

ГИДРОЛОГИЯ СУШИ И ГИДРОХИМИЯ HYDROLOGY OF LAND AND HYDROCHEMISTRY

<https://doi.org/10.30758/0555-2648-2021-67-1-28-43>
УДК 556.114:502.51(99)



ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

ORIGINAL ARTICLE

ПРОСТРАНСТВЕННЫЕ ОСОБЕННОСТИ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА СНЕЖНОГО ПОКРОВА ХОЛМОВ ТАЛА, ВОСТОЧНАЯ АНТАРКТИДА

С.В. КАКАРЕКА^{1*}, Т.И. КУХАРЧИК¹, Ю.Г. КОКОШ¹, С.В. САЛИВОНЧИК¹,
М.А. КУДРЕВИЧ¹, Ю.Г. ГИГИНЯК², В.Е. МЯМИН³, Д.А. ЛУКАШАНЕЦ²

¹ — Государственное научное учреждение «Институт природопользования
Национальной академии наук Беларуси», Минск, Республика Беларусь

² — Республиканский научно-практический центр по биоресурсам
Национальной академии наук Беларуси, Минск, Республика Беларусь

³ — Белорусский государственный университет, Минск, Республика Беларусь

*sk001@yandex.ru

Резюме

Статья посвящена пространственному анализу химического состава снежного покрова восточной части Холмов Тала (Земля Эндерби, Восточная Антарктида). Впервые на примере оазиса Вечерний детально охарактеризовано содержание основных ионов, величины рН и электропроводности для различных участков мониторинга, заложенных с учетом природных особенностей и антропогенного воздействия. Показано, что снеговые воды оазиса в период с 2012 по 2019 г. характеризовались как очень низкоминерализованные с диапазоном суммы ионов 1,04–57,3 мг/л (среднее — 7,4 мг/л), величины удельной электропроводности — 2,7–85,1 мСм/см (10,7 мСм/см); в 87 % случаев реакция среды снеговых вод оазиса характеризуется как слабокислая. Наиболее широким диапазоном измеренных концентраций хлоридов, сульфатов, ионов кальция и натрия характеризуются участки мониторинга, в пределах которых осуществлялась ранее и осуществляется в настоящее время хозяйственная деятельность. Полученные данные будут использованы для выявления трендов изменения химического состава снежного покрова в результате антропогенной деятельности и в связи с климатическими изменениями.

Ключевые слова: Антарктида, основные ионы, снежный покров, химический состав, Холмы Тала.

Для цитирования: *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. № 1. С. 28–43. <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2021-67-1-28-43>.

Поступила 28.10.2020

После переработки 18.12.2020

Принята 20.12.2020

SPATIAL FEATURES OF THE CHEMICAL COMPOSITION OF THALA HILLS SURFACE SNOW, EAST ANTARCTICA

SERGEY V. KAKAREKA^{1*}, TAMARA I. KUKHARCHYK¹, YULIYA G. KOKOSH¹, SVETLANA V. SALIVONCHYK¹, MARIA A. KUDREVICH¹, YURIY G. GIGINYAK², VLADISLAV E. MYAMIN³, DMITRY A. LUKASHANETS²

¹ — Institute for Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus

² — The Scientific and Practical Centre for Bioresources of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus

³ — Belarusian State University, Minsk, Belarus

*sk001@yandex.ru

Summary

Despite the great interest in the study of the chemical composition of the surface snow cover in Antarctica, the knowledge of the Enderby Land area remains extremely limited. In the Vecherny Oasis, where the construction of the Belarusian Antarctic Research Station has been carried out since 2015, the study of the chemical composition of the surface snow began in 2012 in preparation for the Comprehensive Environmental Evaluation. Its continuation is due to the need to assess the consequences of the construction and operation of the station in accordance with the requirements of the Antarctic Treaty Protocol on Environmental Protection.

Snow samples were taken from 2012 to 2019 during the seasonal Belarusian Antarctic expeditions. Sampling was carried out from the surface horizons, which characterize the annual snow fallout. Chemical analytical studies were performed using standard methods. A total of 144 samples of snow water were analyzed.

The aim of the study is to characterize the chemical composition of the surface snow of the Vecherny Oasis (and of the Thala Hills as a whole) to identify the areas of anthropogenic impact and trends in its change.

The data on the main ions content in the surface snow, the value of pH and electrical conductivity, as well as the variabilities of the main indicators are presented. It is shown that the snow water of the Vecherny Oasis is very low-mineralized, with the sum of ions in the range of 1,04–57,3 mg/l (average — 7,4 mg/l), the values of electrical conductivity — 2,7–85,1 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (10,7 $\mu\text{S}/\text{cm}$). The snow water in most cases is characterized as slightly acidic. The chemical composition of the snow water and its mineralization is determined mainly by the content of chlorides and sodium ions. The high variability of the indicators of snow water hydrochemical composition within the areas of former and current human activities, as well as the increased content of sulfate ions, is considered to be indicative of anthropogenic impact.

Keywords: Antarctica, chemical composition, main ions, surface snow, Thala Hills.

For Citation: 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*. Arctic and Antarctic Research. 2021, 67 (1): 28–43. [In Russian]. <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2021-67-1-28-43>

Received 28.10.2020

Revised 18.12.2021

Accepted 20.12.2020

ВВЕДЕНИЕ

Изучение химического состава снежного покрова Антарктики представляет значительный интерес для оценки интенсивности и трендов атмосферных выпадений, понимания процессов циркуляции воздушных масс, выявления источников поступления загрязняющих веществ, для реконструкции палеоклимата и экологических

обстановок прошлого. Преобладание твердых осадков на большей части территории континента, низкие температуры, незначительная зона абляции — эти и другие факторы повышают депонирующую способность снежного покрова и возможности индикации природных изменений и антропогенного воздействия на локальном и региональном уровнях.

Исследования состава свежевывапавшего снега, а также снежно-ледниковой толщи в Антарктиде развернулись с 1970-х гг. К настоящему времени накоплен значительный массив данных о содержании основных ионов и их соотношениях в пробах снеговых вод в различных районах Антарктики, в том числе станций Мирный [1, 2] и Восток [3, 4], Южного полюса [5, 6], оазиса Ширмахера [7], Земли Королевы Мод [8] и других. Особое внимание уделяется изучению снежного покрова с использованием региональных и трансконтинентальных профилей различной протяженности: в районе Земли Адели [5], Холмов Ларсеманн [9, 10], включая траверс ст. Прогресс–Восток [11, 12], Земли Принцессы Елизаветы [13], а также профилей, заложенных в рамках международного проекта ITASE [14, 15, 16]. Результаты исследований, в том числе обобщенные в работе [17], свидетельствуют о наличии общих закономерностей в отношении химического состава снежного покрова, проявляющихся в снижении содержания основных ионов в снеговых водах с удалением от побережья, доминирующем вкладе хлоридов и ионов натрия в химический состав, чрезвычайно широкой вариабельности основных показателей.

Что касается отдельных регионов и/или оазисов, то изученность их и обеспеченность информацией весьма неоднородна. В частности, крайне низкой пока остается изученность района Земли Эндерби, для которого имеются лишь единичные публикации, как, например, для станции Молодежная [18]. В оазисе Вечерний, где с 2015 г. осуществляется строительство Белорусской антарктической научной станции, изучение химического состава снежного покрова было начато в 2012 г. при подготовке Всесторонней оценки воздействия на окружающую среду (ВООС) [19]. Их продолжение после одобрения ВООС обусловлено необходимостью оценки последствий строительства и функционирования станции в соответствии с требованиями Протокола по охране окружающей среды к Договору об Антарктике.

Цель исследований — выявление пространственных особенностей химического состава снежного покрова оазиса Вечерний и вариабельности основных показателей для индикации зон антропогенного воздействия и тенденций его изменения.

МЕТОДЫ И ОБЪЕКТЫ

Общие сведения о районе исследования

Исследования выполнены в оазисе Вечерний, расположенном в восточной части Холмов Тала, Земля Эндерби, а также на прилегающем к оазису крае ледникового щита на расстоянии от 1 до 3,5 км от береговой линии.

Оазис Вечерний протянулся вдоль берега моря примерно на 8 км; его наибольшая ширина около 2 км. Высота поверхности колеблется от 40 м (озеро Нижнее) до 272 м (гора Вечерняя). Антарктический ледяной щит в этом районе постепенно поднимается, и его высота на расстоянии 3 км от берега моря составляет около 250 м.

Оазис относится к зоне абляции, характерной для прибрежной зоны Антарктики [20]. Интенсивность аккумуляции снега в прибрежной зоне Земли Эндерби оценивается в 20–40 г/см² [21]. Среднегодовая температура воздуха на ближайшей станции

Таблица 1

**Общие сведения об участках мониторинга снежного покрова в оазисе Вечерний
и на прилегающей части края ледникового купола**

Table 1

**General characteristics of the monitoring sites for surface snow in the Vecherny Oasis
and on the adjacent part of the ice sheet edge**

Номер участка	Местоположение и возможные источники	Расстояние от берега, км	Высота над уровнем моря, м	Количество точек мониторинга, ед.	Количество проб снега, ед.
I	Край ледникового купола; нет хозяйственной деятельности	1,5–3,8	200–255	4	19
II	Долина между гряды. Место размещения бывшей полевой базы с сохранившимися элементами инфраструктуры	0,22–0,55	43–84	11	65
III	Склон гряды. Место строительства Белорусской антарктической станции	0,55–0,75	75–152	7	37
IV	Гряда горы Вечерняя; ВПП, остатки инфраструктуры полевой базы	0,6–1,2	250–260	4	8
V	Сопка Рубин	0,15–0,24	75	2	5
VI	Мыс Гнездовой	0,2	50	1	1

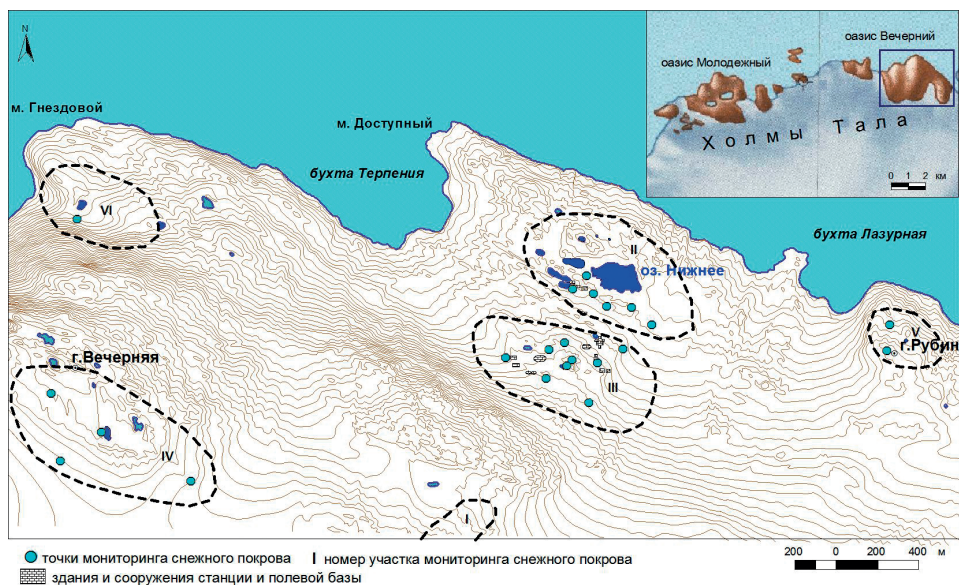


Рис. 1. Схема расположения точек и участков мониторинга снежного покрова оазиса Вечерний (участок I показан частично)

Fig. 1. Location of points and monitoring sites of the surface snow in the Vecherny Oasis (Site I is shown partially)

Молодежная, расположенной примерно в 20 км восточнее, составляет $-11\text{ }^{\circ}\text{C}$, среднегодовое количество осадков — 500 мм с диапазоном от 300 до 800 мм, средняя скорость ветра — 12,6 м/с [22].

Для отбора проб снега сформирована сеть мониторинга, которая заложена с учетом наличия снежников, а также потенциальных источников воздействия (площадки строительства станции, расположения сооружений бывшей полевой базы САЭ «Гора Вечерняя», места хранения топлива). С 2018 г. сеть мониторинга была расширена с включением сопки Рубин, мыса Гнездовой и склона гряды горы Вечерняя, где размещается взлетно-посадочная полоса. Всего заложено около 25 точек (площадок) мониторинга снежного покрова, которые характеризуют 6 природных (ландшафтных) участков, представляющих фоновые территории (участки I, V и VI) и территории, испытывающие антропогенные воздействия (участки II, III и IV). Общие сведения об участках мониторинга приведены в табл. 1; местоположение точек отбора снега — на рис. 1.

Методы отбора проб снега

Отбор проб снежного покрова проводился участниками сезонных 4-й (2011/12 г.), 5-й (2012/13 г.), 7-й (2014/15 г.), 8-й (2015/16 г.), 9-й (2016/17 г.), 10-й (2017/18 г.) и 11-й (2018/19 г.) Белорусских антарктических экспедиций (БАЭ).

Отбор проб снега осуществлялся в соответствии с [23, 24]. Отбирался рыхлый слой снега на глубину до 20 см. Предполагалось, что такой слой снега характеризует годовые выпадения. Из года в год соблюдался одинаковый порядок отбора, хранения и транспортировки проб.

Для отбора снега выбиралась площадка размером не менее 2×2 м, с которой отбиралась смешанная проба в нескольких точках для формирования общей пробы.

Пробы снежного покрова отбирались с помощью совка из нержавеющей стали. Перед отбором каждой пробы снега совок протирался чистой ветошью и очищался путем полного погружения в снег 2–3 раза рядом с площадкой отбора.

Пробы снега отбирались в чистые полиэтиленовые пакеты с застежкой, которые доставлялись на базу. Растапливание снега осуществлялось при комнатной температуре в закрытых пакетах во избежание перекрестного загрязнения. Объем отбираемой пробы должен был позволить получить объем воды не менее 1 л. Растопленная и нефильТРованная проба снега переливалась в пластиковые емкости объемом 0,5 л и/или 0,25 л, которые предварительно были вымыты и высушены перед отправкой в Антарктиду. Перед заполнением емкости ополаскивались растопленной водой. После заполнения емкости плотно закрывались и хранились в холодном месте при температуре не выше $4\text{ }^{\circ}\text{C}$ до доставки в Беларусь. Пробоподготовка и химико-аналитические исследования выполнены в аккредитованной лаборатории биогеохимии и агроэкологии Государственного научного учреждения «Институт природопользования Национальной академии наук Беларуси».

Химико-аналитические методы

Содержание хлоридов определялось 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), натрия и калия — методом пламенной фотометрии (МВИ.МН 2140-2004), кальция и магния — титриметрически (СТБ 17.13.05-46-2016) и методом атомно-абсорбционной спектроскопии, величина pH определялась потен-

циометрическим методом (СТБ ISO 10523-2009), удельная электропроводность — с использованием кондуктометра.

Всего за семь экспедиций в пределах оазиса Вечерний было отобрано и проанализировано 135 проб воды. В 2015 г. отбор проб снега осуществлен также в районе станции Молодежная (9 проб); результаты использованы для сравнения.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Общая характеристика гидрохимического состава снежного покрова оазиса

Согласно результатам исследований, снеговые воды оазиса Вечерний характеризуются низкой минерализацией и слабокислой реакцией среды: среднее значение удельной электропроводности составляет 10,7 $\mu\text{См}/\text{см}$ при диапазоне от 2,7 до 85,1 $\mu\text{См}/\text{см}$, суммы основных ионов — 7,4 мг/л (при диапазоне от 1,04 до 57,3 мг/л), средняя величина рН — 5,52 (3,64–6,88) (табл. 2).

Таблица 2

Основные гидрохимические показатели снежного покрова оазиса Вечерний и прилегающей части края ледникового купола, Холмы Тала, 2012–2019 гг. ($n = 135$)

Table 2

The main hydrochemical indicators of the surface snow of the Vecherny Oasis and the adjacent part of the ice sheet edge, Thala Hills, 2012–2019 ($n = 135$)

Показатель	Диапазон	Среднее \pm ст. ошибка	Коэффициент вариации, %
HCO_3^- , мг/л	н. о.–4,59	$1,64 \pm 0,11$	78
Cl^- , мг/л	0,55–30,2	$2,88 \pm 0,36$	143
SO_4^{2-} , S, мг/л	н. о.–1,18	$0,14 \pm 0,02$	136
Ca^{2+} , мг/л	н. о.–2,73	$0,39 \pm 0,04$	110
Mg^{2+} , мг/л	н. о.–1,58	$0,23 \pm 0,03$	158
Na^+ , мг/л	0,004–20,0	$1,44 \pm 0,24$	196
K^+ , мг/л	н. о.–1,20	$0,22 \pm 0,02$	104
Сумма ионов, мг/л	1,04–57,3	$7,37 \pm 0,69$	108
Величина рН	3,64–6,88	$5,52 \pm 0,05$	11
Удельная электропроводность, $\mu\text{См}/\text{см}$	2,70–85,1	$10,7 \pm 1,02$	110

Наибольший диапазон различий между максимальными и минимальными значениями зафиксирован для ионов натрия, магния и хлоридов: коэффициент вариации составляет соответственно 196, 158 и 143 %. Достаточно высок коэффициент вариации сульфатов — 136 %. Минимальным разбросом значений с коэффициентом вариации 78 % отличается содержание гидрокарбонатов.

Пространственные различия в содержании основных ионов и кислотности вод

Как показано выше, при отборе проб учитывались природные и антропогенные факторы, способные оказывать влияние на химический состав снежного покрова. В табл. 3 приведены основные гидрохимические показатели снежного покрова для обследованных участков, представляющих как фоновые территории (край ледникового купола, сопка Рубин и мыс Гнездовой), так и территории, подвергшиеся значительной трансформации в прошлом и испытывающие воздействие в настоящее время (участки II–IV).

Таблица 3
Table 3

Основные гидрохимические показатели снежного покрова участков мониторинга в оазисе Вечерний, Холмы Тала, 2012–2019 гг.
Main hydrochemical indicators of surface snow within monitoring sites in the Vecherny Oasis, Thala Hills, 2012–2019

Показатель	Участки мониторинга, количество проб												
	Участок 1, n = 19		Участок 2, n = 65		Участок 3, n = 37		Участок 4, n = 8		Участок 5, n = 5		Участок 6, n = 1		
	Диапазон	Среднее ± ст. ошибка	Диапазон	Среднее ± ст. ошибка	Диапазон	Среднее ± ст. ошибка	Диапазон	Среднее ± ст. ошибка	Диапазон	Среднее ± ст. ошибка	Диапазон	Среднее ± ст. ошибка	Наблюденное значение ¹
HCO ₃ ⁻ , мг/л	0,12–3,92	1,64 ± 0,11	н. о. –4,59	1,68 ± 0,16	н. о. –4,27	1,86 ± 0,21	0,24–1,05	0,55 ± 0,17	н. о. –0,61	0,32 ± 0,18	н. о. –0,61	0,32 ± 0,18	0,37
Cl ⁻ , мг/л	0,67–7,68	2,88 ± 0,36	0,55–30,2	3,06 ± 0,60	0,68–19,7	3,07 ± 0,68	1,30–5,12	2,93 ± 0,64	0,55–2,74	1,38 ± 0,47	0,55–2,74	1,38 ± 0,47	2,00
SO ₄ ²⁻ , S	н. о. –0,33	0,07 ± 0,03	н. о. –1,18	0,15 ± 0,03	н. о. –0,80	0,17 ± 0,03	н. о. –0,24	0,09 ± 0,03	н. о. –0,08	0,05 ± 0,02	н. о. –0,08	0,05 ± 0,02	0,47
Ca ²⁺ , мг/л	н. о. –1,20	0,39 ± 0,04	н. о. –2,73	0,38 ± 0,06	н. о. –1,80	0,44 ± 0,07	0,04–0,29	0,19 ± 0,06	nd		nd		nd
Mg ²⁺ , мг/л	н. о. –1,58	0,23 ± 0,03	н. о. –1,58	0,23 ± 0,04	н. о. –1,46	0,27 ± 0,07	0,01–0,24	0,12 ± 0,04	nd		nd		0,02
Na ⁺ , мг/л	0,11–3,90	1,44 ± 0,24	0,02–20,0	1,63 ± 0,41	0,004–13,0	1,53 ± 0,48	0,40–2,60	1,44 ± 0,39	0,11–1,72	0,56 ± 0,39	0,11–1,72	0,56 ± 0,39	0,70
K ⁺ , мг/л	н. о. –1,20	0,22 ± 0,02	н. о. –0,95	0,21 ± 0,03	н. о. –0,83	0,24 ± 0,04	0,05–0,45	0,26 ± 0,05	н. о. –0,25	0,15 ± 0,06	н. о. –0,25	0,15 ± 0,06	0,20
Сумма ионов, мг/л	1,20–17,9	6,05 ± 1,08	1,04–57,3	7,76 ± 1,14	1,9–38,3	8,22 ± 1,32	2,15–10,74	5,79 ± 1,48	1,85–5,01	3,08 ± 0,98	1,85–5,01	3,08 ± 0,98	4,70
Величина pH	4,60–6,33	5,52 ± 0,05	3,64–6,88	5,46 ± 0,08	3,76–6,73	5,58 ± 0,11	5,10–5,88	5,64 ± 0,11	4,06–5,99	5,37 ± 0,44	4,06–5,99	5,37 ± 0,44	5,84
Удельная электропроводность, мСм/см	2,70–25,9	10,70 ± 1,02	3,30–85,1	11,6 ± 1,67	3,10–59,6	11,43 ± 2,07	4,61–19,09	10,38 ± 1,96	4,10–7,98	5,32 ± 0,90	4,10–7,98	5,32 ± 0,90	7,15
Na/Cl	0,16–0,73	0,35 ± 0,04	0,03–1,90	0,45 ± 0,04	0,01–0,70	0,36 ± 0,03	0,27–0,56	0,45 ± 0,04	0,18–0,63	0,30 ± 0,11	0,18–0,63	0,30 ± 0,11	0,35

¹ — отбор выполнен в 2018 г.

Минимальные концентрации основных ионов, несмотря на близость моря, характерны для прибрежных участков в районах сопки Рубин и мыса Гнездовой, где величина удельной электропроводности составила соответственно 5,3 и 7,2 $\mu\text{См}/\text{см}$ (сумма ионов для данных участков не рассчитывалась, поскольку содержание ионов кальция и магния не определялось). Повышенные концентрации сульфат-ионов в пробе, отобранной в районе мыса Гнездовой (0,47 мг/л в пересчете на серу), могут быть обусловлены дополнительным их привносом от колонии пингвинов, насчитывающей около 4000 особей. О выделении соединений сульфатов из гуано пингвинов указано в работе [25]. Для сравнения: в пределах ледникового купола среднее содержание сульфат-ионов в пересчете на серу оценивается в 0,07 мг/л. Следует отметить, что в отношении мыса Гнездовой получены лишь первые данные и они не используются в дальнейшем для обсуждения результатов.

В снеговых водах края ледникового купола содержание основных ионов также невысоко (среднее значение суммы ионов — 6,0 мг/л). На очень низкую минерализацию снеговых вод указывают результаты определения удельной электропроводности — 10,7 $\mu\text{См}/\text{см}$. Характерны относительно низкие значения коэффициентов вариации указанных обобщающих показателей: для суммы ионов — 78 %, для величины удельной электропроводности — 76 %.

Низкими оказались концентрации основных ионов, а также величина удельной электропроводности на участке ВПП: среднее значение суммы ионов составило 5,97 мг/л, удельной электропроводности — 10,38 $\mu\text{См}/\text{см}$. По сути, основные показатели для данного участка сходны с показателями для края ледникового купола. Одним из возможных факторов такого сходства может быть примерно одинаковая высота над уровнем моря (около 250 м), которая существенно больше по сравнению с другими участками оазиса Вечерний. Оценить статистически роль данного фактора, как и расстояния, на примере оазиса пока не представляется возможным из-за недостаточных рядов наблюдений.

Повышенные концентрации основных ионов, а также удельной электропроводности характерны для участков, испытывающих антропогенные воздействия. При этом на фоне близких средних значений существенно различаются максимальные концентрации, расширяющие диапазоны значений.

Наиболее широким диапазоном измеренных концентраций хлоридов, сульфатов, ионов кальция и натрия характеризуются участки II и III, в пределах которых осуществлялась ранее и осуществляется сейчас хозяйственная деятельность. Несомненно, по сравнению с участком края ледникового купола, удаленного на расстояние от 1,5 до 3,8 км, указанные участки в большей степени подвержены воздействию морских аэрозолей. Однако увеличение содержания в снеговых водах ряда основных ионов может быть связано также с активизацией эрозионных процессов на бесснежных участках и дополнительным привносом терригенной пыли.

Сравнение содержания основных ионов в снеговых водах ледникового купола (участок I) и зон бывшей и нынешней хозяйственной деятельности (участки II и III) с помощью критерия Стьюдента показало, что при 5 %-м уровне значимости ($p < 0,05$) различия средних значений между выборками недостоверны. Статистически не подтверждены различия в величине рН и электропроводности. Достоверные различия выявлены лишь в отношении содержания сульфат-ионов между участками I (край ледникового купола) и III (площадка строительства станции): $t_{\text{стат}} = 2,04$ при

$t_{\text{крит}} = 2,00$). Источниками поступления сульфат-ионов могут быть как природные, так и антропогенные, к которым в первую очередь относятся стационарные и передвижные установки, сжигающие мазут.

Химический состав снеговых вод

Основной вклад в формирование химического состава снеговых вод оазиса Вечерний вносят ионы натрия и хлориды, что является следствием воздействия морских аэрозолей, показанное ранее также на примере пресноводных водоемов оазиса Вечерний [26]. Привнос морских солей и их осаждение на подстилающую поверхность происходит как в летнее время с океаническими брызгами, так и в зимнее

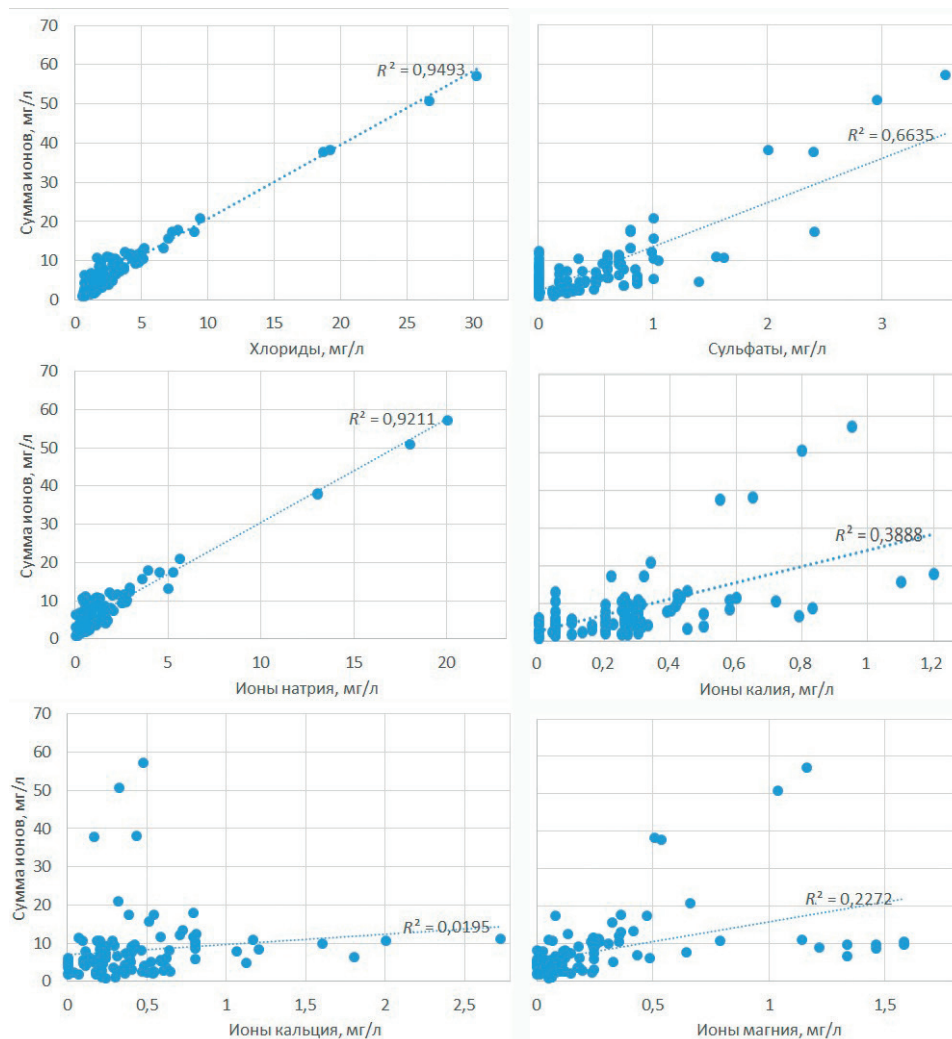


Рис. 2. Зависимость содержания суммы ионов от концентрации основных ионов в снеговой воде оазиса Вечерний и прилегающей части ледникового купола

Fig. 2. Dependence of the content of the sum of ions on the concentration of the main ions in the surface snow of the Vecherniy Oasis and the adjacent part of the ice sheet

время при образовании льда [13, 27]. В оазисе Вечерний в среднем на долю хлоридов приходится около 66 %-экв анионов, ионов натрия — 58 %-экв катионов, при этом их доминирующий вклад установлен более чем для 70 % проб. Вклад ионов магния в состав катионов, которые также имеют преимущественно морское происхождение, в среднем составляет около 11 %-экв, хотя для 12 % проанализированных проб их доля превышает 25 %-экв. На долю сульфат-ионов приходится в среднем 7,4 %-экв анионов; максимальные значения зафиксированы на уровне 27 %-экв. Доля ионов кальция и калия, которые имеют в основном литогенное происхождение, в среднем составляет 16 %-экв и 9 %-экв катионов соответственно. Повышенный вклад ионов кальция в химический состав снеговых вод (со значениями более 25 %-экв) отмечен примерно для 25 % проб, представляющих в основном участки II и III, где наиболее высока доля открытых участков.

На тесную зависимость общей минерализации снеговых вод от содержания хлоридов и ионов натрия указывают высокие значения коэффициента корреляции (R^2), составляющие соответственно 0,95 и 0,92 (рис. 2). Как средняя ($R^2 = 0,66$) оценивается связь между суммой ионов и содержанием сульфатов. Слабая связь между суммой ионов и содержанием калия ($R^2 = 0,39$) и магния ($R^2 = 0,22$). Что касается ионов кальция, то их содержание в снеговых водах не является определяющим для формирования общей минерализации.

Приведенные на рис. 2 данные также свидетельствуют о преобладании значений в области низких концентраций.

Влияние морских солей на химический состав снега оценивается по соотношению содержания ионов хлора к ионам натрия (Cl^-/Na^+), которое в прибрежных районах соответствует соотношению для морской соли и составляет около 2 по данным [17]. В оазисе Вечерний это соотношение составляет в среднем 3,41, с небольшими различиями между участками (от 2,40 в районе ВПП до 3,95 на мысе Рубин). Можно предположить, что расстояние от берега в пределах оазиса Вечерний, которое ограничивается максимальным расстоянием в 3 км, — лишь один из факторов, влияющий на вариабельность основных показателей. Вероятно, в данном случае большую роль играет топография местности, уклоны, направления и скорость ветров. По данным [9], в пределах Холмов Ларсеманн данный коэффициент варьировал от 1,05 до 4,7, и авторами высказано предположение о дополнительном привносе хлоридов с пылью терригенного происхождения.

Кислотность снеговых вод

Как показано выше, в среднем снеговые воды имеют слабокислую реакцию среды с величиной pH 5,52, близкой к равновесному значению незагрязненных атмосферных осадков (5,6–5,7). При этом в 87 % случаев реакция среды снеговых вод оазиса характеризуется как слабокислая. Вариабельность величины pH и смещение реакции среды в сторону подкисления или подщелачивания обусловлены общими процессами изменения минерализации снеговых вод и соотношения основных компонентов.

Выполненные исследования показали, что для всей совокупности выборки прослеживается определенная (слабая) связь величины pH с величиной удельной электропроводности и содержанием гидрокарбонат-ионов (для обоих случаев $R^2 = 0,16$). Не выявлено зависимости величины pH от содержания в снеговых водах ионов кальция и сульфат-ионов (рис. 3).

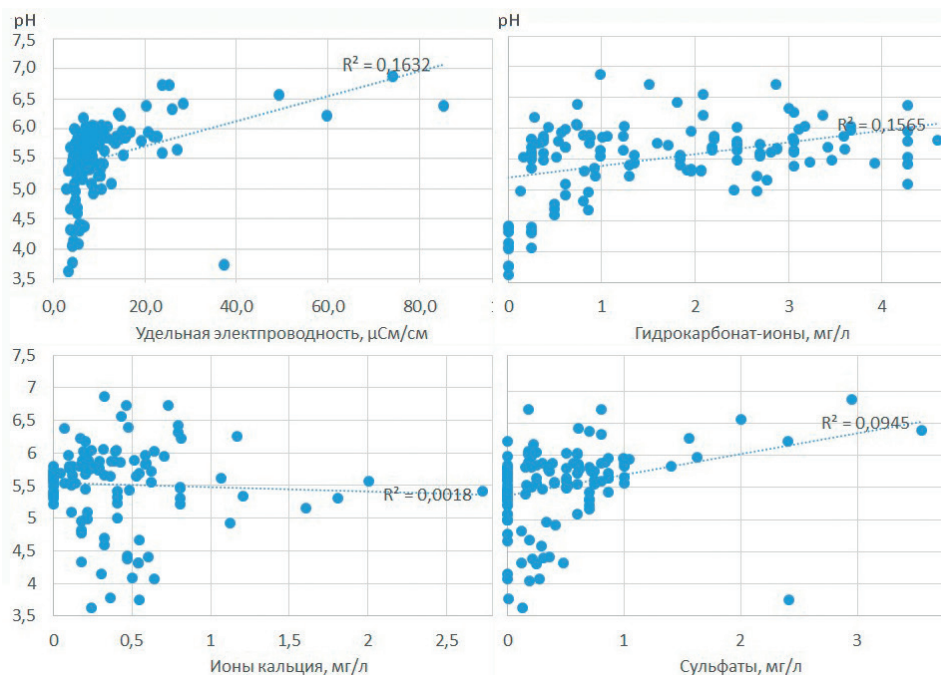


Рис. 3. Зависимость величины pH снеговых вод от удельной электропроводности и содержания основных ионов в оазисе Вечерний и прилегающей части ледникового купола

Fig. 3. Dependence of the pH value of snow water on the specific electrical conductivity and the content of the main ions in the Vecherniy Oasis and the adjacent part of the ice sheet

Сравнение с данными для других оазисов

Содержание основных ионов в снеговых водах оазиса Вечерний ниже по сравнению с ближайшим оазисом Молодежный, также входящим в Холмы Тала и расположенным на расстоянии около 20 км к западу. Например, содержание хлоридов, ионов натрия и магния — в 2–2,7 раза, ионов кальция — в 4,5 раза (табл. 4). Сравнение с оазисом Ширмахера свидетельствует о сходных уровнях содержания основных ионов. В оазисе Холмы Ларсеманн повышены концентрации сульфат-ионов и существенно ниже концентрации ионов кальция и калия. Различия, скорее всего, обусловлены различной интенсивностью влияния морских аэрозолей, скоростью и направлением ветра, площадью открытых участков и другим факторами.

В целом результаты химического состава снежного покрова оазиса Вечерний согласуются с другими данными и подтверждают общие закономерности, характерные для Антарктики, особенно в части, касающейся доминирующего вклада хлоридов и ионов натрия в химическом составе, а также вариабельности основных показателей. Что касается снижения содержания основных ионов с удалением от берега, то данная закономерность наиболее четко проявляется на больших расстояниях; заложенные профили, как правило, исчисляются сотнями и тысячами километров в глубь материка [8, 9, 11, 12, 13]. Минимальными концентрациями основных ионов характеризуются удаленные от морского побережья районы. Согласно [28], снижение содержания хлоридов и ионов натрия с удалением от берега происходит экспонен-

Таблица 4

**Сравнение содержания основных ионов в пробах снега
из различных оазисов Восточной Антарктиды**

Table 4

**Comparison of the content of major ions in the surface snow
of various oases of East Antarctica**

Показатель	Район исследований, годы (источник)			
	Оазис Вечерний, 2012– 2019 гг. (данные авторов)	Оазис Молодежный, 2015 г. (данные авторов)	Холмы Ларсеманн, 2009–2010 гг. [10]	Оазис Ширмахера, ст. Маитри, 2004–2005 гг. [7]
Cl ⁻ , мг/л	81	187	32,0–66,6	55,6
SO ₄ ²⁻ , S, мг S /л	9	11	11,8–23,0	31,2
Ca ²⁺ , мг/л	17	88	4,2–13,6	2,5
Mg ²⁺ , мг/л	16	38	7,93–18,9	15,0
Na ⁺ , мг/л	46	169	31,4–56,1	49,4
K ⁺ , мг/л	5	18	0,73–1,28	2,7
Величина pH	5,52	6,17	5,61–5,70	6,10
Удельная электропроводность, µСм/см	10,7	29,3	н. д.	н. д.

циально; относительно стабильные уровни содержания последних зафиксированы на расстоянии 200–1000 км. Исследования [15] показали, что содержание ионов морского происхождения (натрия, магния и хлоридов) уменьшается на 2 порядка величин на расстоянии 200 км. По данным [29], содержание компонентов морского происхождения снижается на 64 % на 100 км. Как было показано в работах [11, 12], влияние морских аэрозолей на химический состав снежного покрова сказывается на расстоянии до 500 км, хотя наиболее четко проявляется в прибрежной зоне.

Отдельной задачи проследить изменения содержания основных ионов с удалением от берега в оазисе Вечерний не ставилось, поскольку основные измерения выполнены на расстоянии до 1 км от берега. Тем не менее полученные значения для края ледникового купола и их относительно низкая вариабельность по сравнению с другими участками позволяют говорить о сохранении такой же тенденции.

Следует отметить, что методы исследований снежного покрова в Антарктике, включающие отбор проб и химико-аналитические исследования, а также временные интервалы исследований, используемые различными учеными, существенно различаются, что затрудняет сопоставление данных.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Впервые для оазиса Вечерний (Холмы Тала) получена детальная характеристика химического состава снежного покрова. Охарактеризована пространственная вариабельность основных показателей. Показано, что снеговые воды оазиса Вечерний являются очень низкоминерализованными с диапазоном суммы ионов в пределах 1,04–57,3 мг/л (среднее — 7,4 мг/л), величины удельной электропроводности — 2,7–85,1 µСм/см (10,7 µСм/см). Почти в 90 % случаев реакция среды снеговых вод характеризуется как слабокислая. Химический состав снеговых вод и их минера-

лизация определяется преимущественно содержанием хлоридов и ионов натрия. Высокая вариабельность показателей гидрохимического состава снеговых вод на участках бывшей и нынешней хозяйственной деятельности, а также повышенное содержание сульфат-ионов рассматриваются как индикаторы антропогенного воздействия. Установлено, что содержание основных ионов характеризуется значительной пространственной вариабельностью, несмотря на небольшие размеры оазиса.

Конфликт интересов. Отсутствует.

Финансирование. Работа выполнена в рамках Государственных программ «Мониторинг полярных районов Земли и обеспечение деятельности арктических и антарктических экспедиций на 2011–2015 годы» и «Мониторинг полярных районов Земли, создание Белорусской антарктической станции и обеспечение деятельности полярных экспедиций на 2016–2020 годы».

Благодарности. Авторы выражают благодарность начальнику белорусских антарктических экспедиций А.А. Гайдашову и всем участникам экспедиций за содействие и помощь в отборе и транспортировке проб.

Competing interests. No competing interest.

Funding. The study was conducted in the framework of the State Programs “Monitoring of the polar regions of the Earth and ensuring the activities of the Arctic and Antarctic expeditions for 2011–2015” and “Monitoring of the polar regions of the Earth, the creation of the Belarusian Antarctic station and ensuring the activities of polar expeditions for 2016–2020”.

Acknowledgments. The authors are grateful to the Head of Belarusian Antarctic Expeditions Alexei Haidashou and all participants of expeditions for their assistance and help in sampling and transportation of samples.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Матвеев А.А.* Химический состав снега в Антарктиде по наблюдениям на профиле Мирный Восток // Гидрохимические материалы. Л.: ГИМИЗ, 1962. Т. 34. С. 3–11.
2. *Смагин В.М.* Химический состав атмосферных выпадений в районе обсерватории Мирный // Проблемы Арктики и Антарктики. 2007. Т. 76. С. 154–159.
3. *Барков Н.И., Миклишанский А.З.* Геохимические исследования на станции Восток в 1970 г. // Бюллетень советской антарктической экспедиции. 1973. Т. 85. С. 35–38.
4. *Гладышева О.Г., Дмитриев П.Б., Барков Н.И., Екайкин А.А., Никонов В.В.* Содержание нитратов в снеге станции Восток, Антарктида // Геомагнетизм и аэрономия. 2003. Т. 43 (5). С. 713–717.
5. *Legrand M.R., Delmas R.J.* The ionic balance of Antarctic snow: a 10-year detailed record // Atmospheric Environment. 1984. Т. 18 (9). P. 1867–1874.
6. *Legrand M.* Chemistry of antarctic snow and ice // Journal de Physique Colloques. 1987. V. 48 (C1). P. 77–86. doi: 10.1051/jphyscol:1987111 jpa-00226251
7. *Ali K., Sonbawane S., Chate D., Siingh D., Rao P., Safai P., Budhavant K.* Chemistry of snow and lake water in Antarctic region // Journal of Earth System Science. 2010. V. 119 (6). P. 753–762.
8. *Stenberg M., Isaksson E., Hansson M., Karl'en W., Mayewski P.A., Twickler M.S., Whitelaw S.I., Gundestrup N.* Spatial variability of snow chemistry in western Dronning Maud Land, Antarctica // Ann. Glaciol. 1998. V. 27. P.378–384.
9. *Thamban M., Laluraj C., Mahalinganathan K., Redkar P., Naik S., Shrivastava P.* Glaciochemistry of surface snow from the Ingrid Christensen Coast, East Antarctica, and its environmental implications // Antarctic Science. 2010. V. 22 (04). P. 435–441. doi: 10.1017/S0954102010000155.

10. Budhavant K.B., Rao P.S.P., Safai P.D. Chemical composition of snow-water and scavenging ratios over coastal Antarctica // *Aerosol and Air Quality Research*. 2014. V. 14. P. 666–676.
11. Голобокова Л.П., Ходжер Т.В., Шибаяев Ю.А., Липенков В.Я., Пету Ж. Изменение химического состава приповерхностного снега в Восточной Антарктиде по мере удаления от побережья // *Лед и снег*. 2012. № 52 (4). P. 129–137. doi: 10.15356/2076-6734-2012-4-129-137.
12. 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.
13. Mahalinganathan K., Thamban M., Laluraj C.M., Redkar B.L. Relation between surface topography and sea-salt snow chemistry from Princess Elizabeth Land, East Antarctica // *The Cryosphere*. 2012. V. 6 (2). P. 505–515.
14. Becagli S., Proposito M., Benassai S., Flora O., Genoni L., Gragnani R., Largiuni O., Pili S.L., Severi M., Stenni B., Traversi R., Udisti R., Frezzotti M. Chemical and Isotopic Snow Variability in East Antarctica Along the 2001/02 ITASE Traverse // *Ann. Glaciol.* 2004. V. 39. P. 473–482.
15. Benassai S., Becagli S., Gragnani R., Magand O., Proposito M., Fattori I., Traversi R., Udisti R. Sea-spray deposition in Antarctic coastal and plateau areas from ITASE traverses // *Ann. Glaciol.* 2005. V. 41. P. 32–40. doi: 10.3189/172756405781813285.
16. 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.
17. Bertler N., Mayewski P.A., Aristarain A. et al. Snow chemistry across Antarctica // *Ann. Glaciol.* 2005. V. 41. P. 167–179.
18. MacNamara E.E. Some limnological observations from Enderby Land, Antarctica // *Limnol. Oceanograph*. 1970. V. 15. P. 768–775.
19. Kakareka S., Kukharchyk T., Loginov V., Salivonchyk S. Construction and operation of antarctic research stations. An Experience of Comprehensive Environmental Evaluation. Minsk: StroyMediaProekt, 2016. 278 p.
20. Петров В.Н. Атмосферное питание ледникового покрова Антарктиды. Л.: Гидрометеиздат, 1975. 150 с.
21. Котляков В.М. Гляциология Антарктиды // Избр. труды. Т. 1. М.: Наука, 2000. 433 с.
22. Molodyozhnaya Station. Data. URL: <http://www.aari.aq/data/data.asp?lang=0&station=4/> (дата обращения 14.12.2017).
23. РД52.04.186-89 Руководство по контролю загрязнения атмосферы. Госкомгидромет СССР, 1991. 696 с.
24. ТКП 17.13-15-2014 Охрана окружающей среды и природопользование. Аналитический (лабораторный) контроль и мониторинг окружающей среды. Порядок отбора проб атмосферного воздуха, атмосферных осадков и снежного покрова для определения концентраций загрязняющих веществ и метеорологические наблюдения. Утв. пост. Министерства природных ресурсов и охраны окружающей среды Республики Беларусь от 27 ноября 2014 г. № 10-Т. Минск: Минприроды, 2014. 16 с.
25. Xie Z.-Q., Sun L.-G., Wang J., Liu B.-Z. A potential source of atmospheric sulfur from penguin colony emissions // *Journal of Geophysical Research Atmospheres*. 2002. 107 (D22). doi: 10.1029/2002JD002114.
26. Какарека С.В., Кухарчик Т.И., Кокош Ю.Г., Кудревич М.А., Гигиняк Ю.Г., Мямин В.Е. Основные гидрохимические характеристики антарктических озер Холмов Тала // *Проблемы Арктики и Антарктики*. 2019. Т. 65 (4). P. 422–437. doi: 10.30758/0555-2648-2019-65-4-422-437.
27. Wagenbach D., Ducroz F., Mulvaney R., Keck L., Minikin A., Legrand M., Hall J., Wolff E. Sea-salt aerosol in coastal Antarctic regions // *J. Geophys. Res.* 1998. V. 103. P. 10961–10974.

28. Suzuki T., Izuka Yo., Furukawa T., Matsuoka K., Kamiyama K., Watanabe O. Spatial variability of chemical tracers in surface snow along the traverse route from the coast to 1000 km inland at east Dronning Maud Land, Antarctica // Chinese Journal of Polar Science. 2003. V. 14 (1). P. 48–56.
29. Kärkäs E., Kimmo T., Virkkulab A., Aurel M. Spatial variations of surface snow chemistry during two austral summers in western Dronning Maud Land, Antarctica // Atmospheric Environment. 2005. V. 39 (8). P. 1405–1416.

REFERENCES

1. 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].
2. Smagin M.V. Chemical composition of atmospheric fallout in the observatory Mirny region. *Problemy Arktiki i Antarktiki*. Arctic and Antarctic Research. 2007, 76: 154–159. [In Russian].
3. Barkov N.I., Miklishansky A.Z. Geochemical studies at Vostok station in 1970. *Byulleten' sovetskoy antarkticheskoy ekspeditsii*. Bulletin of the Soviet Antarctic Expedition. 1973, 85: 35–38. [In Russian].
4. Gladysheva O.G., Dmitriyev P.B., Barkov N.I., Ekaikin A.A., Nikonov V.V. Nitrate content of snow at Vostok station, Antarctica. *Geomagnetizm i aeronomiya*. Geomagnetism and Aeronomy. 2003, 43 (5): 713–717. [In Russian].
5. Legrand M.R., Delmas R.J. The ionic balance of Antarctic snow: a 10-year detailed record. *Atmospheric Environment*. 1984, 18 (9): 1867–1874.
6. Legrand M. Chemistry of antarctic snow and ice. *Journal de Physique Colloques*. 1987, 48 (C1): 77–86. doi: 10.1051/jphyscol:1987111 jpa-00226251
7. Ali K., Sonbawane S., Chate D., Siingh D., Rao P., Safai P., Budhavant K. Chemistry of snow and lake water in Antarctic region. *Journal of Earth System Science*. 2010, 119 (6): 753–762.
8. Stenberg M., Isaksson E., Hansson M., Karl'en W., Mayewski P.A., Twickler M.S., Whitelow S.I., Gundestrup N. Spatial variability of snow chemistry in western Dronning Maud Land, Antarctica. *Ann. Glaciol*. 1998, 27: 378–384.
9. Thamban M., Laluraj C., Mahalinganathan K., Redkar P., Naik S., Shrivastava P. Glaciochemistry of surface snow from the Ingrid Christensen Coast, East Antarctica, and its environmental implications. *Antarctic Science*. 2010, 22 (04): 435–441. doi: 10.1017/S0954102010000155.
10. Budhavant K.B., Rao P.S.P., Safai P.D. Chemical composition of snow-water and scavenging ratios over costal Antarctica. *Aerosol and Air Quality Research*. 2014, 14: 666–676.
11. 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. doi: 10.15356/2076-6734-2012-4-129-137. [In Russian].
12. 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.
13. Mahalinganathan K., Thamban M., Laluraj C.M., Redkar B.L. Relation between surface topography and sea-salt snow chemistry from Princess Elizabeth Land, East Antarctica. *The Cryosphere*. 2012, 6 (2): 505–515.
14. Becagli S., Proposito M., Benassai S., Flora O., Genoni L., Gragnani R., Largiuni O., Pili S.L., Severi M., Stenni B., Traversi R., Udisti R., Frezzotti M. Chemical and Isotopic Snow Variability in East Antarctica Along the 2001/02 ITASE Traverse. *Ann. Glaciol*. 2004, 39: 473–482.
15. Benassai S., Becagli S., Gragnani R., Magand O., Proposito M., Fattori I., Traversi R., Udisti R. Sea-spray deposition in Antarctic coastal and plateau areas from ITASE traverses. *Annals of Glaciology*. 2005, 41: 32–40. doi: 10.3189/172756405781813285.

16. 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.
17. Bertler N., Mayewski P.A., Aristarain A. *et al.* Snow chemistry across Antarctica. *Ann. Glaciol.* 2005, 41: 167–179.
18. MacNamara E.E. Some limnological observations from Enderby Land, Antarctica. *Limnol. Oceanograph*. 1970, 15: 768–775.
19. Kakareka S., Kukharchyk T., Loginov V., Salivonchik S. Construction and operation of antarctic research stations. An Experience of Comprehensive Environmental Evaluation. Minsk: StroyMediaProekt, 2016: 278 p.
20. Petrov V.N. *Atmosfernoe pitanie lednikovogo pokrova Antarktidi*. Atmospheric nutrition of the glacial cover of Antarctica. Leningrad: Hidrometeoizdat, 1975: 150 p. [In Russian].
21. Kotlyakov V.M. *Gliatsiologiya Antarktidi*. Glaciology of Antarctica. Selected Works. V. 1. Moscow: Science, 2000: 433 p. [In Russian].
22. Molodyozhnaya Station. Data. Available at: <http://www.aari.aq/data/data.asp?lang=0&station=4> (accessed 14.12.2017).
23. RD 52.04.186-89 *Rukovodstvo po kontroliu zagriazneniia atmosfery*. Guidelines for the control of air pollution. Goskomgidromet USSR, 1991. 696 p. [In Russian].
24. TCP 17.13-15-2014 *Okhrana okruzhaiushchei sredy i prirodopol'zovanie. Analiticheskii (laboratornyi) kontrol' i monitoring okruzhaiushchei sredy. Poriadok otbora prob atmosferного vozdukha, atmosferykh osadkov i snezhnogo pokrova dlia opredeleniia kontsentratsii zagriazniaiushchikh veshchestv i meteorologicheskikh nabludeniia. Utv. post. Ministerstva prirodnykh resursov i okhrany okruzhaiushchei sredy Respubliki Belarus' ot 27 noiabria 2014 g.* Environmental protection and use of natural resources. Analytical (laboratory) control and monitoring of the environment. The procedure for sampling atmospheric air, atmospheric precipitation and snow cover to determine the concentration of pollutants and meteorological observations. Minsk: Minprirody, 2014. 16 c. [In Russian].
25. Xie Z.-Q., Sun L.-G., Wang J., Liu B.-Z. A potential source of atmospheric sulfur from penguin colony emissions. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*. 2002, 107 (D22). doi: 10.1029/2002JD002114.
26. Kakareka S., Kukharchyk T., Kokosh Y., Kudrevich M., Giginyak Yu., Myamin V. Hydrochemical properties of antarctic lakes of Thala hills. *Problemy Arktiki i Antarktiki*. Arctic and Antarctic Research. 2019, 65 (4): 422–437. [In Russian]. doi: 10.30758/0555-2648-2019-65-4-422-437.
27. Wagenbach D., Ducroz F., Mulvaney R., Keck L., Minikin A., Legrand M., Hall J., Wolff E. Sea-salt aerosol in coastal Antarctic regions. *J. Geophys. Res.* 1998, 103: 10961–10974.
28. Suzuki T., Iizuka Yo., Furukawa T., Matsuoka K., Kamiyama K., Watanabe O. Spatial variability of chemical tracers in surface snow along the traverse route from the coast to 1000 km inland at east Dronning Maud Land, Antarctica. *Chinese Journal of Polar Science*. 2003, 14 (1): 48–56.
29. Kärkäs E., Kimmo T., Virkkulab A., Aurel M. Spatial variations of surface snow chemistry during two austral summers in western Dronning Maud Land, Antarctica. *Atmospheric Environment*. 2005, 39 (8): 1405–1416.