ точки	Координаты
1	п. Листвянка, зал. Лиственничный	41	N 51°51′21.5″, E 104°51′35.1″
2	п. Большое Голоустное, мыс Ушканий	Г8	N 52°03′39.3″, E 105°28′22.8″
3	п. Бугульдейка	14–17	N 52°31′27.7″, E 106°02′19.4″
4	пр. Ольхонские Ворота	9–17	N 53°01′08.2″, E 106°54′02.7″
5	д. Сарма	12–17	N 53°05′30.1″, E 106°50′02.0″
6	Малое Море, 3 км севернее р. Курма	1–17	N 53°12′03.6″, E 107°00′14.8″
7	южнее с. Байкальское	26–17	N 55°18′16.3″, E 109°11′24.8″
8	г. Северобайкальск	36–17	N 55°37′38.2″, E 109°21′11.3″
9	о. Ярки, центральная часть	18–17	N 55°45′34.1″, E 109°42′07.2″
10	середина озера, напротив губы Давша	38–17	N 54°14′15.3″, E 109°25′03.6″
11	зал. Чивыркуйский	39–17	N 53°39′47.8″, E 109°00′38.5″
12	с. Максимиха	46–17	N 53°16′11.6″, E 108°43′39.3″
13	10 км севернее с. Горячинск	49–17	N 53°13′35.7″, E 108°30′19.6″
14	9 км южнее с. Турка	53–17	N 52°53′02.6″, E 108°06′46.3″
15	зал. Провал	55–17	N 52°20′40.2″, E 106°50′18.0″
16	с. Посольское	64–17	N 52°01′37.8″, E 106°10′57.4″
17	г. Бабушкин	67–17	N 51°43′15.3″, E 105°51′05.8″
18	п. Танхой	68–17	N 51°33′45.8″, E 105°08′21.3″
19	г. Байкальск	70–17	N 51°31′45.50″, E 104°09′01.35″

плексной химической лаборатории с дополнительным оборудованием (pH-метр, фотоколориметр и др.) непосредственно в день отбора проб по стандартным общепринятым методикам с учетом требований ГОСТов (Алекин и др., 1973: ГОСТ 17.1.5.05-85, 1986; ГОСТ 2874-82, 1995). Химические элементы определяли на приборе Optima 2000DV – оптическом эмиссионном спектрометре с индукционной плазмой и компьютерным управлением (фирма Perkin Elmer LLC, США), с чувствительностью от 0.001 до 50000 мг/дм^3 (для микро- и макроэлементов). Пробы воды для определения концентрации тяжёлых металлов консервировались соляной кислотой и хранились в стеклянной посуде не более 5 суток.

Коэффициент водной миграции рассчитывали по общеизвестной формуле, предложенной А.И. Перельманом (1999):

$$K_x = \frac{m_x \times 100}{a \times n_x},$$

где m_x – содержание элемента x в воде, мг/дм^3; n_x – содержание элемента x в породах, %; a – сумма минеральных веществ, растворенных в воде, мг/дм^3.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Исследования проведены в зимний период 2016/17 г. в первой декаде марта в период максимального снегонакопления и устойчивого ледяного покрова. По данным Доклада об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2017 г. этот год стал четвёртым среди самых тёплых с 1936 г. Экстремально тепло было в азиатской части России – восточнее Енисея повсеместно отмечались 95%-ные экстремумы; в целом по региону 2017 год, а также весенний сезон были рекордно тёплыми (аномалии +2.27°C и +3.69°C – исторические максимумы). Зимой 2016/17 г. отмечены аномалии (+3–5°C) в южных и центральных районах азиатской части России. Самым тёплым месяцем зимы был февраль, температуры выше нормы отмечены практически всюду, особенно в центре и на юге Восточной Сибири. В 2017 г. средняя годовая сумма осадков составила 111% нормы – вторая величина после рекордного 2013 г. на территории азиатской части России.

В январе–марте на территории северного и среднего побережья оз. Байкал, количество выпавших осадков было меньше нормы (30–70%), а в южной части осадки превысили средние многолетние значения в 1.5–2.5 раза. Толщина снежно-

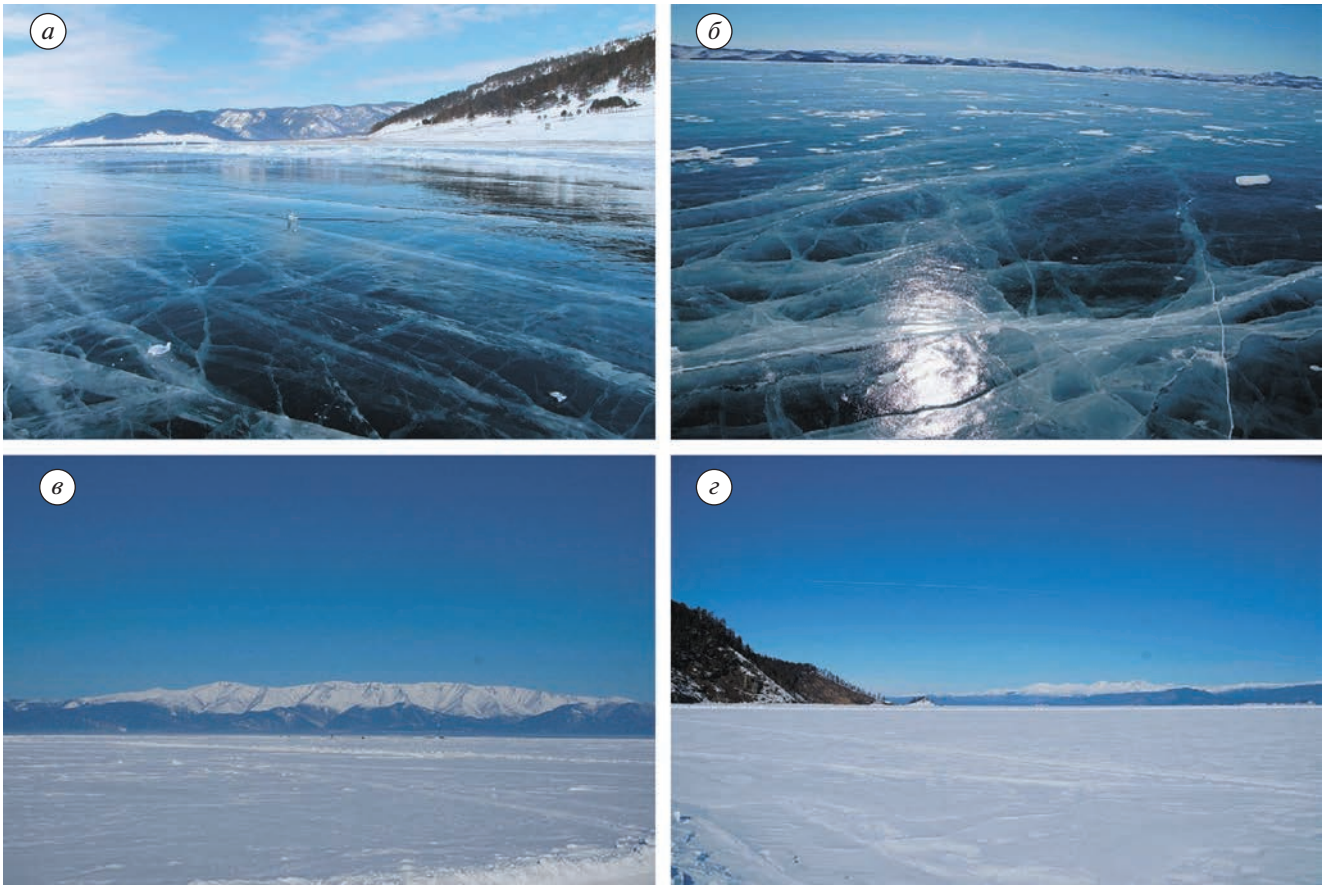

Рис. 1. Снежный покров на поверхности льда оз. Байкал, зима 2016/17 г.: *а* – поверхность льда у п. Большое Голоустное; *б* – лёд на Малом Море; *в* – северный Байкал у п. Нижненегарск; *г* – зал. Чивыркуйский. Фото И.Б. Воробьевой.
Fig. 1. Snow cover in the water area of Lake Baikal, winter 2016/17: *а* – ice surface near Bolshoye Goloustnoye settlement; *б* – ice on the Small Sea; *в* – northern Baikal near the settlement of Nizhnenyegarsk; *г* – Chivyrkuisky Bay. Photo by I.B. Vorobyeva.

го покрова достигла максимальных значений в середине февраля–начале марта: на большей части территории она составляла 30–50 см. Разрушение устойчивого снежного покрова произошло в конце марта–начале апреля, на бóльшей части территории на 7–15 дней раньше, а в западной и южной части – в сроки, близкие к обычным (Доклад "О состоянии озера Байкал...", 2018).

Сроки ледостава меняются по годам, колебания их достигают 40 дней. Например, на южном Байкале крайние даты замерзания приходятся на 18 декабря–1 февраля (Байкал, атлас, 1993). В зимний период 2016/17 г. процессы образования льда на Байкале замедлились из-за теплой погоды в декабре 2016 г. и первой декаде 2017 г.; лёд установился в южной части Байкала на 7–10 дней позже нормы, в средней части на 5–7 дней, а на севере – в сроки близкие к норме. Среднегодовая температура воздуха в 2016 г. на 1–2°С превысила многолетние значения из-за положительных температурных аномалий, отмечавшихся большую часть года, вследствие чего гигантская масса воды оз. Байкала долго сохраняла тепло, и замерзание сдвинулось на более поздние сроки (Доклад "О состоянии озера Байкал...", 2017).

Как показали полевые исследования, снежный покров в акватории озера был неоднороден, достигал разной высоты и плотности, а в некоторых районах полностью отсутствовал, например, в п. Бугульдейка и Большое Голоустное, а также на Малом Море (рис. 1). Там, где снежный покров присутствовал, его толщина колебалась от 5 до 11 см при среднем значении 7 см. Только в зал. Чивыркуйском толщина снега достигала 27–29 см. Плотность снега менялась от 0.45 до 0.82 г/см^3.

Величина pH и взвешенное вещество. Установлено, что концентрация ионов водорода в гидрокриогенной системе: снег на льду–лёд–подлёдная вода имела идентичный вид на всей акватории озера – минимальные значения pH в снегу, амплитуда колебаний от 5.59 до 7.39; средние во льду – 6.01–7.50, максимальные в подлёдной воде – 7.42–8.50 (рис. 2). Размах колебаний изменялся от максимального в снеге до минимального в воде –

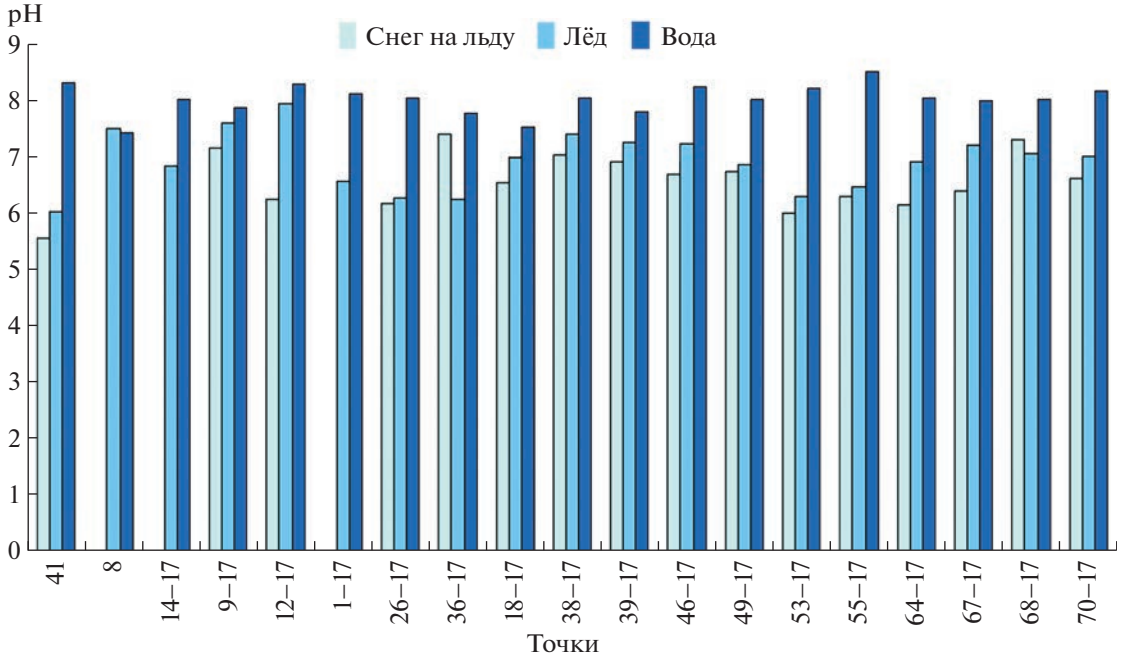

Рис. 2. Изменения величины pH гидрокриогенной системы: снег на льду–лёд–подлёдная вода. Точки с координатами обозначены в табл. 1.

Fig. 2. Changes in the pH value of the hydrocryogenic system: snow on ice–ice–ice water. Points with coordinates are indicated in Table 1.

1.8, 1.49 и 1.08 соответственно. В отдельных точках (36 и 68), напротив г. Северобайкальска и п. Танхой, значения pH в снегу достигали величин 7.39 и 7.30 – больше, чем во льду (6.25 и 7.06), что связано с влиянием населенных пунктов.

Взвешенные вещества в снежном покрове по всей акватории озера распределяются неравномерно. Наиболее высокие показатели отмечены около населенных пунктов – тт. 36, 67, 68 и 70 (1.0–9.5 г/м^2). На снежную и ледяную поверхность попадают продукты сжигания топлива от печного отопления в посёлках, а также частицы терригенных аэрозолей, которые поднимаются в атмосферу с земной поверхности ветром. В основном они представляют собой частицы почвы и песка. Подъем ветром подобных частиц наиболее интенсивен в зимний период на территориях, где почва не покрыта снегом – тт. 8, 9, 39, 55 (1.5–10.6 г/м^2).

Минерализация и ионный состав. По литературным данным установлено, что общая минерализация снега колеблется в пределах от 10 до 30 мг/дм^3. В образцах выявлены изменения минерализации талой снеговой воды от 11.41 до 36.89, при среднем значении 15.23 мг/дм^3. Максимальные концентрации обнаружены на акватории озера недалеко от центральной части о. Ярки – намывной песчаной косы, образованной выносами рек Кичера и Верхняя Ангара – т. 18 (36.89). С острова происходят надувы песка на снежную поверхность.

Минерализация льда изменяется от 3.36 до 23.97, при среднем значении 13.77 мг/дм^3. Минерализация подлёдной воды в среднем составляет 96.6 мг/дм^3. Максимальные значения выявлены в устьевой части р. Сармы (т. 12), зал. Чивыркуйском (т. 39) и Провал (т. 55) – 114.91, 111.1 и 204.98, мг/дм^3 соответственно (рис. 3). Для этих мест характерны маленькие глубины (1.5–8 м) и хорошее летнее прогревание с активизацией процессов минерализации.

Исследования показали, что концентрации химических элементов во льду в 7 раз ниже, чем в льдообразующей воде. К такому распределению приводит адсорбция, адсорбционная окклюзия, окклюзия льдообразующей воды, дифференциация ионов под влиянием электрических потенциалов. Основная масса вещества остается в жидкой фазе, концентрация веществ в которой по мере кристаллизации возрастает (Иванов, 1993, 1998).

При исследовании ионного состава льда и подлёдной воды зафиксирована высокая дифференциация между ледовой и жидкой фазой. Интенсивность вовлечения в лёд растворенных веществ вместе с льдообразующей водой характеризуется коэффициентом вовлечения ($K_в$) (Иванов, 1993). Этот коэффициент отражает специфичность распределения веществ между льдом и водой. Расчеты показали, что его величина изменя-

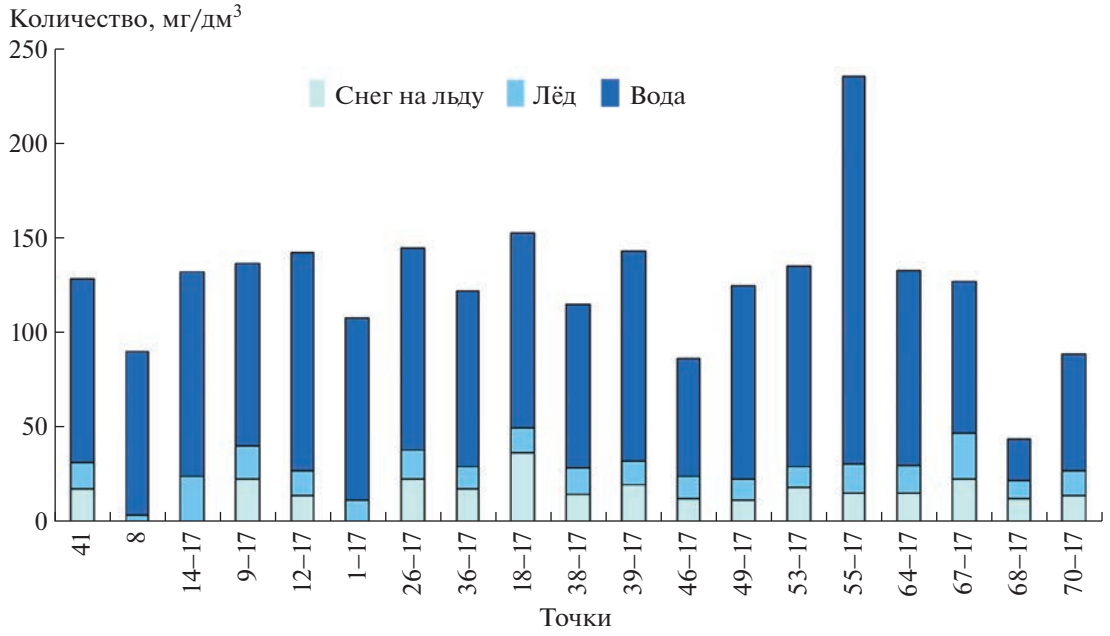

Рис. 3. Изменения минерализации гидрокриогенной системы: снег на льду–лёд–подлёдная вода. Точки с координатами обозначены в табл. 1.

Fig. 3. Changes in the mineralization of the hydro-cryogenic system: snow on ice–ice–ice water. Points with coordinates are indicated in Table 1.

ется в широких пределах, но, как правило, меньше единицы. Для каждого иона значения $K_в$ индивидуальны и различаются на разных водоёмах (Вотинцев, Григорьева, 1973; Анисимова, Роговская, 1974; Сабылина, Ефремова, 2018; Сабылина и др., 2020). Обнаружены общие закономерности, характерные для пресноводных озер. Так, концентрации ионов во льду по отношению к их содержанию в исходных растворах уменьшается в ряду: $NO_2^- > Cl^- > SO_4^{2-} > HCO_3^-$. Амплитуда колебаний $K_в$ для каждого иона имеет свои значения на всей территории озера. Максимальный размах установлен у сульфат-иона – изменения в 3.5 раза; далее идут нитрит-ион – 2.5; гидрокарбонат-ион – 1.8 и хлорид-ион – 1.6 раза. Для катионов чёткого распределения в величинах $K_в$ не выявлено. Обращает на себя внимание значения $K_в$ для калия: он поступает в лёд очень интенсивно ($K_в$ около 1), что указывает на избирательность вовлечения K^+ из воды льдом. Такое явление, согласно представлениям А.В. Иванова (Иванов, 1998), связано с организующей способностью иона калия по отношению к гидратной оболочке. Установлено, что в лёд интенсивно вовлекаются ионы K^+, Na^+ и слабо Ca^{2+} и Mg^{2+}: коэффициент вовлечения ионов кальция и магния значительно ниже 1 и составляют 0.01–0.04 и 0.02–0.06 соответственно. Подобная закономерность установлена ранее на акватории оз. Байкал в зал. Лиственничный, у п. Листвянка (Воробьева и др., 2007, 2009, 2010). Это объясняется тем, что благодаря избирательному вовлечению в первом кристаллическом слое оказывается больше тех ионов, которые обладают бóльшим коэффициентом распределения, зависящем от подвижности ионов и от их структурирующего действия на замерзающий раствор. Возникновение на границе льдообразующей воды и льда разности потенциалов влечёт за собой дифференциацию катионов и анионов между твёрдой и жидкой фазами. Концентрация компонентов химического состава и суммарное содержание их во льду ниже, чем в льдообразующей воде.

Многими авторами (Тарасов, Кореновская, 1966; Власов, Павлова, 1969; Иванов и др., 1976; Иванов, 1989 и др.) экспериментально установлено, что если в замерзающем растворе концентрации солей невысоки, то их насыщенность во льду намного ниже исходной ($K_в$ ниже 1). Ледовая фаза обогащается ионами аммония – это подтверждают наши исследования на оз. Байкал, вне влияния населенных пунктов. Около поселений и на мелководье количество солей во льду может быть близко или равно их количеству в воде. Полученные данные согласуются с исследованиями В.А. Оболкина и др. (Obolkin et al., 2019). Это характерно для ионов Cl^-, SO_4^{2-} и азотсодержащих, что свидетельствует об антропогенном влиянии на химический состав льда.

Снежный покров на льду характеризуется более низкими значениями pH, чем лёд и подлёдная вода (5/59–6/01–8/30 соответственно). Концен-

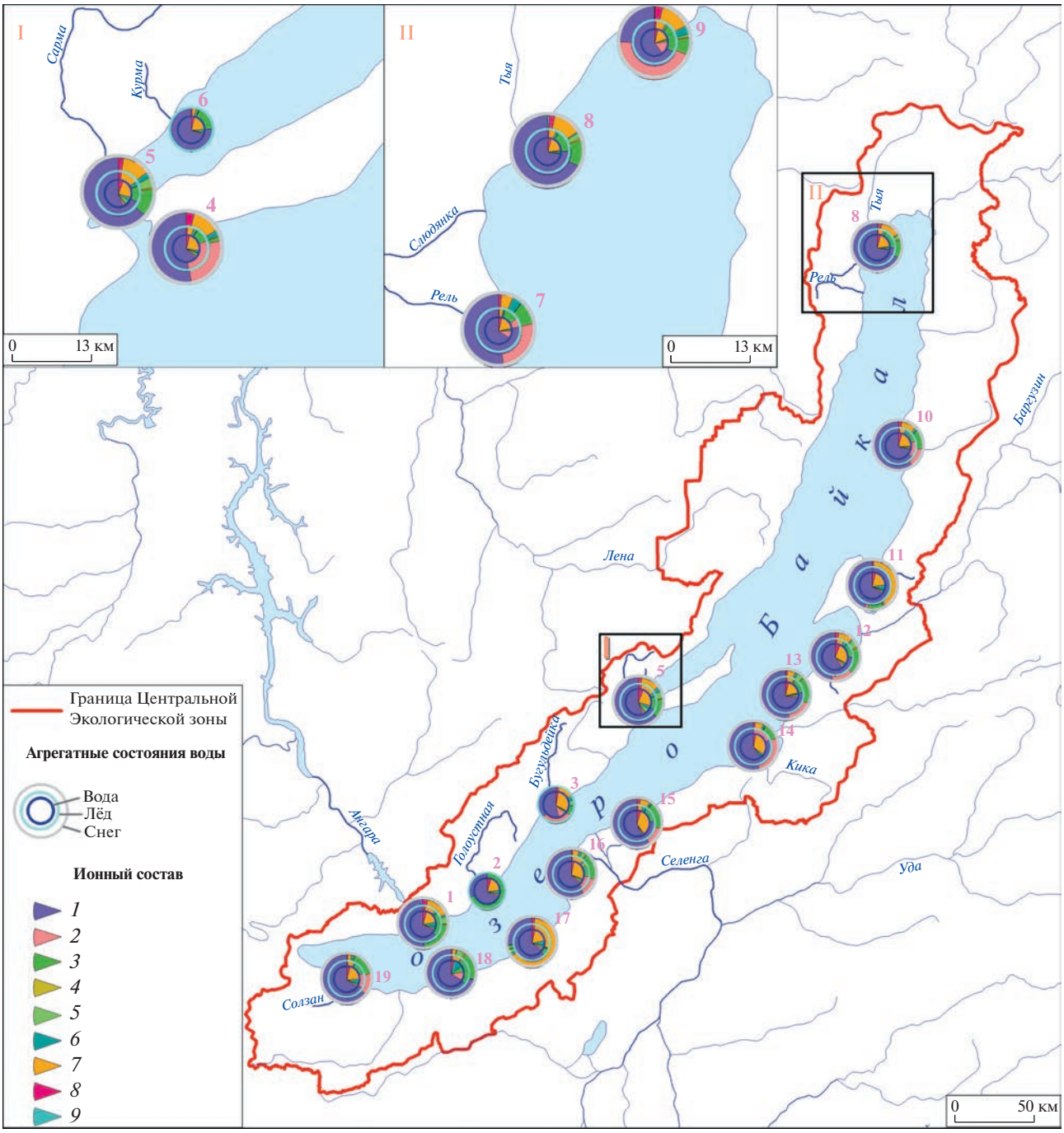

Рис. 4. Изменения ионного состава гидрокриогенной системы: снег на льду–лёд–подлёдная вода. Ионный состав: *1* – HCO_3^-; *2* – SO_4^{2-}; *3* – Cl^-; *4* – NO_2^-; *5* – NO_3^-; *6* – $K^+ + Na^+$; *7* – Ca^{2+}; *8* – Mg^{2+}; *9* – NH_4^+. Местоположение и координаты станций отбора проб (*1–19*) представлены в табл. 1.

Fig. 4. Changes in the ionic composition of the hydrocryogenic system: snow on ice–ice–ice water. Ionic composition: *1* – HCO_3^-; *2* – SO_4^{2-}; *3* – Cl^-; *4* – NO_2^-; *5* – NO_3^-; *6* – $K^+ + Na^+$; *7* – Ca^{2+}; *8* – Mg^{2+}; *9* – NH_4^+. The location and coordinates of the sampling stations (*1–19*) are shown in the table 1.

трации ионов K^+, Na^+, Ca^{2+}, Mg^{2+} и HCO_3^- в снегу также меньше, чем во льду и подлёдной воде (рис. 4). В некоторых точках исследования на акватории оз. Байкал установлены достаточно высокие содержания сульфат- и хлорид-ионов в снеге по отношению ко льду и воде, что свидетельствует о поступлении соединений серы и хлора из атмосферы, аэрозоли которых оседают на поверхности (см. рис. 4) (точки на рисунке: 41 – залив Лиственничный, пос. Листвянка, содержа-

ние Cl^- в снеге 4/2 мг/дм^3, во льду – 3.15, в подлёдной воде – 2.3; 12 – устьевая часть р. Сарма, п. Сарма, 36 – акватория озера у г. Северобайкальск, 64 – с. Посольское, 68 – п. Танхой и 70 – г. Байкальск, содержание Cl^- в снеге 2.14 мг/дм^3, во льду – 1.50, в подлёдной воде – 1.78; SO_4^{2-} – в снеге 2.0 мг/дм^3, во льду – 1.8, в подлёдной воде – 1.2). На снежную поверхность побережья попадают продукты сжигания топлива, что чётко прослеживается по содержанию твёрдого вещества, которого в снежном покрове больше, чем во льду и подлёдной воде.

Микроэлементы. Для расчёта интенсивности миграции химических элементов в водах рассчитан коэффициент водной миграции (K_x). Для избежания ошибочных выводов из-за глубины озера и разности подстилаемых пород озера при расчете K_x процентное содержание элемента в водовмещающих породах было заменено кларком земной коры, согласно рекомендациям (Перельман, Касимов, 1999).

Полученные значения K_x разделили химические элементы на две группы – подвижные и слабоподвижные элементы. К первым относятся Ca, Cu, Sr, Mg, Co, Zn и Cd, их показатели по местоположениям изменяются, но K_x больше 1. Элементы Ba, Mn, Si, Fe, Al, Ti, Ni, Cr, P и K составляют полярную группу. Благодаря природно-климатическим факторам и достаточно интенсивному антропогенному воздействию в нескольких точках отбора проб отмечается изменение интенсивности миграционной способности свинца от 1.22 до 11.0.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведённые исследования позволили обнаружить особенности химического состава гидрокриогенной системы: снег на льду–лёд–подлёдная вода в акватории оз. Байкал и показать основные закономерности миграции макро- и микроэлементов в условиях изменения климата.

1. Установлено, что среднегодовая температура воздуха в 2016 г. на 1–2°C превысила многолетние значения из-за положительных температурных аномалий, отмечавшихся бóльшую часть года и первую декаду 2017 г., поэтому сроки ледостава сдвинулись на более позднее время. Снежный покров на акватории озера в зимний период 2016/17 г. отличался неоднородностью, достигал высоты 5–11 см при среднем значении – 7 см и имел плотность от 0.45 до 0.82 г/см^3.

2. Концентрации ионов водорода состава гидро-криогенной системы: снег на льду–лёд–подлёдная вода характеризовались едиными закономерностями по всей акватории озера: минимальные значения pH в снегу 5.59–7.39; средние во льду – 6.01–7.50, максимальные в подлёдной воде – 7.42–8.50. Повышенные количества взвешенных веществ и увеличение pH снега зафиксированы около населенных пунктов, что объясняется антропогенным влиянием поселений. Такие же изменения выявлены в снежном покрове на акватории озера там, где частицы терригенных аэрозолей, представленные частицами почвы и песка, поднимаются в атмосферу ветром с прибрежных территорий, где почва не покрыта снегом.

3. Установлены диапазоны изменения минерализации в талой снеговой воде: от 11.41 до 36.89 мг/дм^3 при среднем значении 15.23, а также льда: от 3.36 до 23.97 мг/дм^3 при среднем значении 13.77. Концентрация ионов во льду по отношению к их содержанию в исходных растворах уменьшается в ряду: NO_2^-–Cl^-–SO_4^{2-}–HCO_3^-. Каждый ион содержит свои колебания коэффициента вовлечения ($K_в$) на всей акватории озера. Так, наибольшие колебания выявлены для сульфат-иона – 3.5 раза, нитрит-иона – 2.5; гидрокарбонат-иона – 1.8 и хлорид-иона – 1.6. Для катионов чёткого распределения в величинах $K_в$ не выявлено. Установлено, что в лёд интенсивно вовлекаются ионы K^+, Na^+ и слабо Ca^{2+} и Mg^{2+}. Поступление ионов калия в лёд очень интенсивное ($K_в$ около 1), что указывает на избирательность вовлечения K^+ из воды льдом. Коэффициент вовлечения ионов кальция и магния значительно ниже 1 и составляют 0.01–0.04 и 0.02–0.06 соответственно.

4. Около поселений и на мелководье количество солей и азотсодержащих соединений во льду может быть близко или равно их количеству в подлёдной воде, что свидетельствует об антропогенном воздействии на химический состав льда.

5. Вычисленный коэффициент водной миграции (K_x) распределил химические элементы на две группы – подвижные и слабоподвижные элементы. К первым относятся Ca, Cu, Sr, Mg, Co, Zn и Cd ($K_x > 1$), ко второй группе – Ba, Mn, Si, Fe, Al, Ti, Ni, Cr, P, K.

В целом исследования, выполненные в акватории оз. Байкал, позволили расширить представления о химическом составе гидрокриогенной системы снег на льду–лёд–подлёдная вода.

Благодарности. Исследование выполнено за счёт средств государственного задания: “Пространственно-временные закономерности вещественного состояния ландшафтов Сибири в изменяющихся условиях среды” (№ FWEM-2021-0002), номер госрегистрации: АААА-А21-121012190055-7.

Acknowledgments. The study was carried out at the expense of the state task: “Spatial and temporal patterns of the material state of Siberian landscapes in changing environmental conditions” (no. FWEM-2021-0002), state registration number: АААА-А21-121012190055-7.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Ажаев Г.С. Оценка экологического состояния г. Павлодара по данным геохимического изучения жидких и пылевых атмосферных выпадений. Дисс. на соиск. уч. степ. канд. геол.-мин. наук. Павлодар: Павлодарский гос. пед. ин-т, 2007. 111 с.

Алекин О.А., Семенов А.Д., Скопинцева Б.А. Руководство по химическому анализу вод суши. Л.: Гидрометеоиздат, 1973. 269 с.

Анисимова Н.П., Роговская Л.Г. Изменение химического состава озерного льда во времени // Озера криолитозоны Сибири. Новосибирск: Наука, 1974. С. 128–137.

Байкал (Атлас) / Ред. Г.И. Галазий. М.: Изд-во Роскартография, 1993. 160 с.

Беркин Н.С., Макаров А.А., Русинек О.Т. Байкаловедение: учеб. пособие. Иркутск: Изд-во Иркутского гос. ун-та, 2009. 291 с.

Блинов В.В., Гнатовский Р.Ю., Жданов А.А., Гранин Н.Г. Оценка повышения минерализации в подлёдном слое вод Южного Байкала // Метеорология и гидрология. 2019. № 10. С. 60–66.

Власов Н.А., Павлова Л.И. Влияние процессов замораживания на состав гидрокарбонатных увод // Докл. АН СССР. 1969. Т. 185. № 3. С. 675–678.

Войеков А.И. Воздействие человека на природу / Избранные статьи. М.: Гос. изд-во геогр. литературы, 1949. 269 с.

Воробьева И.Б., Напрасникова Е.В., Власова Н.В. Эколого-геохимическая оценка системы: снег на льду–лёд–подлёдная вода оз. Байкал // Тр. Всерос. конф. “Ледовые и термические процессы на водных объектах России”. Архангельск, Северное УГМС, 28–31 августа 2007 г. М., 2007. С. 87–90.

Воробьева И.Б., Напрасникова Е.В., Власова Н.В. Эколого-геохимические особенности снега, льда и подлёдной воды южной части озера Байкал // Геоэкология. Инженерная геология. Геокриология. 2009. № 1. С. 54–60.

Воробьева И.Б., Напрасникова Е.В., Власова Н.В. Исследование гидрокриогенных компонентов юго-западного побережья Байкала (эколого-геохимический аспект) // Лёд и Снег. 2010. № 2 (110). С. 56–60.

Воропай Н.Н., Власов В.К. Особенности распределения снежного покрова на побережье озера Байкал // Лёд и Снег. 2017. Т. 57. № 3. С. 355–364. https://doi.org/10.15356/2076-6734-2017-3-355-364

Вотинцев К.К., Григорьева Э.Н. К характеристике химического состава льда и подлёдной воды озёр Северного Казахстана // Докл. АН СССР. 1973. Т. 211. № 6. С. 1405–1407.

Глазовский Н.Ф., Злобина А.И., Учватов В.П. Химический состав снежного покрова некоторых районов Верхнеокского бассейна // Региональный экологический мониторинг. М.: Наука, 1983. С. 67–86.

ГОСТ 17.1.5.05-85. Общие требования к отбору проб поверхностных и морских вод, льда и атмосферных осадков. М.: 1985. // Электронный ресурс. https://files.stroyinf.ru/Index2/1/4294847/4294847484.htm (Дата обращения: 13.07.2022).

ГОСТ 2874-82. Вода питьевая. Гигиенические требования и контроль за качеством. М.: 1995. // Электронный ресурс. http://gostvoda.ru/d/677526/d/4-gost-2874-82.pdf (Дата обращения: 13.07.2022).

Государственный доклад “О состоянии озера Байкал и мерах по его охране в 2016 году”. Иркутск: ИНЦХТ, 2017. 374 с.

Государственный доклад “О состоянии озера Байкал и мерах по его охране в 2017 году”. Иркутск: АНО “КЦ Эксперт”, 2018. 340 с.

Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2017 год. М.: 2018. 69 с.

Дончева А.В., Казаков Л.К., Калуцков В.Н. Ландшафтная индикация загрязнения природной среды. М.: Экология, 1992. 254 с.

Захарченко А.В., Тигеев А.А., Пасько О.А., Колесниченко Л.Г., Московченко Д.В. Региональный и локальный геохимические переносы веществ, депонированные в снеговом покрове // М.: Геоэкология. 2020. № 6. С. 41–53. https://doi.org/10.31857/S0869780920060119

Звалинский В.И., Марьяш А.А., Тищенко П.Я., Сагалаев С.Г., Тищенко П.П., Швецова М.Г., Чичкин Р.В., Михайлик Т.А., Колтунов А.М. Продукционные характеристики эстуария реки Раздольной в период ледостава // Владивосток: Изв. ТИНРО. 2016. Т. 185. С. 155–174.

Иванов А.В., Трофимова Л.Н., Власов Н.А., Кашин Н.П. Особенности распределения фосфатов во льду водоемов // Геохимия зоны гипергенеза и техническая деятельность человека. Владивосток. 1976. С. 73–86.

Иванов А.В. Формирование химического состава конжеляционных льдов // Гляциологические и криогенные гидрол. процессы. Владивосток. 1989. С. 5–51.

Иванов А.В. Гляциогенный круговорот веществ. Хабаровск: Изд-во ИВЭП ДВО РАН. 1993. 94 с.

Иванов А.В. Криогенная метаморфизация химического состава природных льдов, замерзающих и талых вод. Хабаровск: Дальнаука, 1998. 164 с.

Карнаухова Г.А. Изменение гидрохимического состава воды в процессе эксплуатации Иркутского водохранилища // Метеорология и гидрология. 2018. № 7. С. 87–96.

Немировская И.А. Углеводороды в океане. М.: Научный мир. 2004. 318 с.

Обзор состояния и загрязнения окружающей среды в Российской Федерации за 2015 год. М.: Росгидромет, 2016. 200 с.

Парадина Л.Ф., Хахураев О.А., Сутурин А.Н. Изменение антропогенной нагрузки на снежный покров южного Байкала в связи с закрытием Байкальского целлюлозно-бумажного комбината // Междунар. науч.-исслед. журнал. 2019. Т. 79. № 1. С. 90–94. https://doi.org/10.23670/IRJ.2019.79.1.016

Перельман А.И., Касимов Н.С. Геохимия ландшафта. М.: Астрея-2000, 1999. 768 с.

Прокачева В.Г., Усачев В.Ф. Снежный покров в сфере влияния города. Л.: Гидрометеоиздат, 1989. 176 с.

Сабылина А.В., Ефремова Т.А. Химический состав льда и подлёдной воды Онежского озера (на примере Петрозаводской губы) // Лёд и Снег. 2018. Т. 58.

№ 3. С. 417–428.
https://doi.org/10.15356/2076-6734-2018-3-417-428

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

Сает Ю.Е., Ревич Б.А., Янин Е.П., Смирнова Р.С., Башаркевич И.Л., Онищенко Т.Л., Павлова Л.Н., Трефилова Н.Я., Ачкасов А.И., Саркисян С.Ш. Геохимия окружающей среды. М.: Недра, 1990. 335 с.

Смахтин В.К. Ледовый режим озер Забайкалья в условиях современного потепления // Лёд и Снег. 2018. Т. 58. № 2. С. 225–230.
https://doi.org/10.15356/2076-6734-2018-2-225-230

Сокольников В.М. Некоторые закономерности формирования и роста ледяного покрова на примере озера Байкал. Тр. Байкальской лимнологич. станции". 1957. Т. 15. С. 58–64.

Сокольников В.М. Вертикальные и горизонтальные смещения и деформации сплошного ледяного покрова Байкала // Тр. Байкальской лимнологич. станции. 1960. Т. 18. С. 291–350.

Сокольников В.М. Особенности отдачи Байкалом тепла и влаги перед ледоставом / Четвертая науч. конф. Новосибирского ин-та аэроклиматологии. Новосибирск, 1967. С. 121–123.

Тарасов Н.М., Кореновская И.М. Сравнительная характеристика химического состава льда и воды некоторых водоемов Северного Кавказа // Гидрохимия материалов. Л.: Гидрометеоиздат, 1966. Т. 42. С. 196–210.

Шимараев М.Н. Элементы теплового режима озера Байкал. Новосибирск: Наука, 1977. 150 с.

Шостакович В.Б. Лёд на озере Байкал. СПб.: Изд-во Глав. гидрограф. управления, 1908. С. 331–346.

Obolkin V.A., Volkova E.A., Ohira S.I., Toda K., Netsvetaeva O.G., Chebunina N.S., Nosova V.V., Bondarenko N.A. The role of atmospheric precipitation in the under-ice blooming of endemic dinoflagellate Gymnodinium baicalense var. minor Antipova in Lake Baikal. // Limnology and Freshwater Biology. 2019. № 6. P. 345–352.
https://doi.org/10.31951/2658-3518-2019-A-6-345

Citation: Vorobyeva I.B., Vlasova N.V., Belozertseva I.A. Chemical composition of the hydro-cryogenic system of the Lake Baikal: "snow on ice–ice–water under-ice". *Led i Sneg*. Ice and Snow. 2023, 63 (1): 104–115 [In Russian]. doi 10.31857/S2076673423010155

Chemical Composition of the Hydro-Cryogenic System of Lake Baikal: "Snow on Ice–Ice–Water Under-Ice"

I. B. Vorobyeva[a,#], N. V. Vlasova[a], and I. A. Belozertseva[a]

[a] *V.B. Sochava Institute of Geography SB RAS, Irkutsk, Russia*

[#] *e-mail: irina-vorobyeva@yandex.ru*

The results of studies of the chemical composition and the basic regularities of migration of macro- and microelements within the hydro-cryogenic system "snow on ice–ice–water under ice" obtained in the winter of 2016/17 in the waters of Lake Baikal are presented. Such investigation over the Lake area was carried out for the first time. It has been found that due to climatic conditions, dates of freeze-up (formation of the ice on the Lake) differ by 7–10 days from North to South, and the depth of snow on ice and its density change over the Lake area by 2 times, however there are some parts without snow. It was found that the changes in the pH indexes were identical across the whole Lake area – minimum pH values are present in the snow (from 5.59 to 7.39), average values – in the ice (6.01–7.50), and maximum values are noted in the water under ice (7.42–8.50). For the most part, increased quantities of suspended matter and an increase in the pH of snow were recorded near settlements, which is obviously a result of the anthropogenic influence. It was determined that the concentration of ions in the ice in relation to their content in the initial solutions decreases within the series: $NO_2^- > Cl^- > SO_4^{2-} > HCO_3^-$. Among the cations, K^+, Na^+ ions are involved into the ice intensively, while the Ca^{2+} and Mg^{2+} – weakly. The ice phase is enriched with ammonium ions outside the settlements. Near settlements and in shallow water, quantity of salts in the ice may be close to or equal to their concentration in the water under ice. The coefficient of migration in the water (Kx) divide the chemical elements into two groups – the mobile ones and slow-moving elements. The first group includes Ca, Cu, Sr, Mg, Co, Zn, and Cd (Kx >1), the second one contains Ba, Mn, Si, Fe, Al, Ti, Ni, Cr, P, and K.

Keywords: hydro cryogenic system, snow, ice, ice water, ionic composition, coefficient of involvement, trace elements, migration coefficient, lake Baikal

REFERENCES

Azhaev G.S. Evaluation of the ecological state of the city of Pavlodar according to the geochemical study of liquid and dust atmospheric precipitation. PhD. Pavlodar, 2007: 111 p. [In Russian].

Alekin O.A., Semenov A.D., Skopinceva B.A. Rukovodstvo po himicheskomu analizu vod sushi. Guide to the chemical analysis of land waters. Leningrad: Hydrometeoizdat, 1973: 269 p. [In Russian].

Anisimova N.P., Rogovskaya L.G. Changes in the chemical composition of lake ice over time // *Ozyora kriolitozony Sibiri.* Lakes of the permafrost zone of Siberia. Novosibirsk: Nauka, 1974: P. 128–137 [In Russian].

Bajkal (Atlas) / Ed. G.I. Galazy. Moscow: Roskartography, 1993: 160 p. [In Russian].

Berkin N.S., Makarov A.A., Rusinek O.T. Bajkalovedenie: ucheb. posobie. Baikal studies: textbook. Irkutsk: Irkutsk University Press, 2009: 291 p. [In Russian].

Blinov V.V., Gnatovskij R.Yu., Zhdanov A.A., Granin N.G. Assessment of increase in mineralization in subglacial waters of South Baikal. *Meteorologiya i gidrologiya*. Meteorology and hydrology. 2019, 10: 60–66 [In Russian].

Vlasov N.A., Pavlova L.I. Influence of freezing processes on the composition of hydrocarbonate withdrawals. Doklady Akademii Nauk SSSR. Reports of the Academy of Sciences. 1969, 185 (3): 675–678 [In Russian].

Vojekov A.I. Vozdejstvie cheloveka na prirodu. Human impact on nature. Selected articles. Moscow: Gosudarstvennoye izdatel'stvo geographical literatury, 1949: 269 p. [In Russian].

Vorob'eva I.B., Naprasnikova E.V., Vlasova N.V. Ecological-geochemical assessment system: snow on ice – ice – subglacial water lake. Baikal. *Trudy Vseroscijskoj konferencii "Ledovye i termicheskie processy navodnyh ob"ektah Rossii"*. Proc. of the All-Russian Conference "Ice and thermal processes of flood facilities in Russia". Arkhangelsk. Severnoye UGMS, August 28–31, 2007. Moscow: 2007: 87–90 [In Russian].

Vorob'eva I.B., Naprasnikova E.V., Vlasova N.V. Ecological and geochemical features of snow, ice and subglacial water of the southern part of Lake Baikal. *Geoekologiya. Inzhenernaya geologiya. Geokriologiya*. Geoecology. Engineering geology. Geocryology. 2009, 1: 54–60 [In Russian].

Vorob'eva I.B., Naprasnikova E.V., Vlasova N.V. Investigation of hydrocryogenic components of the South-West coast of Baikal (ecological-geochemical aspect). *Led i Sneg.* Ice and Snow. 2010, 2 (110): 56–60 [In Russian].

Voropaj N.N., Vlasov V.K. Features of the distribution of snow cover on the coast of Lake Baikal *Led i Sneg.* Ice and Snow. 2017, 57 (3): 355–364 [In Russian]. https://doi.org/10.15356/2076-6734-2017-3-355-364

Votincev K.K., Grigor'eva E.N. Characteristics of the chemical composition of the ice water of the Northern Kazakhstan lake. *Doklady Akademii Nauk SSSR.* Reports of the Academy of Sciences. 1973, 211 (6): 1405–1407 [In Russian].

Glazovskij N.F., Zlobina A.I., Uchvatov V.P. Chemical composition of the snow cover of some regions of the Verkhneok basin. *Regional'nyj ekologicheskij monitoring.* Regional ecological monitoring. Moscow: Nauka, 1983: 67–86 [In Russian].

GOST 17.1.5.05-85. General requirements for sampling of surface and sea water, ice and atmospheric precipitation. Moscow: 1985. Retrieved from: https://files.stroyinf.ru/Index2/1/4294847/4294847484.htm (Last access: 13.07.2022) [In Russian].

GOST 2874-82. The water is potable. Hygienic requirements and quality control. Moscow: 1995. Retrieved from: http://gostvoda.ru/d/677526/d/4-gost-2874-82.pdf (Last access: 13.07.2022) [In Russian].

Gosudarstvennyj doklad *"O sostoyanii ozera Bajkal i merah po ego ohrane v 2016 godu"*. State report "On the state of Lake Baikal and measures for its protection in 2016". Irkutsk: INSHT, 2017: 374 p. [In Russian].

Gosudarstvennyj doklad *"O sostoyanii ozera Bajkal i merah po ego ohrane v 2017 godu"*. State report "On the state of Lake Baikal and measures for its protection in 2017". Irkutsk: ANO "KC Expert", 2018: 340 p. [In Russian].

Doklad ob osobennostyah klimata na territorii Rossijskoj Federacii za 2017 god. Report on the peculiarities of the climate in the territory of the Russian Federation for 2017. Moscow: 2018: 69 p. [In Russian].

Doncheva A.V., Kazakov L.K., Kaluckov V.N. Landshaftnaya indikaciya zagryazneniya prirodnoj sredy. Landscape indication of pollution of the natural environment. Moscow: Ecology, 1992: 254 p. [In Russian].

Zaharchenko A.V., Tigeev A.A., Pas'ko O.A., Kolesnichenko L.G., Moskovchenko D.V. Regional'nyj i lokal'nyj geohimicheskie perenosy veshchestv, deponirovannyj v snegovom pokrove. Regional and local geochemical transport of substances deposited in the snow cover. Moscow: Geoecology, 2020 (6): 41–53 [In Russian]. https://doi.org/10.31857/S0869780920060119

Zvalinskij V.I., Mar'yash A.A., Tishchenko P.Ya., Sagalaev S.G., Tishchenko P.P., Shvecova M.G., Chichkin R.V., Mihajlik T.A., Koltunov A.M. Production characteristics of the estuary of the Razdolnaya River during the ice age. Vladivostok: Izvestiya TINRO, 2016 (185): 155–174 [In Russian].

Ivanov A.V., Trofimova L.N., Vlasov N.A., Kashin N.P. Features of the distribution of phosphates in the ice of reservoirs. *Geohimiya zony gipergeneza i tekhnicheskaya deyatel'nost'cheloveka.* Geochemistry of the hypergenesis zone and human technical activity. Vladivostok. 1976: 73–86 [In Russian].

Ivanov A.V. Formation of the chemical composition of congelation ice. *Glyaciologicheskie i kriogennye gidrologicheskie processy*. Glaciological and cryogenic hydrological processes. Vladivostok. 1989: 5–51 [In Russian].

Ivanov A.V. Glyaciogennyj krugovorot veshchestv. Glaciogenic cycle of substances. Khabarovsk: IVEP DVO RAN, 1993: 94 p. [In Russian].

Ivanov A.V. Kriogennaya metamorfizaciya himicheskogo sostava prirodnyh l'dov, zamerzayushchih i talyh vod. Cryogenic metamorphism of the chemical composition of natural ice, freezing and thawing waters. Khabarovsk: Dalnauka, 1998: 164 p. [In Russian].

Karnauhova G.A. Changes in the hydrochemical composition of water during the operation of the Irkutsk reservoir. Moscow: *Meteorologiya i gidrologiya*. Meteorology and hydrology, 2018 (7): 87–96 [In Russian].

Nemirovskaya I.A. Uglevodorody v okeane. Hydrocarbons in the ocean. Moscow: Scientific world, 2004: 318 p. [In Russian].

Obzor sostoyaniya i zagryazneniya okruzhayushchej sredy v Rossijskoj federacii za 2015 god. Overview of the state and pollution of the environment in the Russian Federation for 2015. Moscow: Roshydromet, 2016: 200 p. [In Russian].

Paradina L.F., Hahuraev O.A., Suturin A.N. Changes in the anthropogenic load on the snow cover of southern Baikal due to the closure of the Baikal pulp and paper mill. *Mezhdunarodnyj nauchno-issledovatel'skij zhurnal*. Intern. Research Journ. 2019, 79 (1): 90–94 [In Russian]. https://doi.org/10.23670/IRJ.2019.79.1.016

Perel'man A.I., Kasimov N.S. Geohimiya landshafta. Geochemistry in the landscape. Moscow: Astraea-2000, 1999: 768 p. [In Russian].

Prokacheva V.G., Usachev V.F. Snezhnyj pokrov v sfere vliyaniya goroda. Snow cover in the city's sphere of influence. Leningrad: Hydrometeoizdat, 1989: 176 p. [In Russian].

Sabylina A.V., Efremova T.A. Chemical composition of ice and subglacial water of Lake Onega (on the example of Petrozavodsk Bay). *Led i Sneg.* Ice and Snow. 2018, 58 (3): 417–428 [In Russian]. https://doi.org/10.15356/2076-6734-2018-3-417-428

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 Russian]. https://doi.org/10.31857/S2076673420040063

Saet Yu.E., Revich B.A., YAnin E.P., Smirnova R.S., Basharkevich I.L., Onishchenko T.L., Pavlova L.N., Trefilova N.Ya., Achkasov A.I., Sarkisyan S.Sh. Geohimiya okruzhayushchej sredy. Geochemistry of the environment. Moscow: Nedra, 1990: 335 p. [In Russian].

Smahtin V.K. The Ice Regime of Lake Transbaikalia in the Conditions of Modern Warming. *Led i Sneg.* Ice and Snow. 2018, 58 (2): 225–230 [In Russian]. https://doi.org/10.15356/2076-6734-2018-2-225-230

Sokol'nikov V.M. Nekotorye zakonomernosti formirovaniya i rosta ledyanogo pokrova na primere ozera Bajkal. Some regularities in the formation of ice cover on the example of Lake Baikal. "Work of the Baikal limnological station". 1957, 15: 58–64 [In Russian].

Sokol'nikov V.M. Vertical and horizontal displacements and deformations of the continuous ice cover of Baikal. Trudy *Bajkal'skoj limnologicheskoj stancii*. Proc. of the Baikal Limnological Station. 1960, 18: 291–350 [In Russian].

Sokol'nikov V.M. Osobennosti otdachi Bajkalom tepla i vlagi pered ledostavom. Features of Baikal heat and moisture transfer before freezing. Novosibirsk, 1967: 121–123 [In Russian].

Tarasov N.M., Korenovskaya I.M. Comparative characteristics of the chemical composition of ice and water in some water bodies of the North Caucasus. *Gidrohimiya materialov*. Hydrochemistry of materials. Leningrad: Hydrometeoizdat, 1966, 42: 196–210 [In Russian].

Shimaraev M.N. Elementy teplovogo rezhima ozera Bajkal. An element of the thermal regime of Lake Baikal. Novosibirsk: Nauka, 1977: 150 p. [In Russian].

Shostakovich V.B. Led na ozere Bajkal. Ice on Lake Baikal. Saint Petersburg: Main Hydrographic Department, 1908: 331–346 [In Russian].

Obolkin V.A., Volkova E.A., Ohira S.I., Toda K., Netsvetaeva O.G., Chebunina N.S., Nosova V.V., Bondarenko N.A. The role of atmospheric precipitation in the under-ice blooming of endemic dinoflagellate Gymnodinium baicalense var. minor Antipova in Lake Baikal.

Limnology and Freshwater Biology. 2019, (6): 345–352. https://doi.org/10.31951/2658-3518-2019-A-6-345