

ГИДРОХИМИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА СНЕГОВЫХ И ОЗЁРНЫХ ВОД ОАЗИСОВ АНТАРКТИДЫ В РАЙОНАХ РАЗМЕЩЕНИЯ НАУЧНЫХ СТАНЦИЙ

© 2024 г. С. В. Какарека^{1*}, Т. И. Кухарчик¹, С. Ю. Тарасенко²,
К. О. Рябычин¹, Ю. Г. Кокош¹, П. В. Курман³

¹Институт природопользования Национальной академии наук Беларуси, Минск, Беларусь

²Арктический и антарктический научно-исследовательский институт, Санкт-Петербург, Россия

³Институт биоорганической химии Национальной академии наук Беларуси, Минск, Беларусь

*e-mail: sk001@yandex.ru

Поступила 26.04.2024 г.

После доработки 14.06.2024 г.

Принята к печати 08.07.2024 г.

Приведены результаты анализа макро- и микроэлементного состава снега и воды из озёр, отобранных в один гидрологический год в районах размещения семи антарктических станций. Охарактеризованы методы отбора проб и химико-аналитических работ. Обсуждаются особенности гидрохимического состава снеговых и поверхностных вод, а также возможные факторы изменчивости концентрации основных ионов, макро- и микроэлементов.

Ключевые слова: снежный покров, озера, научные станции, Антарктида, антарктический оазис, макроэлементы, микроэлементы

DOI: 10.31857/S2076673424030095, EDN: INOFBY

ВВЕДЕНИЕ

Антарктида, самый чистый континент на планете, весьма уязвима даже к низким уровням антропогенного воздействия (Bargagli, 2000). Для выявления изменений состояния природной среды и прогнозирования важную роль играет экологический мониторинг, который приобретает особое значение в районах функционирования антарктических научных станций (Протокол по охране..., 1991). Химический состав снежно-ледового покрова и пресных водоёмов Антарктиды – необходимый элемент экологического мониторинга. Его проведение также важно для контроля поступления загрязняющих веществ в природную среду, выявления источников поступления загрязняющих веществ, прогноза последствий климатических изменений на разных уровнях.

К настоящему времени накоплено большое количество данных, подтверждающих широкую вариабельность макро- и микроэлементов в снежном покрове (Wagenbach et al., 1998; Dixon et al., 2013; Tuohy et al., 2015; Kakareka et al., 2020), в антарктических озёрах и временных водоёмах (Gillieson et al., 1990; Gasparon, Burgess,

2000; Nędzarek et al., 2015; Kakareka et al., 2023). При этом изученность и обеспеченность информацией отдельных регионов и/или оазисов весьма неоднородна. Так, Антарктический полуостров и острова морской Антарктики относятся к наиболее изученным районам, что объясняется их близостью к Южной Америке, доступностью для посещения, сравнительно мягким климатом, а также большим количеством научных станций (Pęcherzewski, 1987; Toro et al., 2007; Скороспехова и др., 2016; Szumińska, Potapowicz, 2021). Значительное внимание уделено исследованию озёр Холмов Ларсеманн (Gillieson et al., 1990; Ellis-Evans et al., 1998; Sabbe et al. 2004; Asthana et al., 2013), хотя данных о химическом составе снежного покрова для этого оазиса немного (Thamban, Thakur, 2013; Budhavant et al., 2014). В меньшей степени изучены озёра и снежный покров в оазисе Ширмахера (Kumar et al., 2002; Ali et al., 2010; Asthana et al., 2019). Сравнительно недавно начаты исследования в оазисе Вечерний (Какарека и др., 2019; Kakareka et al., 2019; Какарека и др., 2021). Пока мало опубликованных данных о химическом составе снега и озёр в районе станции Мирный (Матвеев, 1962; Смагин, 2007), практически

отсутствуют они для станции Молодёжная, полевой базы Дружная-4. Кроме того, сравнение уже имеющихся результатов исследований в разных оазисах осложнено одновременностью отбора проб, использованием разных схем и методов отбора и методик химико-аналитических испытаний, неодинаковым перечнем определяемых элементов и другими факторами.

Цель работы – получить гидрохимическую характеристику снежного покрова и пресных водоёмов в районах размещения российских и белорусской научных станций в южнополярный летне-осенний период 2023 г.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Общие сведения о районах исследования. Координированный отбор проб компонентов природной среды выполнен силами 15-й Белорусской и 68-й Российской антарктических экспедиций с учётом особенностей местоположения станций и логистики сезона 2022/23 г. на российских антарктических станциях Беллинсгаузен, Новолазаревская, Прогресс, Мирный, полевых базах Дружная-4 и Молодёжная и белорусской антарктической станции Гора Вечерняя (рис. 1). Общее количество отобранных проб снежного покрова составило 24, поверхностных вод – 16 (табл. 1).

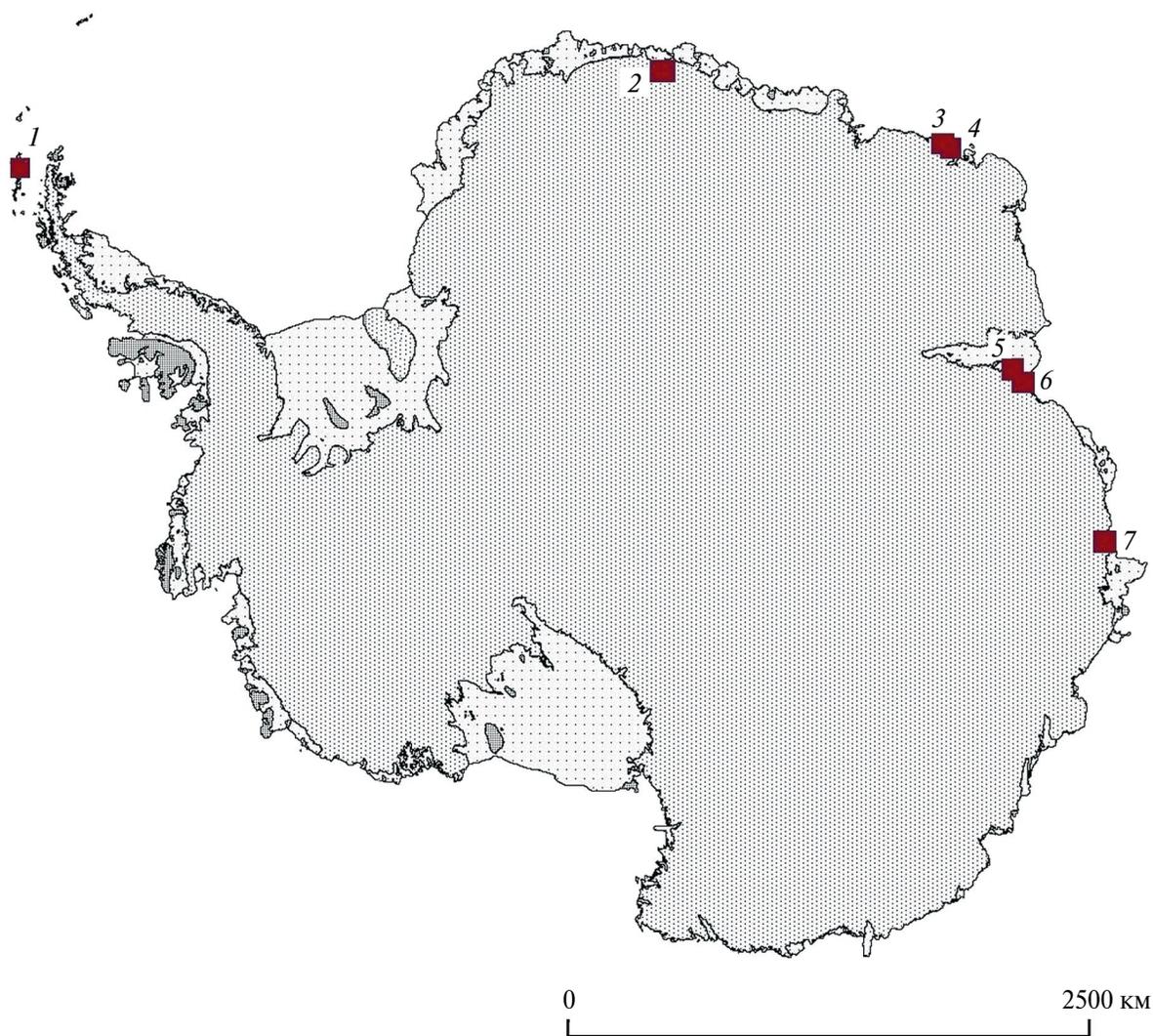


Рис. 1. Схема размещения научных станций, на которых выполнен отбор проб снега и поверхностных вод в январе – мае 2023 г.: 1 – Беллинсгаузен, 2 – Новолазаревская, 3 – Молодежная, 4 – Гора Вечерняя, 5 – Дружная-4, 6 – Прогресс, 7 – Мирный

Fig. 1. Location of Antarctic stations for snow and surface water sampling in January – May 2023: 1 – Bellingshausen, 2 – Novolazarevskaya, 3 – Molodezhnaya, 4 – Vechernyaya mountain, 5 – Druzhnaya-4, 6 – Progress, 7 – Mirny

Таблица 1. Общие сведения о районах исследований и местах отбора проб снежного покрова и поверхностных вод в районах размещения российских и белорусской антарктических станций в январе – мае 2023 г.

Регион	Станция	Тип субстрата	Место отбора	Количество проб
Остров Кинг-Джордж (Ватерлоо), Южные Шетландские острова	Беллинсгаузен	Снег	Бухта Каменистая, долина ручья Станционного, участок между радиодомом и медицинским корпусом	3
		Поверхностная вода	Озеро Китеж, ручей Станционный	3
Оазис Ширмахера, Земля Королевы Мод	Новолазаревская	Снег	Вост. берег озера Верхнее; склон к северу от кают-компаний и ДЭС; к сев. от старой станции	3
Холмы Ларсеманн, Земля Принцессы Елизаветы	Прогресс	Снег	Территория станции (севернее служебно-жилого здания; нефтебаза); к северу от базы Лоу	3
		Поверхностная вода	Озера Рейд, Лоу, Степед	3
Берег Правды, Земля Королевы Мэри	Мирный	Снег	Остров Хасуэлл; Сопка Моренная рядом с топливными емкостями; в районе ДЭС; между сопками Комсомольская и Радио	4
Утес Лендинг, Берег Ингрид Кристенсен, Земля Принцессы Елизаветы	Дружная-4	Снег	В районе АМС	1
Холмы Тала, Земля Эндерби	Молодежная	Снег	Возле ДЭС примерно в 30 метрах и на берегу озера Лагерное	2
		Поверхностная вода	Озеро Лагерное	1
	Гора Вечерняя	Снег	Территория станции у жилых модулей, мест хранения топлива; вблизи озера Нижнее; на мысе Гнездовой, сопке Рубин	10
		Поверхностная вода	Озера Нижнее, Верхнее-1, Верхнее-2, Верхнее-3, временные водоемы	10

Методы отбора проб. Пробы снега взяты в соответствии с действующими руководствами (РД 52.04.186-89, 1991; ТКП 17.13-15-2014, 2015). Отбирали рыхлый слой снега на глубину до 10–15 см. Для отбора снега выбирали площадку размером не менее 2×2 м, с которой с помощью совка из нержавеющей стали отбирали смешанную пробу в нескольких точках для формирования общей пробы. Пробы воды отбирали путём полного погружения ёмкости в водоём.

Пробы снежного покрова и озёрных вод отбирали в пластиковые ёмкости объёмом 0.5 л и 0.1 л, которые предварительно были вымыты и высушены перед отправкой в Антарктиду. Перед отбором

проб воды ёмкости ополаскивались водой из водоёма. После отбора все пробы плотно закрывались и замораживались до доставки в лаборатории.

Пробоподготовка и химико-аналитические определения. Пробоподготовка и химико-аналитические исследования выполнены в аккредитованных лабораториях Института природопользования и Института биоорганической химии Национальной академии наук Беларуси.

После растапливания пробы снеговых и поверхностных вод фильтровали через фильтр с размером пор 0.45 мкм. Концентрации макро- и микрокомпонентов (Na, Mg, Ca, K, Fe, Al, Ag, As, Ba,

Be, Cd, Co, Cr, Cu, Mn, Mo, Ni, Pb, Sb, Se, Th, Tl, U, V и Zn) определяли методом ICP-MS с использованием масс-спектрометра с индуктивно связанной плазмой Agilent 7500cx ICP-MS. Аликвоты проб (5 мл) пипеткой переносили в пробирки из полиэтилена высокой плотности, в которые добавляли по 0.2 мл очень чистой азотной кислоты. Аналитическая процедура начиналась через час. Для инструментальной калибровки использовали стандартные растворы (стандарт Agilent 5183-4688) с концентрацией 1000 ppm для Fe, K, Ca, Na, Mg и 10 ppm для Ag, Al, As, Ba, Be, Cd, Co, Cr, Cu, Mn, Mo, Ni, Pb, Sb, Se, Tl, V, Zn, Th и U в 10%-ной HNO₃. Калибровочные бланки, значения которых всегда были ниже предела обнаружения, готовили для контроля аналитической точности.

Концентрации хлоридов определяли титриметрическим методом с нитратом серебра (СТБ 17.13.05-39-2015), гидрокарбонат-ионов – титриметрически с использованием тетраборнокислого натрия (ГОСТ 31957-2012), сульфатов – турбидиметрически (СТБ 17.13.05-42-2015 и СТБ 17.13.05-37-2015), нитратов и ионов аммония – фотометрически (ГОСТ 33045-2014); величину pH определяли потенциометрическим методом (СТБ ISO 10523-2009), удельную электропроводность – с использованием кондуктометра. В пробах поверхностных вод для расчёта ионного баланса методом пламенной фотометрии (МВИ.МН 2140-2004) определяли концентрации ионов натрия и калия, титриметрически (СТБ 17.13.05-46-2016) – кальция и магния. Более подробная информация о методах химико-аналитических работ приведена в (Какарека и др., 2021; Kakareka et al., 2023).

РЕЗУЛЬТАТЫ

Снежный покров. Выполненные исследования показали, что по величине pH снеговые воды на всех станциях близки к равновесной величине 5.6 (табл. 2). В оазисе Вечернем лишь в одной пробе (9% случаев) значение pH составило 6.35. В районе станции Дружная-4 снег более кислый (pH=5.38) по сравнению с другими обследованными районами.

По величине удельной электропроводности самая низкая минерализация снеговых вод характерна для оазиса Вечерний – среднее значение 5.88 мкСм/см. Более высокие значения минерализации снеговых вод отмечаются в оазисе Ларсеманн (среднее – 15.1 мкСм/см) и на станции Мирный (12.1 мкСм/см). По сравнению с оазисом Вечерний на станциях Беллинсгаузен и Дружная-4 удельная электропроводность снеговых вод выше в 1.6 раза, на станции Новолазаревская – в 1.4 раза.

В снеговых водах во всех случаях доминируют хлориды и натрий, что свидетельствует о

повсеместном определяющем влиянии морских аэрозолей. По средним концентрациям хлоридов ранжированный ряд в порядке убывания выглядит следующим образом: Холмы Ларсеманн (4.2 мг/л) > Мирный (2.5) > Беллинсгаузен (1.6) > Вечерний (1.5) > Дружная-4 (1.1) > Новолазаревская (0.87) > Молодёжная (0.83 мг/л). Максимум хлоридов (7.9 мг/л) зафиксирован в снеговых водах Холмов Ларсеманн.

Максимальная концентрация натрия (14.95 мг/л) характерна для снежного покрова станции Мирный; здесь же более высокая по сравнению с другими станциями средняя его концентрация (4.65 мг/л). Далее по мере убывания – Холмы Ларсеманн (2.37 мг/л) и станция Беллинсгаузен (1.96 мг/л). Самые низкие концентрации натрия (0.30–0.41 мг/л) характерны для снежного покрова оазиса Молодёжный.

Средние концентрации магния примерно одинаковые на станции Новолазаревская (0.25 мг/л), Холмы Ларсеманн (0.24 мг/л) и Мирный (0.21 мг/л), затем следует станция Беллинсгаузен (0.16 мг/л). В остальных случаях концентрации магния составляют 0.04–0.06 мг/л. Максимальные значения магния в снеговых водах зафиксированы в Холмах Ларсеманн (0.58 мг/л); близки к ним значения на станции Мирный (0.51 мг/л).

Концентрации калия в пробах снежного покрова по средним значениям варьируют от 0.03 мг/л (Дружная-4) до 0.38 мг/л (Беллинсгаузен), кальция – от значений ниже предела чувствительности метода (менее 0.003 мг/л) (Гора Вечерняя, Дружная-4) до 0.54 мг/л (станция Мирная).

Концентрации сульфатов в снеговых водах за исключением двух случаев (в оазисах Вечерний и Холмы Ларсеманн) находятся ниже предела обнаружения. Станция Новолазаревская несколько выделяется концентрациями нитратов в пробах снега, где их среднее значение составило 1.09 мг/л. В остальных случаях концентрации нитратов не превышают 0.5 мг/л.

Из микроэлементов по абсолютным значениям на большинстве станций выделяется железо (рис. 2). При этом наиболее высокие его концентрации (715 мкг/л) зафиксированы на станции Новолазаревская. Повышенные концентрации железа отмечаются в снеговых водах на станции Беллинсгаузен (среднее – 72 мкг/л). На других станциях они варьируют в небольших пределах: от 8 (Мирный) до 24 мкг/л (Молодёжная). На втором месте по концентрациям среди микроэлементов находится алюминий. Максимальное его значение (330 мкг/л), как и железа, зафиксировано в снежном покрове на станции Новолазаревская. Средняя же его концентрация между другими станциями сопоставима и находится в диапазоне от 2.01 (Холмы Ларсеманн)

Таблица 2. Основные гидрохимические характеристики снежного покрова в районах размещения российских и белорусской антарктических станций в январе – мае 2023 г.

Станция, кол-во проб	Даты отбора проб	Показатель	pH	Удельная электропроводность, $\mu\text{См/см}$	Cl^-	SO_4^{2-}	NO_3^-	Na	Mg	Ca	K
Беллинстаузен, 3	23–24.05.23	среднее	5.56	9.63	1.65	н.о.*	0.26	1.96	0.16	0.06	0.38
Гора Вечерняя, 11	29.12.22, 5.01.23	диапазон	5.38–5.68	7.87–10.5	1.23–1.96		0.17–0.33	1.02–3.29	0.10–0.23	0.01–0.10	0.05–0.85
		среднее	5.55	5.88	1.39	н.о.-0.15	0.11	0.82	0.06	н.о.	0.06
Мирный, 4	23–24.01.23	диапазон	5.27–6.35	3.3–10.65	0.54–2.9		н.о.–0.44	0.23–1.86	0.02–0.14		0.02–0.14
		среднее	5.52	12.1	2.48	н.о.	0.17	4.65	0.21	0.43	0.16
Молодежная, 2	31.01.23	диапазон	5.24–5.77	4.93–20.3	1.16–4.43		н.о.–0.24	0.39–14.9	0.03–0.51	0.00–1.60	0.04–0.37
		среднее	5.50	6.21	0.83	н.о.	0.10	0.36	0.04	0.05	0.08
Новолазаревская, 3	7–8.05.23	диапазон	5.19–5.81	4.43–8.0	0.80–0.87		н.о.–0.16	0.30–0.41	0.03–0.05	н.о.–0.09	0.03–0.12
		среднее	5.52	8.35	0.87	н.о.	1.09	0.49	0.25	0.16	0.35
Прогресс, 3	6–7.01.23	диапазон	5.45–5.66	4.52–10.76	0.69–1.09		0.11–1.82	0.30–0.69	0.21–0.29	0.15–0.16	0.28–0.43
		среднее	5.61	15.14	4.2	н.о.–0.19	0.22	2.37	0.24	0.04	0.10
Дружная-4 (1)	7.02.23	диапазон	5.2–5.85	4.89–28.61	1.27–7.91		н.о.–0.36	0.65–5.32	0.04–0.58	н.о.–0.10	0.04–0.22
		среднее	5.38	9.46	1.09	н.о.	0.56	0.48	0.05	н.о.	0.03

* «н.о.» – ниже предела обнаружения

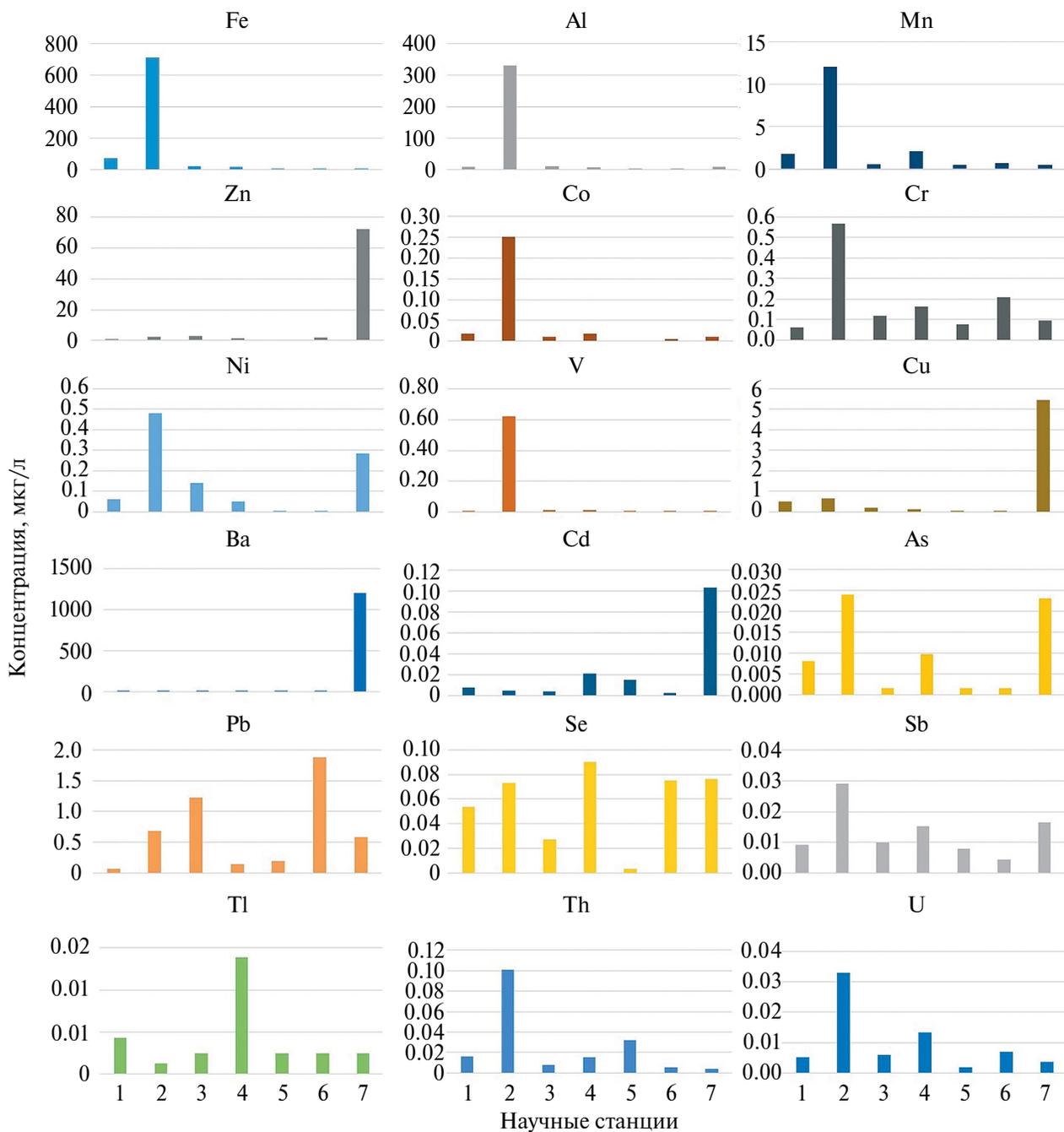


Рис. 2. Сравнение содержания микроэлементов в снеговых водах в районах размещения российских и белорусской антарктических станций в январе – мае 2023 г.: Научные станции: 1 – Беллинсгаузен, 2 – Новолазаревская, 3 – Молодежная, 4 – Гора Вечерняя, 5 – Дружная-4, 6 – Прогресс, 7 – Мирный

Fig. 2. Comparison of the content of trace elements in snow waters within Russian and Belarusian Antarctic stations in January – May 2023: Research stations: 1 – Bellingshausen, 2 – Novolazarevskaya, 3 – Molodezhnaya, 4 – Vecherniyaya mountain, 5 – Druzhnaya-4, 6 – Progress, 7 – Mirny

до 10.9 мкг/л (Молодежная). Тесная связь между концентрациями железа и алюминия (коэффициент детерминации $R^2 = 0.96$) для всей выборки свидетельствует об их минеральном происхождении.

По сравнению с другими обследованными районами концентрации Co, Ni, Cr, V, Mn, Sb, Th и U на станции Новолазаревская повышены. Обращают на себя внимание аномально высокие концентрации бария (4824 мкг/л), цинка (280.6 мкг/л)

и меди (20.2 мкг/л), зафиксированные на острове Хасуэлл недалеко от станции Мирный.

Из технофильных элементов повышенные концентрации свинца выявлены в снеге Холмов Ларсеманн (среднее 1.88 мкг/л) и станции Молодёжная (1.23 мкг/л). Мышьяк в более высоких концентрациях по сравнению с другими районами обнаружен на станциях Мирный и Новолазаревская (примерно 0.02 мкг/л). Концентрации селена в большинстве случаев находятся в диапазоне 0.03–0.09 мкг/л (на полевой базе Дружная-4 – не обнаружен). Также достаточно близки значения концентрации сурьмы: 0.01–0.03 мкг/л. По концентрациям таллия несколько выделяется снежный покров горы Вечерняя, где они оцениваются в 0.014 мкг/л (на других станциях замеренный диапазон составил 0.001–0.004 мкг/л). Концентрации тория находятся в диапазоне 0.004–0.101 мкг/л, урана – 0.002–0.033 с максимальными значениями, как уже отмечалось, на станции Новолазаревская.

Поверхностные воды. Всего было опробовано 10 озёр и один ручей (не во всех оазисах удалось провести опробование из-за ограничений в доступе к воде в осенний период). При этом выявлены значительные различия основных гидрохимических параметров поверхностных вод, обусловленные как общегеографическими факторами, так и локальными ландшафтными и метеорологическими условиями. Как известно, основным источником питания озёр и временных водоёмов в антарктических оазисах служат талые снеговые и ледниковые воды, состав которых также имеет некоторые региональные и локальные различия. Вместе с тем, формирование химического состава водоёмов Антарктики в значительной степени зависит от их гидрологических и морфометрических характеристик, а также литологического состава горных пород.

В оазисе Вечерний аквальные системы представлены небольшими по площади озёрами. Все озёра проточные, снежно-ледникового питания. Самое большое озеро Нижнее (0.015 км²), расположенное на отметках 40.3 м над уровнем моря, служит приёмником вод из системы расположенных выше озёр, получивших название Верхнее. Максимальная глубина – 4 м, толщина льда варьирует от 0.7 до 2 м. Озеро практически никогда не вскрывается полностью ото льда. Озера Верхнее-1 и Верхнее-3 мелководные и, как правило, полностью освобождаются ото льда в летний период.

Согласно полученным результатам, все озёра оазиса Вечерний слабокислые, очень маломинерализованные: величина удельной электропроводности в озере Нижнем менее 50 мкСм/см, в других озёрах – от 60.7 до 106 мкСм/см (табл. 3). Не выявлено чётких изменений гидрохимических показателей в озере Нижнем за время работы БАЭ, хотя

первый отбор проведён в конце января. Концентрации основных анионов и катионов варьируют в незначительных пределах, за исключением хлоридов (4.1–20.3 мг/л) и ионов натрия (1.9–15.1 мг/л). Концентрации сульфатов находятся в диапазоне от значений ниже предела обнаружения до 2.6, нитратов – от 0.10 до 0.54 мг/л.

Слабокислые и очень маломинерализованные воды характерны и для озера Лагерного в районе станции Молодёжная. Прослеживается сходство уровней содержания основных ионов с озёрами оазиса Вечерний. В районе станции Беллинсгаузен опробованы озеро Китеж и ручей Станционный. По величине рН воды озера и ручья нейтральны, со средней минерализацией. Величина удельной электропроводности здесь находится в диапазоне 227–362 мкСм/см. При этом концентрации основных ионов выше в водах ручья по сравнению с озером, в особенности гидрокарбонатов (примерно в 3 раза), сульфатов (в 2.7), нитратов (в 4.6) и ионов кальция (в 2 раза). Это связано, вероятно, с более активными процессами выщелачивания химических элементов на его водосборе.

Результаты химико-аналитических испытаний в оазисе Холмы Ларсеманн показали, что в начале лета 2023 г. вода озёр Лоу и Рейд характеризовалась слабощелочной реакцией среды, а в озере Степед была близка к нейтральной. Величина удельной электропроводности в этих озёрах составила 656–2136 мкСм/см. Среди компонентов макросостава выделялись хлориды (с максимумом 722.8 мг/л в оз. Лоу) и натрий (339.6 мг/л). Концентрации сульфатов находились в диапазоне 27.9–40.3 мг/л, что сопоставимо с результатами для поверхностных вод в районе станции Беллинсгаузен и значительно выше, чем в водоёмах оазиса Вечерний. В то же время концентрации гидрокарбонатов (1.46–4.64 мг/л) оказались самыми низкими среди обследованных районов.

В отношении микроэлементов также выявлены существенные различия: так, содержание железа варьирует от 10.0 до 776.3 мкг/л, марганца – от 0.31 до 25.6 мкг/л, алюминия – от 1.5 до 16.0 мкг/л, цинка – от 0.10 до 25.0 мкг/л, никеля – от значений ниже предела обнаружения (0.003 мкг/л) до 2.3 мкг/л (рис. 3). Рассматривая региональные различия, следует отметить, что минимальное содержание железа характерно для водоёмов оазисов Вечерний и Молодёжный (10 мкг/л), максимальное – для острова Кинг-Джордж, Ватерлоо (780 мкг/л). При этом в ряде озёр оазиса Вечерний по сравнению с другими регионами зафиксированы более высокие концентрации алюминия, цинка, марганца и меди, в солончатых озёрах Холмов Ларсеманн – сурьмы, кобальта, никеля и селена. Более высокие концентрации тория зафиксированы в озёрах оазиса Вечерний, урана – в озёрах оазиса Холмы Ларсеманн.

Таблица 3. Основные гидрохимические характеристики водоёмов в районах размещения российских и белорусской антарктических станций в январе – мае 2023 г.

Станция	Дата отбора проб	Название водоема/водотока	pH	Удельная электропроводность, $\mu\text{См/см}$	HCO_3^-	Cl^-	SO_4^{2-}	NO_3^-	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Na^+	K^+
Гора Вечерняя	30.01.23	Оз. Нижнее	6.51	15.4	11.08	4.14	0.30	0.10	2.24	0.90	1.9	0.68
	29.03.23		6.37	37.5	11.26	7.45	н.о.*	0.15	1.48	1.81	3.5	0.87
	13.01.23	Оз.Верхнее	6.70	63.8	12.48	14.49	0.81	0.23	1.48	2.26	9.3	1.09
	13.01.23	Оз. Верхнее-3	6.62	60.7	13.80	13.66	2.63	0.19	2.24	3.16	8.8	1.01
	13.01.23	Оз. Верхнее-1	6.70	106.0	17.10	20.29	2.22	0.11	1.48	2.26	15.1	1.77
	13.01.23	Оз. Верхнее-2	6.61	64.2	15.9	12.84	1.21	0.54	2.24	2.26	8.8	1.05
Молодежная	31.01.23	Оз.Лагерное	6.50	16.7	7.40	4.14	н.о.	0.12	2.2	0.90	1.6	0.86
Беллинсгаузен	24.05.23	Оз.Китеж	7.48	226.9	24.9	52.6	20.2	0.10	11.2	4.5	31.6	2.7
	24.05.23	Р.Станционный, ниже плотины	7.49	336.3	74.4	56.2	48.4	0.45	22.4	4.5	50.4	3.9
	25.05.23	То же, приустьевой участок	7.59	361.5	17.4	63.2	55.1	0.48	22.4	8.2	38.5	3.8
Прогресс	06.01.23	Оз. Лоу	7.89	2136.0	4.64	722.8	40.3	0.20	44.7	33.9	339.6	26.9
	06.01.23	Оз. Рейд	7.77	1562.0	1.46	526.4	27.9	0.21	20.9	23.5	220.8	26.9
	07.01.23	Оз. Степпед	6.76	655.8	1.46	224.6	36.1	н.о.	14.9	8.6	106.1	11.6

* «н.о.» – ниже предела обнаружения

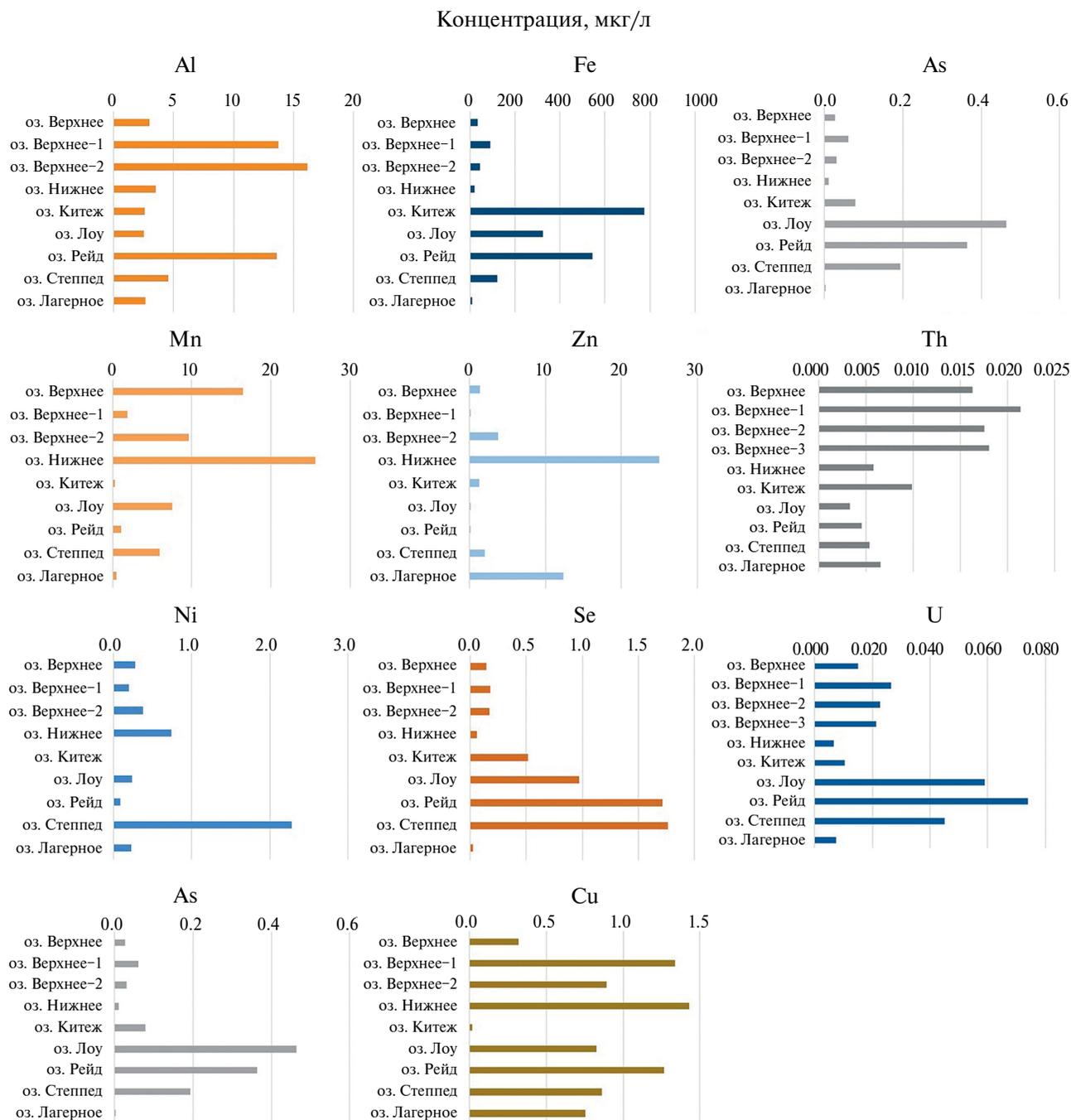


Рис. 3. Содержание микроэлементов в поверхностных водах в районах размещения российских и белорусской антарктических станций в январе – мае 2023 г.

Fig. 3. Content of trace elements in surface water within Russian and Belarusian Antarctic stations in January – May 2023

ОБСУЖДЕНИЕ

Снежный покров. Несмотря на местоположение обследованных станций и полевых баз на побережье, воздействие морских аэрозолей на химический состав снежного покрова несколько различается. Так, на фоне преобладания в снеговых водах во всех случаях натрия, на втором месте в Холмах

Ларсеманн, оазисе Вечерний и полевой базе Дружная-4 находится магний, на станциях Новолазаревская и Беллинсгаузен – калий, на станции Мирный – кальций. Это может быть обусловлено дополнительным привнесом твёрдых частиц и, соответственно, химических элементов из-за пыления бесснежных участков, влияния орнитофауны

или других факторов (Какарека и др., 2021; Kakareka et al., 2023).

Более выражено влияние терригенного привноса материала на повышенные концентрации ряда микроэлементов на станции Новолазаревская. По оценкам (Филатов и др., 2013), в оазисе Ширмахера химическое и физическое выветривание происходит интенсивнее по сравнению с Холмами Тала, в результате чего образуется больше мелкодисперсного материала, способного к перемещению с водными потоками и ветровым переносом.

Более высокие по сравнению с другими станциями концентрации цинка и меди в пробах снега, отобранных в районе сопки Комсомольская на станции Мирный, возможно, обусловлены длительным периодом действия станции, которая начала функционировать в 1956 г. и долгое время была местом формирования санно-гусеничных транспортных походов на станцию Восток. На острове Хасуэлл не исключается орнитогенное воздействие.

Влияние морских аэрозолей, судя по полученным данным, в большей степени проявляется в Холмах Ларсеманн и на станции Мирный, в меньшей – на станции Новолазаревская, расположенной в 80 км от моря Лазарева. Как известно, закономерное снижение концентрации основных ионов с удалением от берега чётко зафиксировано на региональных и трансконтинентальных профилях, длина которых составляет сотни и тысячи километров (Bertler et al., 2005; Thamban et al., 2010; Голобокова и др., 2012; Khodzher et al., 2014). Воздействию морских солей подвержен полуостров Брокнес (Холмы Ларсеманн) благодаря низким абсолютным отметкам, а также преобладающим ветрам восточного направления, которые их приносят летом с открытой водной поверхности (Kierman et al., 2009; Asthana et al., 2019).

Низкие концентрации основных ионов и величин удельной электропроводности в оазисах Вечерний и Молодёжная связаны с доминированием здесь антициклонических ветров юго-юго-восточного направления в период с февраля по июль, соответственно, с меньшим влиянием воздушного переноса со стороны открытого моря.

Сравнение с ранее выполненными исследованиями осложняется разным временем отбора проб, их количеством и местоположением. Можно лишь отметить, что полученные данные для оазисов Вечерний и Холмы Ларсеманн сопоставимы с недавно опубликованными (Какарека и др., 2021; Kakareka et al., 2023). В районе станции Мирный зафиксированы более низкие концентрации сульфатов по сравнению с периодом 1970–1990 гг., когда их среднегодовые значения составляли 0.12–0.81 мг/л и отмечался тренд их увеличения (Смагин, 2007).

Данные для станции Белингаузен оказались несколько ниже по сравнению с результатами Т.В. Скороспеховой с соавторами (2016): согласно результатам работ 58-й и 59-й РАЭ, концентрации хлоридов в пробах снега варьировали в пределах 1.9–6.9 мг/л, натрия и калия – 0.9–2.8 мг/л. Следует подчеркнуть, что для острова Кинг-Джордж (Ватерлоо) получено значительное количество данных о химическом составе снежного покрова с весьма существенной вариабельностью значений. Так, по данным (Szumińska et al., 2021), при исследовании в 2017 г. на Варшавском куполе, охватывающем территорию между западным берегом залива Адмиралти и бухтами Поттер и Мариан, содержание натрия в пробах снега находилось в диапазоне от 0.21 до 5.9 мг/л, хлоридов – от 0.31 до 17 мг/л, сульфатов – от значений ниже предела обнаружения до 2 мг/л.

Значительная вариабельность концентраций микроэлементов, свойственная даже в пределах одного оазиса, также ограничивает возможности сравнительного анализа между ними (Szumińska et al., 2021; Kakareka et al., 2023). Например, по данным (Szumińska et al., 2021), содержание цинка в снежном покрове на леднике в 2017 г. варьировало от 5.09 до 45.1 мкг/л, алюминия – от 1.7 до 6.29, сульфы – от 0.02 до 0.49 мкг/л.

Поверхностные воды. Обследованные озёра весьма различны по химическому составу. Так, если озёра Лоу, Рейд и Степед в Холмах Ларсеманн по составу хлоридно-натриевые, то в районе станции Беллингаузен воды озера Китеж – сульфатно-хлоридные кальциево-натриевые, на Вечерней – гидрокарбонатно-хлоридные натриевые, на Молодёжной – хлоридно-гидрокарбонатные магниевые-кальциевые (рис. 4).

О разной интенсивности процессов химического выветривания и выщелачивания свидетельствуют рассчитанные коэффициенты соотношений основных ионов. Например, значение Cl/Na варьирует от 1.5 (станция Беллингаузен) до 2.6 (оазис Молодёжный), что близко величине 1.8, свойственной морской воде (Chester, Jickells, 2003) и в целом подтверждает преимущественно морское влияние на состав озёрных вод. В то же время по соотношению SO_4/Cl выделяется район станции Беллингаузен (значение равно 0.24, тогда как на других станциях 0.03 при соотношении для морской воды – 0.052). По соотношению HCO_3/Cl более высокие коэффициенты получены для оазисов Молодёжный (1.79) и Вечерний (1.03); повышен по сравнению с морской водой (0.0038) и коэффициент для станции Беллингаузен (0.69). Этого и следовало ожидать, помня о связях с различиями горных пород, типом и количеством выпадающих осадков, продолжительностью летнего периода и другими факторами.

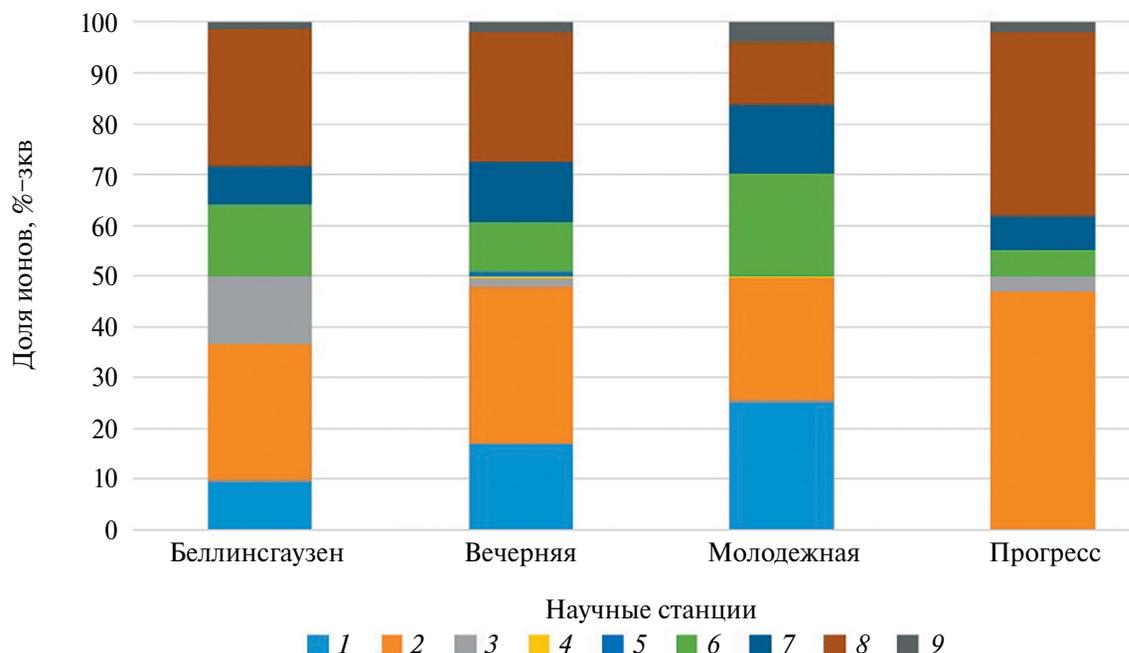


Рис. 4. Химический состав поверхностных вод в районах размещения российских и белорусской антарктических станций в январе – мае 2023 г.: 1 – гидрокарбонаты, 2 – хлориды, 3 – сульфаты, 4 – азот нитратный, 5 – азот аммонийный, 6 – кальций, 7 – магний, 8 – натрий, 9 – калий

Fig. 4. Chemical composition of surface waters within Russian and Belarusian Antarctic stations in January – May 2023: 1 – hydrocarbonates, 2 – chlorides, 3 – sulfates, 4 – nitrate, 5 – ammonium, 6 – calcium, 7 – magnesium, 8 – sodium, 9 – potassium

Сравнение результатов для оазиса Вечерний с последними данными (Какарека и др., 2019) свидетельствует об отсутствии существенных изменений состояния озёр. В целом же, что касается озёр различных регионов, то необходимо учитывать разнообразие их химического состава и исходных

свойств. Приведённые в табл. 4 данные по удельной электропроводности поверхностных вод свидетельствуют о значительной вариабельности минерализации поверхностных вод в пределах некоторых оазисов.

Таблица 4. Сравнение величины удельной электропроводности в поверхностных водах ряда оазисов Антарктиды

В целом, в отношении водоёмов и водотоков оазисов наиболее целесообразно сравнение результатов исследований для конкретных объектов, поскольку уже неоднократно отмечалось их разнообразие в пределах оазисов: например, в оазисе Холмы Ларсеманн (Gillieson et al., 1990; Ellis-Evans et al., 1998; Gasparon et al., 2002); Ширмахера (Asthana et al., 2019; Kumar et al., 2002), на острове Кинг-Джорж (Prendez, Carrasco, 2003; Toro et al., 2007; Nedrazeck et al., 2015; Скороспехова и др., 2016). Вместе с тем, лишь в отношении некоторых озёр имеются данные за разные годы исследований, в том числе в оазисе Вечерний (Какарека et al., 2019), где отбор проб выполняется в соответствии с программой работ практически ежегодно.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты координированного отбора проб снежного покрова и поверхностных вод в январе – мае 2023 г. позволили охарактеризовать их гидрохимические особенности в районах расположения

Район, станция	Удельная электропроводность, $\mu\text{См/см}$	Источник
Гора Вечерняя	14.4–106.0	Данные авторов
	19.3–130.0	Какарека и др., 2019
Беллинсгаузен	226.9–361.5	Данные авторов
	53.9–580.0	Neđzarek et al., 2015
Холмы Ларсеманн	655.8–2136	Данные авторов
	14.1–2880	Какарека et al., 2023
	130–3340	Gillieson et al., 1990
	66.7–2939	Boronina et al., 2019

ряда научных станций и полевых баз РАЭ и БАЭ на острове Кинг-Джордж (Ватерлоо), оазисе Ширмахера, оазисах Молодёжный и Вечерний, Холмы Ларсеманн, Береге Принцессы Елизаветы. Выполненные исследования показали, что наибольшему воздействию морских аэрозолей подвергаются прибрежные зоны Холмов Ларсеманн и станции Мирный, меньшему – наиболее удалённая от побережья станция Новолазаревская. При этом в снеговых и озёрных водах во всех случаях доминируют ионы натрия и хлориды. Вариабельность и различия в концентрациях макро- и микроэлементов подтверждает разную интенсивность выщелачивания и процессов химического выветривания в оазисах, что связано с разными факторами, включая количество атмосферных осадков, период снеготаяния и другие.

В целом, обследования оазисов в различных регионах Антарктиды в течение одного сезона проводятся редко из-за сложности их организации. Их важность заключается в возможности выявления и характеристики пространственных особенностей гидрохимического состава природных вод разных масштабов в рамках одного гидрологического (летне-осеннего) сезона. Систематические обследования такого типа можно рассматривать как мониторинг, который позволит описать внутри- и межгодовую изменчивость гидрохимических показателей, а также определить тренды изменения содержания макро- и микроэлементов с учётом разных факторов воздействия.

Финансирование. Работа выполнена в рамках подпрограммы «Развитие деятельности Белорусской антарктической станции» на 2021–2025 годы.

Благодарности. Авторы выражают признательность руководству и участникам 15-й БАЭ и 68-й РАЭ за содействие в отборе и доставке проб, М.А. Кудревич и Г.М. Боккой за химико-аналитические испытания проб.

Acknowledgements. The authors express their gratitude to the leadership and participants of the 15th BAE and 68th RAE for assistance in the collection and delivery of samples, M.A. Kudrevich and G.M. Bokaya – for chemical and analytical testing of the samples.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Боронина А.С., Попов С.В., Пряхина Г.В. Гидрологическая характеристика озёр восточной части полуострова Брокнес, холмы Ларсеманн, Восточная Антарктида // *Лёд и Снег*. 2019. 59 (1). Р. 39–48. <https://doi.org/10.15356/2076-6734-2019-1-39-48>
- Голобокова Л.П., Ходжер Т.В., Шибяев Ю.А., Липенков В.Я., Пети Ж. Изменение химического состава приповерхностного снега в Восточной Антарктиде по мере удаления от побережья // *Лёд и Снег*. 2012. 52 (4). Р. 129–137. <https://doi.org/10.15356/2076-6734-2012-4-129-137>
- Какарека С.В., Кухарчик Т.И., Кокош Ю.Г., Саливончик С.В., Кудревич М.А., Гигиняк Ю.Г., Мямин В.Е., Лукашанец Д.А. Пространственные особенности химического состава снежного покрова Холмов Тала, Восточная Антарктида // *Проблемы Арктики и Антарктики*. 2021. Т. 67. Вып. 1. С. 28–43. <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2021-67-1-28-43>
- Какарека, С.В., Кухарчик Т.И., Кокош Ю.Г., Кудревич М.А., Гигиняк Ю.Г., Мямин В.Е. Основные гидрохимические характеристики антарктических озёр Холмов Тала // *Проблемы Арктики и Антарктики*. СПб.: ААНИИ, 2019. Т. 65. № 4. С. 422–437. <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2019-65-4-422-43>
- Матвеев А.А. Химический состав снега в Антарктиде по наблюдениям на профиле Мирный Восток // *Гидрохим. материалы*. Л.: ГИМИЗ. 1962. Т. 34. С. 3–11.
- Протокол по охране окружающей среды к Договору об Антарктике. Мадрид, 4 октября 1991 г. https://documents.ats.aq/recatt/Att006_r.pdf
- Скороспехова Т.В., Федорова И.В., Четверова А.А., Алексеева Н.К., Веркулич С.Р., Ежиков И.С., Козачек А.В. Особенности гидрохимического режима водных объектов полуострова Файлдс (о. Кинг-Джордж, Западная Антарктика) // *Проблемы Арктики и Антарктики*. 2016. № 2. С. 79–91.
- Смагин В.М. Химический состав атмосферных выпадений в районе обсерватории Мирный // *Проблемы Арктики и Антарктики*. 2007. Т. 76. С. 154–159.
- Филатов Н.Н., Георгиев А.П., Ефремова Т.В., Назарова Л.Е., Пальшин Н.И., Руховец Л.А., Толстиков А.В., Шаров А.Н. Влияние изменений климата на экосистемы озёр // *Вестник РФФИ*. 2013. № 2 (78). С. 43–50.
- Ali K., Sonbawane S., Chate D., Siingh D., Rao P., Safai P., Budhavant K. Chemistry of snow and lake water in Antarctic region // *Journ. of Earth System Science*. 2010. V. 119. № 6. P. 753–762.
- Asthana R., Shrivastava P.K., Srivastava H.B., Swain A.K., Beg M.J., Dharwadkar A. Role of lithology, weathering and precipitation on water chemistry of lakes from Larsemann Hills and Schirmacher Oasis of East Antarctica // *Advances in Polar Science*. 2019. V. 30. № 1. P. 35–51. <https://doi.org/10.13679/j.advps.2019.1.00035>
- Asthana R., Shrivastava P. K., Srivastava H. B., Mirza J., Kumar P. Hydrochemistry and sediment characteristics of polar periglacial lacustrine environments on Fisher Island and Broknes Peninsula, East Antarctica // *Advances in Polar Science*. 2013. V. 24. P. 281–295. <https://doi.org/10.3724/SP.J.1085.2013.00281>
- Bargagli R. Trace metals in Antarctica related to climate change and increasing human impact // *Review Environ. Contam. Toxicol.* 2000. V. 166. P. 129–173.

- Bertler N., Mayewski P.A., Aristarain A., Barrett P., Becagli S., Bernardo R., Bo S., Xiao C., Curran M., Qin D., Dixon D., Ferron F., Fischer H., Frey M., Frezzotti M., Fundel F., Genthon C., Gragnani R., Hamilton G., Handley M., Hong S., Isaksson E., Kang J., Ren J., Kamiyama K., Kanamori S., Karkas E., Karlof L., Kaspari S., Kreuz K., Kurbatov A., Meyerson E., Ming Y., Zhang M., Motoyama H., Mulvaney R., Oerter H., Osterberg E., Proposito M., Pyne A., Ruth U., Simoes J., Smith B., Sneed S., Teinila K., Traufetter F., Udasti R., Virkkula A., Watanabe O., Williamson B., Winther J.G., Li Y., Wolff E., Li Z., Zielinski A. Snow chemistry across Antarctica // *Annals of Glaciology*. 2005. V. 41. P. 167–179.
- Budhavant K.B., Rao P.S.P., Safai P.D. Chemical composition of snow-water and scavenging ratios over coastal Antarctica // *Aerosol Air Quality Research*. 2014. V. 14. № 3. P. 666–676.
<https://doi.org/10.4209/aaqr.2013.03.0104>
- Chester R., Jickells T. Marine geochemistry. Oxford: Blackwell Science, 2003.
<https://doi.org/10.1002/9781118349083>.
- Dixon D.A., Mayewski P.A., Korotkikh E., Sneed S.B., Handley M.J., Introne D.S., Scambos T.A. Variations in snow and firn chemistry along US ITASE traverses and the effect of surface glazing // *The Cryosphere*. 2013. V. 7. № 2. P. 515–535.
<https://doi.org/10.5194/tc-7-515-2013>
- Ellis-Evans J.C., Laybourn-Parry J., Bayliss P.R., Perriess S.J. Physical, chemical and microbial community characteristics of lakes of the Larsemann Hills, Continental Antarctica // *Archiv für Hydrobiologie*. 1998. 141. № 2. P. 209–230.
<https://doi.org/10.1127/archiv-hydrobiol/141/1998/209>
- Gasparon M., Burgess J.S. Human impact in Antarctica: trace element geochemistry of freshwater lakes in the Larsemann Hills, East Antarctica // *Intern. Journal of Geosciences Environmental Geology*. 2000. 39. № 9. P. 963–976. <https://doi.org/10.1007/s002549900010>
- Gasparon M., Lanyon R., Burgess J.S., Sigurdsson I.A. The freshwater lakes of the Larsemann Hills, East Antarctica: chemical characteristics of the water column // *ANARE Report*, 2002. V. 147. P. 1–28.
- Gillieson D.S., Burgess J., Spate A., Cochrane A. Atlas of the lakes of the Larsemann Hills, Princess Elizabeth Land, Antarctica. ANARE Research Notes. 1990. V. 74. 175 p.
- Kakareka S., Kukharchyk T., Kurman P. Major and trace elements content in freshwater lakes of Vecherny Oasis, Enderby Land, East Antarctica // *Environmental Pollution*. 2019. V. 255. Pt. 1.
<https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.113126>
- Kakareka S., Kukharchyk T., Kurman P. Study of trace elements in the surface snow for impact monitoring in Vecherny Oasis, East Antarctica // *Environ. Monit Assess.* 2020, V. 192. № 11. P. 725.
<https://doi.org/10.1007/s10661-020-08682-8>
- Kakareka S., Kukharchyk T., Kurman P. Chemical composition of natural waters at Broknes Peninsula, Larsemann Hills, Antarctica // *Advances in Polar Science*. 2023. V. 4. P. 318–340.
<https://doi.org/10.12429/j.advps.2023.0008>
- Khodzher T.V., Golobokova L.P., Shibaev Y.A., Lipenkov V.Y., Petit J.R. Spatial-temporal dynamics of chemical composition of surface snow in East Antarctica along the Progress station–Vostok station transect // *The Cryosphere*. 2014. V. 8. № 3. P. 931–939.
- Kiernan K., Gore D., Fink D., White D., McConnell A., Sigurdsson I. Deglaciation and weathering of Larsemann Hills, East Antarctica // *Antarctic Science*. 2009. V. 21. P. 373–382.
<https://doi.org/10.1017/S0954102009002028>
- Kumar P., Shokri M.R., Mehrotra I. Water quality: lakes of Schirmacher Oasis, Antarctica. Eighteenth Indian Expedition to Antarctica, Scientific Report, Department of Ocean Development. Technical Publication. 2002. № 16. P. 273–292.
- Nędzarek A., Tórz A., Podlasińska J. Ionic composition of terrestrial surface waters in Maritime Antarctic and the processes involved in formation // *Antarctic Science*. 2015. V. 27. № 2. P. 150–161.
<https://doi.org/10.1017/s0954102014000522>
- Pęcherzewski K. Air pollution and natural sedimentation from the atmosphere in the region of the Admiralty Bay (South Shetland Islands) // *Polish Polar Research*. 1987. V. 8. № 2. P. 145–151.
- Prendez M., Adriana Carrasco M. Elemental composition of surface waters in the Antarctic Peninsula and interactions with the environment // *Environ. Geochem. Health*. 2003. V. 25, P. 347.
<https://doi.org/10.1023/A:1024559809076>
- Sabbe K., Hodgson D.A., Verleyen E., Taton A., Willemotte A., Vanhoutte K., Vyverman W. Salinity, depth and the structure and composition of microbial mats in continental Antarctic Lakes // *Freshwater Biology*. 2004. V. 49. № 3. P. 296–319.
- Szumińska D., Potapowicz J., Szopińska M., Sebastian C., Falk U., Frankowski M., Polkowska Ż. Sources and composition of chemical pollution in Maritime Antarctica (King George Island), part 2: Organic and inorganic chemicals in snow cover at the Warszawa Icefield. // *Science of The Total Environment*, 2021. No. 796. P. 149054.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.149054>
- Thamban M., Laluraj C.M., Mahalinganathan K., Redkar B.L., Naik S.S., Shrivastava P.K. Glaciochemistry of surface snow from the Ingrid Christensen Coast, East Antarctica, and its environmental implications // *Antarctic Science*. 2010. V. 22. № 4. P. 435–441.
- Thamban M., Thakur R.C. Trace metal concentrations of surface snow from Ingrid Christensen Coast, East Antarctica—spatial variability and possible anthropogenic contributions // *Environmental monitoring*

- and assessment. 2013. V. 185. № 4. P. 2961–2975. <https://doi.org/10.1007/s10661-012-2764-0>
- Toro M., Camacho A., Rochera C., Rico E., Bacyn M., Fernandez-Valiente E., Marco E., Justel A., Averdaco M.C., Ariosa Y., Vincent W.F., Quesada A. Limnological characteristics of the freshwater ecosystems of Byers Peninsula, Livingston Island, in maritime Antarctica // *Polar Biology*. 2007. V. 30. P. 635–649. <https://doi.org/10.1007/s00300-006-0223-5>
- Tuohy A., Bertler N., Neff P., Edwards P., Emanuelsson D., Beers T., Mayewski, P. Transport and deposition of heavy metals in the Ross Sea Region, Antarctica // *Journ. of Geophys. Research: Atmospheres*. 2015. V. 120. № 20. P. 10996–11011. <https://doi.org/10.1002/2015JD023293>
- Wagenbach D., Ducroz F., Mulvaney R., Keck L., Minikin A., Legrand M., Hall J.S., Wolff E.W. Sea-salt aerosol in coastal Antarctic regions // *Journ. of Geophys. Research*. 1998. V. 103. № D9. P. 10961–10974.

Citation: Kakareka S.V., Kukharchyk T.I., Tarasenko S.Yu., Rabychyn K.O., Kokosh Yu.G., Kurman P.V. Hydrochemical characteristics of snow and lake waters of Antarctic oases in the areas of research stations. *Led i Sneg. Ice and Snow*. 2024, 64 (3): 431–446. [In Russian]. doi: 10.31857/S2076673424030095

Hydrochemical characteristics of snow and lake waters of Antarctic oases in the areas of research stations

S. V. Kakareka^{*,}, T. I. Kukharchyk^a, S. Yu. Tarasenko^b,
K. O. Rabychyn^a, Yu. G. Kokosh^a, P. V. Kurman^c

^a*Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus*

^b*Arctic and Antarctic Research Institute, St. Petersburg, Russia*

^c*Institute of Bioorganic Chemistry of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus*

*e-mail: sk001@yandex.ru

Received April 26, 2024 / Revised June 14, 2024 / Accepted July 8, 2024

The results of analysis of major, minor and trace elements in snow and lake waters collected in January – May 2023 within the areas of location of Russian and Belarusian research stations are presented. The samples of snow and surface waters on King George Island (Waterloo), Schirmacher, Molodezhny and Vecherny oases, Larsemann Hills, as well as the Banks of Pravda and Ingrid Christensen were collected. The concentrations of 25 macro- and microelements were determined using the ICP-MS method, and the main ions were determined by titro- and turbidimetric methods. The maximum concentration of sodium (14.95 mg/l) was detected in the snow cover near the Mirny station; here, its average concentration is the highest as compared to other stations (4.65 mg/l). The lowest sodium concentrations (0.30–0.41 mg/l) are characteristic of the snow cover in the Molodezhny Oasis. Among the minor and trace elements iron is dominated at the majority of stations. It is shown that the investigated lakes of the Larsemann Hills (Low, Reid and Stepped) are sodium chloride in composition, the Lake Kitezh on King George Island (Waterloo) is sulfate-chloride calcium-magnesium, the lakes in the Vecherny Oasis are hydrocarbonate-chloride sodium, and Lageroye Lake in the Molodezhny Oasis – chloride-hydrocarbonate magnesium-calcium. The revealed differences in the hydrochemical composition of snow and surface waters are conditioned by the distance from the coastline and protection from sea aerosols, as well as due to anthropogenic impact. The studies have shown that the snow and lakes of the coastal zones of the Larsemann Hills and the Pravda Coast in the vicinity of Mirny station are subject to the greatest impact of marine aerosols, and the least impact is the zone of the Schirmacher Oasis, most distant from the coast, near the Novolazarevskaya station. The importance of developing the research within the limits of one hydrological year aimed at estimating the inter-annual variability of hydrochemical parameters and revealing trends of changes with regard for various impact factors is shown.

Keywords: snow cover, lakes, scientific stations, Antarctica, Antarctic oasis, major elements, trace element

REFERENCES

- Boronina A.S., Popov S.V., Pryakhina G.V.* Hydrological characteristics of lakes in the eastern part of the Broknes Peninsula, Larsemann Hills, East Antarctica. *Led i Sneg. Ice and Snow*. 2019, 59 (1): 39–48. <https://doi.org/10.15356/2076-6734-2019-1-39-48> [In Russian]
- Golobokova L.P., Hodzher T.V., Shibaev Y.A., Lipenkov V.A., Petit J.* Chemical composition change of subsurface snow in East Antarctica with distance from the coast. *Led i Sneg. Ice and Snow*. 2012, 52 (4): 129–137. <https://doi.org/10.15356/2076-6734-2012-4-129-137> [In Russian].
- Kakareka S.V., Kukharchyk T.I., Kokosh Yu.G., Salivonchik S.V., Kudrevich M.A., Giginyak Y.G., Myamin V.E., Lukashanets D.A.* Spatial features of the chemical composition of Thala Hills surface snow, East Antarctica. *Problemy Arktiki i Antarktiki. Problems of Arctic and Antarctic*. 2021, 67 (1): 28–43. [In Russian] <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2021-67-1-28-43>
- Kakareka S.V., Kukharchyk T.I., Kokosh Yu.G., Kudrevich M.A., Giginyak Yu.G., Myamin V.E.* Chemical characteristics of antarctic lakes of the Thala Hills. *Problemy Arktiki i Antarktiki. Problems of the Arctic and Antarctic*. 2019, 65 (4): 422–437. [In Russian]. <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2019-65-4-422-437>
- Matveev A.A.* Chemical composition of snow in Antarctica according to observations on the Mirny Vostok profile. *Gidrokhimicheskiye materialy. Hydrochemical Materials*. 1962, 34: 3–11. [In Russian].
- Protocol on Environmental Protection to the Antarctic Treaty.* Madrid, October 4, 1991. https://documents.ats.aq/recatt/Att006_e.pdf
- Skorospekhova T.V., Fedorova I.V., Chetverova A.A., Alekseeva N.K., Verkulich S.R., Ezhikov I.S., Kozachek A.V.* Characteristic of hydrochemical regime on Fildes Peninsula (King George Island, West Antarctica). *Problemy Arktiki i Antarktiki. Problems of the Arctic and Antarctic*. 2016, 2: 79–91. [In Russian].
- Smagin M.V.* Chemical composition of atmospheric fallout in the observatory Mirny region. *Problemy Arktiki i Antarktiki. Problems of the Arctic and Antarctic*. 2007, 76: 154–159. [In Russian].
- Filatov N.N., Georgiev A.P., Efremova T.V., Nazarova L.E., Palshin N.I., Rukhovets L.A., Tolstikov A.V., Sharov A.N.* Impact of climate change on lake ecosystems. *Vestnik Rossijskogo fonda fundamental'nyh issledovanij. Bulletin of the Russian Foundation for Basic Research*. 2013, 2 (78): 43–50. [In Russian]
- Ali K., Sonbawane S., Chate D., Siingh D., Rao P., Safai P., Budhavant K.* Chemistry of snow and lake water in Antarctic region. *Journ. of Earth System Science*. 2010, 119 (6): 753–762.
- Asthana R., Shrivastava P.K., Srivastava H.B., Swain A.K., Beg M.J., Dharwadkar A.* Role of lithology, weathering and precipitation on water chemistry of lakes from Larsemann Hills and Schirmacher Oasis of East Antarctica. *Advances in Polar Science*. 2019, 30 (1): 35–51. <https://doi.org/10.13679/j.advps.2019.1.00035>
- Asthana R., Shrivastava P.K., Srivastava H.B., Mirza J., Kumar P.* Hydrochemistry and sediment characteristics of polar periglacial lacustrine environments on Fisher Island and Broknes Peninsula, East Antarctica. *Advances in Polar Science*. 2013, 24: 281–295. <https://doi.org/10.3724/SP.J.1085.2013.00281>
- Bargagli R.* Trace metals in Antarctica related to climate change and increasing human impact. *Rev Environ Contam Toxicol*. 2000, 166: 129–73.
- Bertler N., Mayewski P.A., Arístarain A., Barrett P., Becagli S., Bernardo R., Bo S., Xiao C., Curran M., Qin D., Dixon D., Ferron F., Fischer H., Frey M., Frezzotti M., Fundel F., Genthon C., Gragnani R., Hamilton G., Handley M., Hong S., Isaksson E., Kang J., Ren J., Kamiyama K., Kanamori S., Karkas E., Karlof L., Kaspari S., Kreutz K., Kurbatov A., Meyerson E., Ming Y., Zhang M., Motoyama H., Mulvaney R., Oerter H., Osterberg E., Proposito M., Pyne A., Ruth U., Simoes J., Smith B., Sneed S., Teinila K., Traufetter F., Udisti R., Virkkula A., Watanabe O., Williamson B., Winther J.G., Li Y., Wolff E., Li Z., Zielinski A.* Snow chemistry across Antarctica. *Annals of Glaciology*. 2005, 41: 167–179.
- Budhavant K.B., Rao P.S.P., Safai P.D.* Chemical composition of snow-water and scavenging ratios over coastal Antarctica. *Aerosol Air Quality Research*. 2014, 14 (3): 666–676. <https://doi.org/10.4209/aaqr.2013.03.0104>
- Chester R., Jickells T.* Marine geochemistry. Oxford: Blackwell Science, 2003. <https://doi.org/10.1002/9781118349083>
- Dixon D.A., Mayewski P.A., Korotkikh E., Sneed S.B., Handley M.J., Introne D.S., Scambos T.A.* Variations in snow and firn chemistry along US ITASE traverses and the effect of surface glazing. *The Cryosphere*. 2013, 7 (2): 515–535. <https://doi.org/10.5194/tc-7-515-2013>
- Ellis-Evans J.C., Laybourn-Parry J., Bayliss P.R., Perriess S.J.* Physical, chemical and microbial community characteristics of lakes of the Larsemann Hills, Continental Antarctica. *Archiv für Hydrobiologie*. 1998, 141 (2): 209–230. <https://doi.org/10.1127/archiv-hydrobiol/141/1998/209>
- Gasparon M., Burgess J.S.* Human impact in Antarctica: trace element geochemistry of freshwater lakes in the Larsemann Hills, East Antarctica. *Intern. Journal of Geosciences Environmental Geology*. 2000, 39 (9): 963–976. <https://doi.org/10.1007/s002549900010>
- Gasparon M., Lanyon R., Burgess J.S., Sigurdsson I.A.* The freshwater lakes of the Larsemann Hills, East Antarctica: chemical characteristics of the water column. ANARE Report. 2002, 147: 1–28.
- Gillieson D.S., Burgess J., Spate A., Cochrane A.* Atlas of the lakes of the Larsemann Hills, Princess Elizabeth

- Land, Antarctica. ANARE Research Notes 1990, 74: 175.
- Kakareka S., Kukharchyk T., Kurman P.* Major and trace elements content in freshwater lakes of Vecherny Oasis, Enderby Land, East Antarctica. *Environmental Pollution*. 2019, 255 (1).
<https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.113126>
- Kakareka S., Kukharchyk T., Kurman P.* Study of trace elements in the surface snow for impact monitoring in Vecherny Oasis, East Antarctica. *Environ Monit Assess.* 2020, 192 (11): 725.
<https://doi.org/10.1007/s10661-020-08682-8>
- Kakareka S., Kukharchyk T., Kurman P.* Chemical composition of natural waters at Broknes Peninsula, Larsemann Hills, Antarctica. *Advances in Polar Science*. 2023, (4): 318–340.
<https://doi.org/10.12429/j.advps.2023.0008>
- Khodzher T.V., Golobokova L.P., Shibaev Y.A., Lipenkov V.Y., Petit J.R.* Spatial – temporal dynamics of chemical composition of surface snow in East Antarctica along the Progress station–Vostok station transect. *The Cryosphere*. 2014, 8 (3): 931–939.
- Kiernan K., Gore D., Fink D., White D., McConnell A., Sigurdsson I.* Deglaciation and weathering of Larsemann Hills, East Antarctica. *Antarctic Science*. 2009, 21: 373–382. <https://doi.org/10.1017/S0954102009002028>
- Kumar P., Shokri M.R., Mehrotra I.* Water quality: lakes of Schirmacher Oasis, Antarctica. Eighteenth Indian Expedition to Antarctica, Scientific Report, Department of Ocean Development. Technical Publication. 2002, 16: 273–292.
- Neżzarek A., Tórz A., Podlasińska J.* Ionic composition of terrestrial surface waters in Maritime Antarctic and the processes involved in formation. *Antarctic Science*. 2015, 27 (2): 150–161,
<https://doi.org/10.1017/s0954102014000522>
- Pęcherzewski K.* Air pollution and natural sedimentation from the atmosphere in the region of the Admiralty Bay (South Shetland Islands). *Polish Polar Research*. 1987, 8 (2): 145–151.
- Prendez M., Adriana Carrasco M.* Elemental composition of surface waters in the Antarctic Peninsula and interactions with the environment. *Environ. Geochem. Health*. 2003, 25: 347–363.
<https://doi.org/10.1023/A:1024559809076>
- Sabbe K., Hodgson D.A., Verleyen E., Taton A., Wilmotte A., Vanhoutte K., Vyverman W.* Salinity, depth and the structure and composition of microbial mats in continental Antarctic Lakes. *Freshwater biology*, 2004, 49 (3): 296–319.
- Szumińska D., Potapowicz J., Szopińska M., Sebastian C., Falk U., Frankowski M., Polkowska Ż.* Sources and composition of chemical pollution in Maritime Antarctica (King George Island), part 2: Organic and inorganic chemicals in snow cover at the Warszawa Icefield. *Science of The Total Environment*, 2021, 796: 149054.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.149054>
- Thamban M., Laluraj C.M., Mahalinganathan K., Redkar B.L., Naik S.S., Shrivastava P.K.* Glaciochemistry of surface snow from the Ingrid Christensen Coast, East Antarctica, and its environmental implications. *Antarctic Science*. 2010, 22 (4): 435–441.
- Thamban M., Thakur R.C.* Trace metal concentrations of surface snow from Ingrid Christensen Coast, East Antarctica—spatial variability and possible anthropogenic contributions. *Environmental monitoring and assessment*. 2013, 185 (4): 2961–2975.
<https://doi.org/10.1007/s10661-012-2764-0>
- Toro M., Camacho A., Rochera C., Rico E., Bacyn M., Fernandez-Valiente E., Marco E., Justel A., Avenado M.C., Ariosa Y., Vincent W.F., Quesada A.* Limnological characteristics of the freshwater ecosystems of Byers Peninsula, Livingston Island, in maritime Antarctica. *Polar Biology*. 2007, 30: 635–649.
<https://doi.org/10.1007/s00300-006-0223-5>
- Tuohy A., Bertler N., Neff P., Edwards P., Emanuelsson D., Beers T., Mayewski, P.* Transport and deposition of heavy metals in the Ross Sea Region, Antarctica. *Journ. of Geophysical Research: Atmospheres*. 2015, 120 (20): 10996–11011.
<https://doi.org/10.1002/2015JD023293>
- Wagenbach D., Ducroz F., Mulvaney R., Keck L., Minikin A., Legrand M., Hall J.S., Wolff E.W.* Sea-salt aerosol in coastal Antarctic regions. *Journ. of Geophys. Research*. 1998, 103 (D9): 10961–10974.