

ISSN 1561-8323 (Print)
ISSN 2524-2431 (Online)

УДК 551.5
<https://doi.org/10.29235/1561-8323-2021-65-4-495-502>

Поступило в редакцию 01.06.2021
Received 01.06.2021

С. В. Какарека¹, Т. И. Кухарчик¹, А. А. Екайкин^{2,3}, Ю. Г. Гигиняк⁴

¹Институт природопользования Национальной академии наук Беларуси, Минск, Республика Беларусь

²Государственный научный центр Российской Федерации «Арктический и антарктический научно-исследовательский институт», Санкт-Петербург, Российская Федерация

³Институт наук о Земле, Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Российская Федерация

⁴Республиканский научно-практический центр по биоресурсам Национальной академии наук Беларуси, Минск, Республика Беларусь

СТАБИЛЬНЫЕ ИЗОТОПЫ В СНЕГЕ ПРИБРЕЖНЫХ РАЙОНОВ АНТАРКТИДЫ

(Представлено академиком В. Ф. Логиновым)

Аннотация. Приведены первые результаты изучения стабильных изотопов кислорода ($\delta^{18}\text{O}$) и водорода (δD) в пробах снега, отобранных на островах залива Маргерит (Антарктический полуостров), в оазисе Вечерний (Земля Эндерби) и Холмах Ларсеманн (Земля Принцессы Елизаветы) участниками 12-й Белорусской антарктической экспедиции (январь–март 2020 г.). Концентрация изотопов воды: дейтерия (D) и кислорода-18 (^{18}O) в пробах определялась с помощью лазерного анализатора изотопного состава Picarro L2130. Всего проанализировано 32 пробы снега. Оценены статистические параметры изотопного состава снега, показаны основные различия в содержании $\delta^{18}\text{O}$ и δD между районами исследования. Показано уменьшение содержания тяжелых изотопов кислорода и водорода в ряду от свежеснежавшего снега к лежалому снегу поверхностных горизонтов. Максимальные значения $\delta^{18}\text{O}$ и δD характерны для снега островной части Западной Антарктики, они убывают в прибрежной зоне Восточной Антарктиды и минимальны во внутриконтинентальных ее районах. Описаны возможные факторы, влияющие на содержание изотопов. Показано, что мониторинг изотопного состава может быть составной частью мониторинга климатических изменений в районе базирования Белорусской антарктической экспедиции. Изучение изотопного состава современного снега важно для реконструкции палеоклимата краевой зоны антарктического ледникового щита на основе ледяных кернов.

Ключевые слова: изотопы кислорода, изотопы водорода, снег, залив Маргерит, оазис Вечерний, Холмы Ларсеманн

Для цитирования. Стабильные изотопы в снеге прибрежных районов Антарктиды / С. В. Какарека [и др.] // Докл. Нац. акад. наук Беларуси. – 2021. – Т. 65, № 4. – С. 495–502. <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2021-65-4-495-502>

Sergey V. Kakareka¹, Tamara I. Kukharchyk¹, Aleksey A. Ekaykin^{2,3}, Yury G. Giginyak⁴

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

²State Scientific Center of the Russian Federation Arctic and Antarctic Research Institute, Saint Petersburg, Russian Federation

³Saint Petersburg State University, Institute of Earth Sciences, Saint Petersburg, Russian Federation

⁴Scientific and Practical Centre for Bioresources of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic of Belarus

STABLE ISOTOPES IN THE SNOW OF THE COASTAL AREAS OF ANTARCTICA

(Communicated by Academician Vladimir F. Loginov)

Abstract. The first results of study of stable isotopes of oxygen ($\delta^{18}\text{O}$) and hydrogen (δD) in the snow samples taken on the islands of Marguerite Bay (Antarctic Peninsula), in the Vecherny Oasis (Enderby Land), and Larsemann Hills (Princess Elizabeth Land) by the participants of the 12th Belarusian Antarctic Expedition (January–March 2020) are presented. The concentration of water isotopes: deuterium (D) and oxygen-18 (^{18}O) in the samples was determined using a laser isotope composition analyzer Picarro L2130. A total of 32 snow samples were analyzed. The statistical parameters of the isotopic composition of snow were estimated, and the main differences in the content of $\delta^{18}\text{O}$ and δD between the study areas were shown. A decrease in the content of heavy oxygen and hydrogen isotopes in the newly fallen snow to the old snow of the surface horizons is shown. The maximum values of $\delta^{18}\text{O}$ and δD are typical for the Maritime Antarctica, decreasing towards the coastal zone and further – towards its continental part. The possible factors affecting the isotope content are described. It is shown that the monitoring of the isotope composition can be an integral part of the monitoring of climatic changes within

the area of operation of the Belarusian Antarctic Expedition. The study of the isotopic composition of surface snow is important for the reconstruction of the paleoclimate of the marginal zone of the Antarctic ice sheet based on the ice cores study.

Keywords: Antarctica, Marguerite Bay, Oasis Vecherny, Larsemann Hills, snow, oxygen isotopes, hydrogen isotopes

For citation. Kakareka S. V., Kukharchyk T. I., Ekaykin A. A., Giginyak Yu. G. Stable isotopes in the snow of the coastal areas of Antarctica. *Doklady Natsional'noi akademii nauk Belarusi = Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus*, 2021, vol. 65, no. 4, pp. 495–502 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2021-65-4-495-502>

Введение. Получение данных об изотопном составе природных вод Антарктики, широко используемых для палео- и гляциоклиматических реконструкций, – одна из важнейших задач современных исследований [1; 2]. Зависимости между содержанием стабильных изотопов кислорода и водорода в атмосферных осадках и температурой воздуха, положенные в основу изотопно-температурного метода, позволяют восстановить климат прошлых эпох по данным антарктических ледяных кернов [1; 3]. Самые длинные климатические ряды с восстановленной температурой воздуха за 420, 720 и 810 тыс. лет получены для ст. Восток, Купола F и станции Конкордия соответственно [4–6]. К настоящему времени наиболее изучена континентальная часть Антарктиды, представляющая особый интерес с точки зрения получения архивированных в ледяных отложениях данных; обобщения накопленных данных и их визуализация для континента в целом представлены в [3; 7–9].

В отношении прибрежных районов Антарктики и ее островной части измерений значительно меньше и касаются они поверхностных отложений снега, например, для оазиса Ларсеманн [10] или относительно неглубоких кернов, как для острова Кинг-Джордж [11]. Важность исследований в таких районах обусловлена необходимостью получения данных о вариабельности содержания стабильных изотопов кислорода и водорода в снеговых водах для определения «помех» и «шумов» при интерпретации данных [1; 12; 13]. Несмотря на установленные линейные зависимости изотопного состава воды и температуры воздуха, на практике имеют место различные отклонения и вариации в содержании изотопов, обусловленные как исходными факторами формирования атмосферных осадков, так и траекториями движения воздушных масс, и условиями фракционирования изотопов. Помимо этого, переотложение снега и последующие процессы его трансформации в фирн и лед сопровождаются также определенными изменениями состава изотопов [9; 14]. Изучение изотопного состава снега важно в связи с современными процессами потепления климата, что проявляется в районе Антарктического полуострова [15].

В связи с этим получение новых данных и расширение географии изучения изотопного состава снеговых вод представляется актуальным.

Материалы и методы исследования. *Объекты исследований.* Пробы снега отбирались на островах Хоршшу и Дисмал (залив Маргерит, Антарктический полуостров), в оазисе Вечерний (Земля Эндерби) и в оазисе Холмы Ларсеманн (Земля Принцессы Елизаветы) участниками 12-й Белорусской антарктической экспедиции в летний сезон 2019/2020 гг. Проанализированы также пробы с Восточно-антарктического ледяного щита в районе станции Восток, отобранные в ходе санно-гусеничного похода сезона 65-й Российской антарктической экспедиции (2019/2020 гг.).

Отбирался преимущественно свежеснеговывающий снег; дополнительно в ряде случаев отбирались пробы лежалого снега.

Характеристика местоположения отобранных проб и условий отбора приведены в табл. 1.

Отбор проб снега. Отбор проб снега осуществлялся в соответствии с Инструкцией по отбору образцов природных вод для анализа изотопного состава [1]. Снег отбирался в пластиковые контейнеры емкостью 100 и 50 мл, которые герметично закупоривались.

На островах в заливе Маргерит отобрано и проанализировано 16 проб (свежий снег – 13 проб, снег лежалый – 3 пробы) и одна проба отобрана на борту судна при его прохождении пролива Гулле. В оазисе Вечернем отобрано и проанализировано 5 проб свежего снега, с Холмов Ларсеманн – 6 проб свежего снега и 1 – лежалого. Проанализированы также две пробы снега, доставленные со станции Восток.

Расположение мест отбора снега приведено на рис. 1.

Т а б л и ц а 1. Характеристика места и условий отбора проб снега
 Table 1. Characteristics of the location and conditions of snow sampling

Район Region	Место отбора Place of sampling	Тип пробы, глубина, см (кол-во) Type of sample, depth, cm (number)	Дата отбора Date of sampling	Температура воздуха, °С Air temperature, °C
Залив Маргерит, Антарктический п-ов	о. Хоршшу	Снег лежалый, 0–4 см (3)	21.02.2020	2,1
			25.02.2020	1,7
			22.02.2020	1,3
		Снег свежий (12)	25.02.2020	1,7
			26.02.2020	0,6
			27.02.2020	–0,1
02.03.2020	0,4			
о. Дисмал (арх. Форо)	Снег свежий (1)	03.03.2020	0,4	
Пролив Гулле, Антарктический п-ов	Палуба судна, к СЗ от острова Хансен	Снег свежий (1)	03.03.2020	0,4
Холмы Тала, Земля Эндерби	Оазис Вечерний	Снег свежий (5)	13.02.2020	0,4
			13.03.2020	–5,1
			25.03.2020	–4,3
Земля Принцессы Елизаветы, Холмы Ларсеманн	Район станции Прогресс	Снег свежий (6)	21.12.2019	
			29.01.2020	
			01.02.2020	
			11.02.2020	
			29.02.2020	
04.03.2020				
Возле оз. Степед	Снег лежалый, 0–15 (1)	07.01.2020		
Восточно-антарктический ледяной щит	Район ст. Восток	Снег лежалый, 0–50 (2)	02.2020	

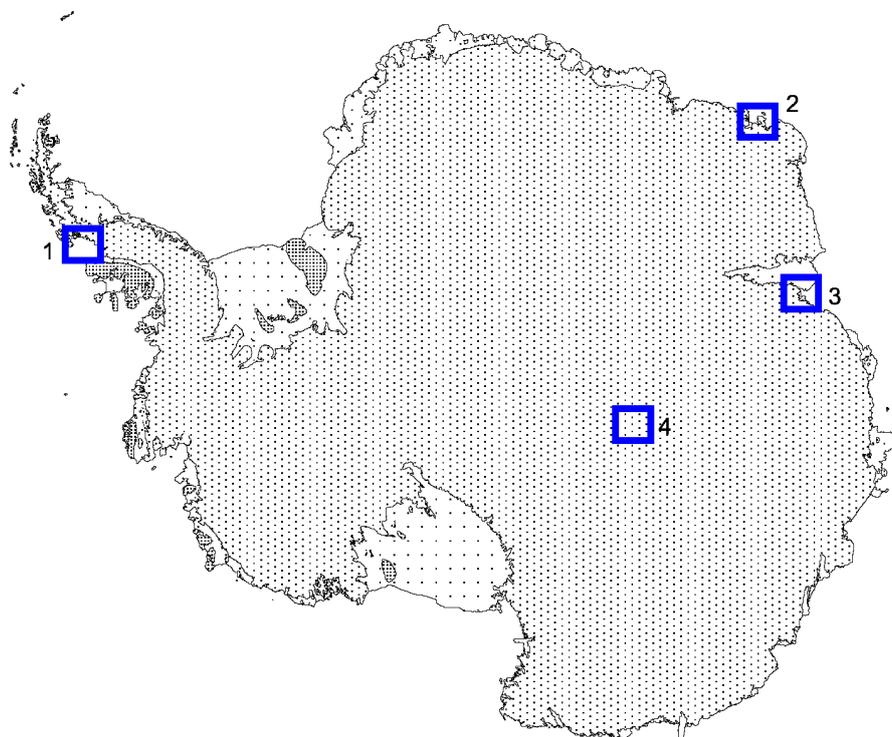


Рис. 1. Места размещения точек отбора снега для анализа изотопного состава:
 1 – залив Маргерит, 2 – оазис Вечерний, 3 – Холмы Ларсеманн, 4 – станция Восток

Fig. 1. Locations of sampling areas for snow isotopic analysis: 1 – Marguerite Bay, 2 – Vecherny Oasis, 3 – Larsemann Hills, 4 – Vostok station

Снег до анализа хранился в замороженном состоянии в морозильнике при температуре $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Методика лабораторных измерений изотопного состава воды. Концентрация изотопов воды: дейтерия (D) и кислорода-18 (^{18}O) в пробах определялась в Лаборатории изменений климата и окружающей среды ФБГУ «Институт Арктики и Антарктики (г. Санкт-Петербург) с помощью лазерного анализатора изотопного состава Picarro L2130. Для выполнения калибровки использовались три изотопных стандарта МАГАТЭ (VSMOW-2, GISP и SLAP-2), для которых известны «истинные» значения изотопного состава, а также три рабочих стандарта лаборатории.

Изотопный состав образца относительно SMOW выражается в промилле, используя следующую формулу [1]:

$$\delta = ((R_{\text{обр}} - R_{\text{ст}}) / R_{\text{ст}})1000,$$

где δ – δD , $\delta^{18}\text{O}$ либо $\delta^{17}\text{O}$ соответственно; $R_{\text{обр}}$ и $R_{\text{ст}}$ – абсолютная концентрация дейтерия, кислорода-18 либо кислорода-17 в образце и стандарте SMOW соответственно.

Всего проанализирована 31 проба снега.

Результаты и их обсуждение. Замеренное содержание изотопов $\delta^{18}\text{O}$ и δD в пробах снега приведено в табл. 2.

Т а б л и ц а 2. Содержание стабильных изотопов кислорода ($\delta^{18}\text{O}$) и водорода (δD) в пробах снега, ‰

Table 2. Content of stable isotopes of oxygen ($\delta^{18}\text{O}$) and hydrogen (δD) in snow samples, ‰

Место отбора Sampling location	Тип пробы (количество) Sample type (amount)	$\delta^{18}\text{O}$			δD		
		Мин Min	Мак Max	Среднее Average	Мин Min	Мак Max	Среднее Average
Остров Хоршшу	Снег, 0–4 см (3)	–15,0	–14,3	–14,7	–116,2	–109,5	–113,3
	Снег свежий (12)	–25,7	–7,9	–13,2	–197,7	–58,8	–101,2
Остров Дисмал	Снег свежий (1)	–	–	–5,2	–	–	–24,3
Пролив Гулле	Снег свежий (1)	–	–	–10,4	–	–	–69,8
Оазис Вечерний	Снег свежий (5)	–31,4	–18,0	–24,6	–244,3	–139,1	–192,5
Холмы Ларсеманн	Снег свежий (6)	–28,8	–15,2	–20,4	–217,6	–118,4	–157,4
	Снег, 0–15 см(1)			–20,9			–164,2
ст. Восток	Снег, 0–50 см (2)	–58,8	–58,1	–58,5	–451,8	–445,4	–448,3

Как видно из табл. 2, для проб старого снега, отобранных на островах залива Маргерит, значения $\delta^{18}\text{O}$ и δD близки, тогда как для проб свежеснегавшего снега, наоборот, находятся в широком диапазоне (кислорода-18 – от $-5,2$ до $-25,7$ ‰, δD – от $-24,3$ до $-197,7$ ‰). Максимальное содержание $\delta^{18}\text{O}$ зафиксировано в свежеснегавшем снеге на острове Дисмал; близкие к нему значения характерны для проб свежего снега на острове Хоршшу ($-7,9$ ‰). Максимальное содержание изотопов водорода (δD) составило $-24,3$ ‰ для острова Дисмал и $-58,8$ ‰ – для острова Хоршшу. Если говорить о вариабельности значений для данного типа проб, то она зависит от даты их отбора. Так, самые низкие значения $\delta^{18}\text{O}$ в свежеснегавшем снеге ($-25,7$ ‰) и δD ($-197,7$ ‰) зафиксированы 26 февраля 2020 г.; аналогичные значения приходятся на 27 февраля (рис. 2). В остальные дни отбора различия имеются, хотя не столь существенные. Например, 2 марта, когда было отобрано 7 проб на острове Хоршшу, содержание изотопов кислорода в свежеснегавшем снеге варьировало от $-8,5$ до $-14,5$ ‰, изотопов водорода – от $-48,2$ до $-104,1$ ‰. В пространстве изотопный состав снега зависит от характера снегопада и горизонтального переноса снега, и в некоторых точках может быть случайной величиной, как показано в [1].

Следует отметить, что отбор проб на островах в заливе Маргерит проводился в период высоких для этого сезона года температур (по данным ближайшей станции [16]); зависимости изотопного состава от температур воздуха не прослеживается. Возможны другие факторы, влияющие на содержание изотопов в атмосферных осадках, связанные в том числе с условиями их формирования и процессами переноса воздушных масс [1].

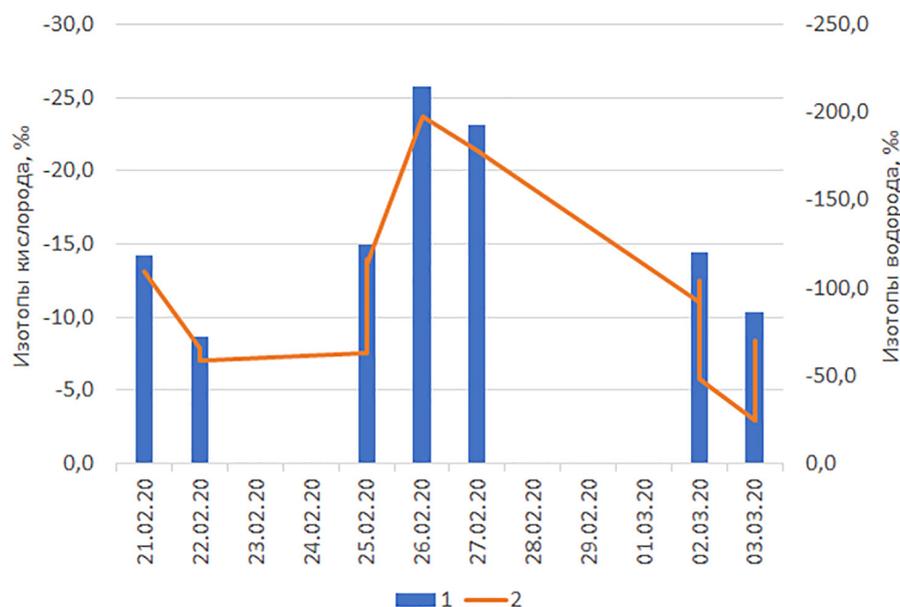


Рис. 2. Динамика содержания изотопов кислорода (1) и водорода (2) в свежес выпавшем снеге на островах залива Маргерит

Fig. 2. Dynamics of content of oxygen (1) and hydrogen isotopes (2) in newly fallen snow on the islands of Marguerite Bay

Полученные данные сопоставимы с результатами изучения изотопного состава ледника в Чили [17], где среднее значение $\delta^{18}\text{O}$ составило $-10,19$ ‰, максимум $-6,99$ ‰. Содержание $\delta^{18}\text{O}$ в атмосферных осадках на острове Кинг-Джордж в 1991 г. составило $-10,54$ ‰, $\delta\text{D} - 77,6$ ‰ [11].

В целом подтверждается общая закономерность в изменении (истощении) изотопного состава атмосферных осадков и уменьшении содержания изотопов кислорода и водорода в ряду от свежего снега (отобранного в день выпадения) к лежалому снегу поверхностных горизонтов, накопленному за некоторый промежуток времени.

Содержание изотопов кислорода в свежем снеге оазиса Вечерний (Земля Эндерби) изменяется от $-18,0$ до $-31,4$ ‰ при среднем значении $-24,6$ ‰, содержание изотопов водорода соответственно от $-139,1$ до $-244,3$ ‰ (среднее $-192,5$ ‰).

Максимальное содержание изотопов кислорода в свежем снеге оазиса Холмы Ларсеманн составило $-15,2$ ‰, минимальное $-28,8$ ‰, среднее значение оценивается в $-20,9$ ‰. Диапазон зафиксированных значений для изотопов водорода – от $-118,4$ до $-217,6$ ‰ (среднее $-157,4$ ‰). Средние значения изотопного состава свежего снега примерно одинаковы с результатами из прикопки (одна проба). Диапазон замеренных значений для данного района схож с результатами

Т а б л и ц а 3. Основные статистические параметры содержания стабильных изотопов $\delta^{18}\text{O}$ и δD в пробах свежес выпавшего снега различных районов Антарктики

Table 3. Main statistical parameters of the content of stable isotopes $\delta^{18}\text{O}$ and δD in samples of newly fallen snow from different regions of Antarctica

Показатель Indicator	Острова залива Маргерит Marguerite Bay Islands		Холмы Ларсеманн Larsemann Hills		Оазис Вечерний Oasis Vecherny	
	$\delta^{18}\text{O}$	δD	$\delta^{18}\text{O}$	δD	$\delta^{18}\text{O}$	δD
Среднее	-12,47	-89,71	-20,36	-157,37	-24,60	-192,51
Стандартная ошибка среднего	1,51	12,50	2,44	18,40	2,54	19,99
Медиана	-12,05	-86,90	-18,50	-144,88	-22,09	-173,71
Стандартное отклонение	5,65	46,79	5,99	45,08	5,67	44,70
Минимум	-25,74	-197,67	-28,84	-217,56	-31,38	-244,27
Максимум	-5,24	-24,30	-15,17	-118,37	-18,00	-139,09
Коэф. вариации, %	45	52	29	29	23	23
Количество проб	14		6		5	

для прибрежной зоны Ingrid Christen Coast [10]: содержание $\delta^{18}\text{O}$ от -15 до -25 ‰, δD – от -120 до -180 ‰ (минимальные значения или близкие к ним значения фиксируются с удалением от берега).

Статистические параметры для свежеснегавпавшего снега трех регионов приведены в табл. 3. Обращает на себя внимание близость средних и медианных значений, а также низкие коэффициенты вариации, в особенности для оазисов Холмы Ларсеманн и оазис Вечерний.

На ст. Восток содержание $\delta^{18}\text{O}$ по результатам анализа двух проб в среднем составило $-58,5$ ‰, δD – $-448,3$ ‰. Для сравнения: по данным [14], на снегомерном полигоне ст. Восток содержание $\delta^{18}\text{O}$ находилось в диапазоне от -55 до -60 ‰, δD : от -420 до -460 ‰. Аналогичные значения получены для Купола А: содержание $\delta^{18}\text{O}$ для снеговых шурфов варьировало от $-48,80$ до $-62,97$ ‰, со средним значением $-58,48$ ‰ [9]. Как и для других регионов Антарктики, выявлена тесная взаимосвязь стабильных изотопов кислорода ($\delta^{18}\text{O}$) и водорода (δD) для всей выборки проанализированных проб снега (рис. 3).

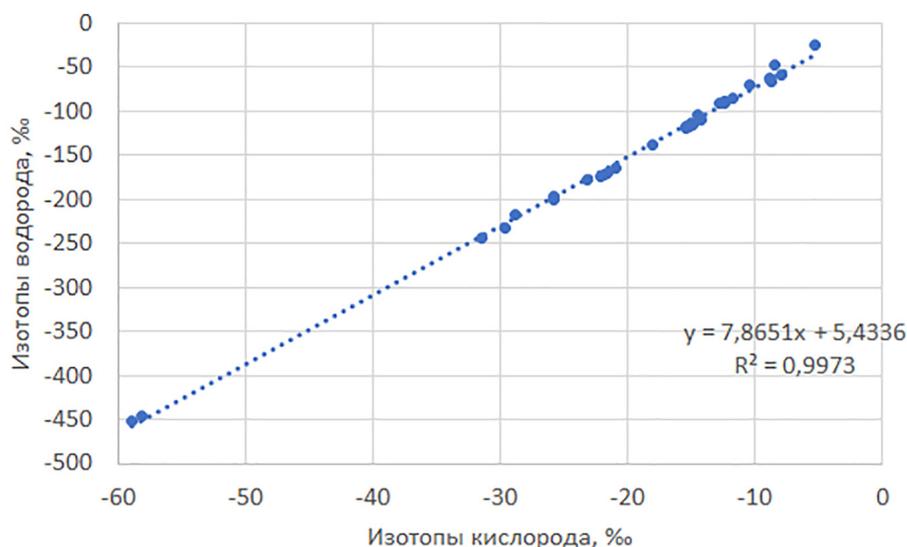


Рис. 3. Связь содержания изотопов кислорода ($\delta^{18}\text{O}$) и изотопов водорода (δD) в снеге различных районов Антарктики

Fig. 3. Relationship between the content of oxygen isotopes ($\delta^{18}\text{O}$) and hydrogen isotopes (δD) in snow in different regions of Antarctica

Максимальные значения $\delta^{18}\text{O}$ и δD характерны для снега островной части Западной Антарктики, они более низкие в прибрежной зоне Восточной Антарктиды и минимальные – во внутриконтинентальной ее зоне. Четкое закономерное изменение изотопного состава снега установлено при изменении высоты поверхности и удаленности от берега [3; 10; 12].

Заключение. Данные по изотопному составу снеговых вод для островов залива Маргерит и оазиса Вечерний получены впервые, и они не противоречат данным по другим антарктическим регионам и выявленным ранее закономерностям.

Изучение изотопного состава современного снега важно для реконструкции палеоклимата краевой зоны антарктического ледникового щита на основе ледовых кернов. В связи с этим мониторинг изотопного состава может быть составной частью мониторинга климатических изменений в районе базирования БАЭ.

Благодарности. Работа выполнена в рамках подпрограммы «Мониторинг полярных районов Земли, создание Белорусской антарктической станции и обеспечение деятельности полярных экспедиций на 2016–2020 годы» и подпрограммы «Развитие деятельности белорусской антарктической станции» на 2021–2025 годы.

Acknowledgment. The work is carried out within the framework of the subprogram “Monitoring the polar regions of the Earth, organizing the Belarusian Antarctic station, and providing the activity of polar expeditions for 2016–2020” and the subprogram “Developing the activity of the Belarusian Antarctic Expedition for 2021–2025”.

Выражаем искреннюю благодарность руководству Полярного антарктического института и Исследовательского центра Мармара Совета по научным и технологическим исследованиям Турции (TUBITAK) за возможность участия С. В. Какарека в 4-й Турецкой антарктической экспедиции и проведения отбора проб снега на островах залива Маргерит.

Авторы выражают благодарность начальнику 12-й белорусской антарктической экспедиции БАЭ А. А. Гайдашову и всем ее участникам за отбор проб снега в оазисе Вечерний и транспортировку проб.

Глубокая признательность руководству Государственного научного центра Российской Федерации «Арктический и антарктический научно-исследовательский институт» за возможность выполнения изотопного анализа снега в лаборатории института.

The authors are very grateful to the management of the Polar Antarctic Institute and the Research Center of the Marmara Council on Scientific and Technological Studies of Turkey (TUBITAK) for the opportunity given to S. V. Kakareka to participate in the Fourth Turkish Antarctic expedition and to take snow samples on the islands of Marguerite Bay.

The authors express their gratitude to the leader of the 12th Belarusian Antarctic expedition A. A. Gaidashov and all BAE participants for the snow samples taken in the Vecherny Oasis and their transportation.

The authors are deeply grateful to the management of the State Scientific Center of the Russian Federation “Arctic and Antarctic Research Institute” for the opportunity to make the isotope analysis of snow at the Institute Laboratory.

Список использованных источников

1. Екайкин, А. А. Стабильные изотопы воды в гляциологии и палеогеографии / А. А. Екайкин. – СПб., 2016. – 63 с.
2. On the similarity and apparent cycles of isotopic variations in East Antarctic snow pits / T. Laepple [et al.] // *The Cryosphere*. – 2018. – Vol. 12, N 1. – P. 169–187. <https://doi.org/10.5194/tc-12-169-2018>
3. A review of Antarctic surface snow isotopic composition: observations, atmospheric circulation, and isotopic modeling / V. Masson-Delmotte [et al.] // *J. Climate*. – 2008. – Vol. 21, N 13. – P. 3359–3387. <https://doi.org/10.1175/2007jcli2139.1>
4. Climate and atmospheric history of the past 420,000 years from the Vostok ice core, Antarctica / J. R. Petit [et al.] // *Nature*. – 1999. – Vol. 399, N 6735. – P. 429–436. <https://doi.org/10.1038/20859>
5. Orbital and millennial Antarctic climate variability over the past 800,000 years / J. Jouzel [et al.] // *Science*. – 2007. – Vol. 317, N 5839. – P. 793–796. <https://doi.org/10.1126/science.1141038>
6. State dependence of climatic instability over the past 720,000 years from Antarctic ice cores and climate modeling / K. Kawamura [et al.] // *Sci. Adv.* – 2017. – Vol. 3, N 2. – Art. e1600446. <https://doi.org/10.1126/sciadv.1600446>
7. A comparison of the present and last interglacial periods in six Antarctic ice cores / V. Masson-Delmotte [et al.] // *Clim. Past*. – 2011. – Vol. 7, N 2. – P. 397–423. <https://doi.org/10.5194/cp-7-397-2011>
8. Archival processes of the water stable isotope signal in East Antarctic ice cores / M. Casado [et al.] // *The Cryosphere*. – 2018. – Vol. 12, N 5. – P. 1745–1766. <https://doi.org/10.5194/tc-12-1745-2018>
9. Acquisition of Post-Depositional Effects on Stable Isotopes ($\delta^{18}\text{O}$ and δD) of Snow and Firn at Dome A, East Antarctica / T. Ma [et al.] // *Water*. – 2020. – Vol. 12, N 6. – P. 1707. <https://doi.org/10.3390/w12061707>
10. Thamban, M. Trace metal concentrations of surface snow from Ingrid Christensen Coast, East Antarctica – spatial variability and possible anthropogenic contributions / M. Thamban, R. G. Thakur // *Environmental Monitoring and Assessment*. – 2013. – Vol. 185, N 4. – P. 2961–2975. <https://doi.org/10.1007/s10661-012-2764-0>
11. Ice core study from the King George Island ice cap, South Shetlands, Antarctica / J. C. Simões [et al.] // *Pesqui. Antart. Brasil*. – 2004. – Vol. 4. – P. 9–23 [Electronic resource]. – Mode of access: https://www.researchgate.net/publication/228753749_Ice_core_study_from_King_George_Island_South_Shetlands_Antarctica. – Date of access: 15.03.2020.
12. Climatic signals from 76 shallow firn cores in Dronning Maud Land, East Antarctica / S. Altnau [et al.] // *The Cryosphere*. – 2015. – Vol. 9, N 3. – P. 925–944. <https://doi.org/10.5194/tc-9-925-2015>
13. Casado, M. Climatic information archived in ice cores: impact of intermittency and diffusion on the recorded isotopic signal in Antarctica / M. Casado, T. Münch, T. Laepple // *Clim. Past*. – 2020. – Vol. 16, N 4. – P. 1581–1598. <https://doi.org/10.5194/cp-16-1581-2020>
14. Пространственная изменчивость изотопного состава и скорости накопления снега на снегомерном полигоне станции Восток (Центральная Антарктида) / А. А. Екайкин [и др.] // *Проблемы Арктики и Антарктики*. – 2019. – Т. 65, № 1. – С. 46–62. <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2019-65-1-46-62>
15. New insights into the use of stable water isotopes at the northern Antarctic Peninsula as a tool for regional climate studies / F. Fernandoy [et al.] // *The Cryosphere*. – 2018. – Vol. 12, N 3. – P. 1069–1090. <https://doi.org/10.5194/tc-12-1069-2018>
16. Natural Environmental Research Council British Antarctic Survey Sensor. Observation Service Online Meteorological Data for the Rothera Station – 2020 [Electronic resource]. – Mode of access: <http://basmet.nerc-bas.ac.uk/sos/>. – Date of access: 27.03.2021.
17. Chemical Composition of Fresh Snow from Glaciar Marinelli, Tierra Del Fuego, Chile / B. Grigholm [et al.] // *Journal of Glaciology*. – 2009. – Vol. 55, N 193. – P. 769–776. <https://doi.org/10.3189/002214309790152546>

References

1. Ekaykin A. A. *Stable isotopes of water in glaciology and paleogeography*. Saint Petersburg, 2016. 63 p. (in Russian).
2. Laepple T., Munch T., Casado M., Hoerhold M., Landais A., Kipfstuhl S. On the similarity and apparent cycles of isotopic variations in East Antarctic snow pits. *The Cryosphere*, 2018, vol. 12, no. 1, pp. 169–187. <https://doi.org/10.5194/tc-12-169-2018>
3. Masson-Delmotte V., Hou S., Ekaykin A., Jouzel J., Aristarain A., Bernardo R. T., Bromwich D., Cattani O., Delmotte M., Falourd S., Frezzotti M., Gallée H., Genoni L., Isaksson E., Landais A., Helsen M. M., Hoffmann G., Lopez J., Morgan V., Motoyama H., Noone D., Oerter H., Petit J. R., Royer A., Uemura R., Schmidt G. A., Schlosser E., Simões J. C., Steig E. J., Stenni B., Stievenard M., van den Broeke M. R., van de Wal R. S. W., van de Berg W. J., Vimeux F., White J. W. C. A review of Antarctic surface snow isotopic composition: observations, atmospheric circulation, and isotopic modeling. *Journal of Climate*, 2008, vol. 21, no. 13, pp. 3359–3387. <https://doi.org/10.1175/2007jcli2139.1>

4. Petit J. R., Jouzel J., Raynaud D., Barkov N. I., Barnola J. M., Basile I., Bender M., Chappellaz J., Davis M., Delaygue G., Delmotte M., Kotlyakov V. M., Legrand M., Lipenkov V. Y., Lorius C., Pepin L., Ritz C., Saltzman E., Stievenard M. Climate and atmospheric history of the past 420,000 years from the Vostok ice core, Antarctica. *Nature*, 1999, vol. 399, no. 6735, pp. 429–436. <https://doi.org/10.1038/20859>

5. Jouzel J., Masson-Delmotte V., Cattani O., Dreyfus G., Falourd S., Hoffmann G., Minster B., Nouet J., Barnola J. M., Chappellaz J., Fischer H., Gallet J. C., Johnsen S., Leuenberger M., Loulergue L., Luethi D., Oerter H., Parrenin F., Raisbeck G., Raynaud D., Schilt A., Schwander J., Selmo E., Souchez R., Spahni R., Stauffer B., Steffensen J. P., Stenni B., Stocker T. F., Tison J. L., Werner M., Wolff E. W. Orbital and millennial Antarctic climate variability over the past 800,000 years. *Science*, 2007, vol. 317, no. 5839, pp. 793–796. <https://doi.org/10.1126/science.1141038>

6. Kawamura K., Abe-Ouchi A., Motoyama H., Ageta Y., Aoki S., Azuma N., Fujii Y., Fujita K., Fujita S., Fukui K., et al. State dependence of climatic instability over the past 720,000 years from Antarctic ice cores and climate modeling. *Sciences Advances*, 2017, vol. 3, no. 2, art. e1600446. <https://doi.org/10.1126/sciadv.1600446>

7. Masson-Delmotte V., Buiron D., Ekaykin A., Frezzotti M., Galée H., Jouzel J., Krinner G., Landais A., Motoyama H., Oerter H., Pol K., Pollard D., Ritz C., Schlosser E., Sime L. C., Sodemann H., Stenni B., Uemura R., Vimeux F. A comparison of the present and last interglacial periods in six Antarctic ice cores. *Climate of the Past*, 2011, vol. 7, no. 2, pp. 397–423. <https://doi.org/10.5194/cp-7-397-2011>

8. Casado M., Landais A., Picard G., Munch T., Laepple T., Stenni B., Dreossi G., Ekaykin A., Arnaud L., Genthon C., Touzeau A., Masson-Delmotte V., Jouzel J. Archival processes of the water stable isotope signal in East Antarctic ice cores. *The Cryosphere*, 2018, vol. 12, no. 5, pp. 1745–1766. <https://doi.org/10.5194/tc-12-1745-2018>

9. Ma T., Li L., Shi G., Li Yu. Acquisition of Post-Depositional Effects on Stable Isotopes ($\delta^{18}\text{O}$ and δD) of Snow and Firn at Dome A, East Antarctica. *Water*, 2020, vol. 12, no. 6, pp. 1707. <https://doi.org/10.3390/w12061707>

10. 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, vol. 185, no. 4, pp. 2961–2975. <https://doi.org/10.1007/s10661-012-2764-0>

11. Simões J. C., Ferron F. A., Aristarain A. J., Bernardo R. T., Stievenard M., Pourchet M. Ice core study from the King George Island ice cap, South Shetlands, Antarctica. *Pesqui. Antarct.*, 2004, vol. 4, pp. 9–23. https://www.researchgate.net/publication/228753749_Ice_core_study_from_King_George_Island_South_Shettlands_Antarctica (accessed 15.03.2020).

12. Altnau S., Schlosser E., Isaksson E., Divine D. Climatic signals from 76 shallow firn cores in Dronning Maud Land, East Antarctica. *The Cryosphere*, 2015, vol. 9, no. 3, pp. 925–944. <https://doi.org/10.5194/tc-9-925-2015>

13. Casado M., Münch T., Laepple T. Climatic information archived in ice cores: impact of intermittency and diffusion on the recorded isotopic signal in Antarctica. *Climate of the Past*, 2020, vol. 16, no. 4, pp. 1581–1598. <https://doi.org/10.5194/cp-16-1581-2020>

14. Ekaykin A. A., Vladimirova D. O., Tebenkova N. A., Brovko E. V., Veres A. N., Kovyazin A. V., Kozachek A. V., Lindren M., Shibaev Yu. A., Preobrazhenskaya A. V., Lipenkov V. Ya. Spatial variability of snow isotopic composition and accumulation rate at the stake farm of Vostok station (Central Antarctica). *Arctic and Antarctic Research*, 2019, vol. 65, no. 1, pp. 46–62 (in Russian). <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2019-65-1-46-62>

15. Fernandoy F., Tetzner D., Meyer H., Gacitúa G., Hoffmann K., Falk U., Lambert F., MacDonell S. New insights into the use of stable water isotopes at the northern Antarctic Peninsula as a tool for regional climate studies. *The Cryosphere*, 2018, vol. 12, no. 3, pp. 1069–1090. <https://doi.org/10.5194/tc-12-1069-2018>

16. Natural Environmental Research Council British Antarctic Survey Sensor. Observation Service Online Meteorological Data for the Rothera Station. Available at: <http://basmet.nerc-bas.ac.uk/sos/> (accessed 27.03.2021)

17. Grigholm B., Mayewski P. A., Kurbatov A. V., Casassa G., Staeding A. C., Handley M., Sneed S. B., Introne D. S. Chemical Composition of Fresh Snow from Glaciér Marinelli, Tierra Del Fuego, Chile. *Journal of Glaciology*, 2009, vol. 55, no. 193, pp. 769–776. <https://doi.org/10.3189/002214309790152546>

Информация об авторах

Какарека Сергей Витальевич – д-р техн. наук, заведующий лабораторией. Институт природопользования НАН Беларуси (ул. Ф. Скорины, 10, 220076, Минск, Республика Беларусь). E-mail: sk001@yandex.ru.

Кухарчик Тамара Иосифовна – д-р географ. наук, гл. науч. сотр. Институт природопользования НАН Беларуси (ул. Ф. Скорины, 10, 220076, Минск, Республика Беларусь). E-mail: tkukharchyk@gmail.com.

Екайкин Алексей Анатольевич – канд. географ. наук, ст. науч. сотрудник. Арктический и антарктический научно-исследовательский институт (ул. Беринга, 38, 199397, Санкт-Петербург, Российская Федерация). E-mail: ekaykin@aari.ru.

Гигиняк Юрий Григорьевич – канд. биол. наук, вед. науч. сотрудник. НПЦ НАН Беларуси по биоресурсам (ул. Академическая, 27, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: antarctida_2010@mail.ru.

Information about the authors

Kakareka Sergey V. – D. Sc. (Engineering), Head of the Laboratory. Institute for Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus (10, F. Skorina Str., 220076, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: sk001@yandex.ru.

Kukharchyk Tamara I. – D. Sc. (Geography), Chief researcher. Institute for Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus (10, F. Skorina Str., 220076, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: tkukharchyk@gmail.com.

Ekaykin Aleksey A. – Ph. D. (Geography), Senior researcher. Arctic and Antarctic Research Institute (38, Bering Str., 199397, Saint Petersburg, Russian Federation). E-mail: ekaykin@aari.ru.

Giginyak Yury G. – Ph. D. (Biology), Leading researcher. Scientific and Practical Centre for Bioresources of the National Academy of Sciences of Belarus (27, Akademicheskaya Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: antarctida_2010@mail.ru.