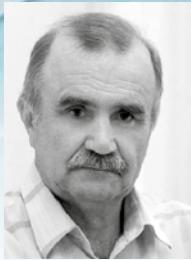


# ИЗУЧФНИЕ ГИДРОХИМИЧЕСКИХ ОСОБЕННОСТЕЙ СНЕЖНО-ФИРНОВОГО ПОКРОВА АНТАРКТИДЫ



**Сергей Какарека,**  
заведующий  
лабораторией Института  
природопользования  
НАН Беларусь, доктор  
технических наук, профессор



**Тамара Кухарчик,**  
главный научный  
сотрудник Института  
природопользования  
НАН Беларусь, доктор  
географических наук,  
профессор

Антарктида, известная как Белый континент, более чем на 99% покрыта ледниковым щитом, а на оставшейся ее части формируется сезонный снежный покров. Благодаря доминированию твердых осадков, незначительной доле зоны аблации и некоторым другим факторам снежный покров и фирново-ледовая толща содержат в себе архивированную «летопись» природных изменений и антропогенных воздействий. Поэтому анализ снега Антарктиды, в дополнение к исследованиям фирна и льда, является эффективным методом изучения глобальных и региональных уровней и трендов атмосферных выпадений, процессов многолетних изменений в циркуляции воздушных масс, палеоклимата и экологических обстановок прошлого.

Регулярные изыскания в этом направлении развернулись с 1970-х гг., и ныне уже накоплен значительный массив данных о содержании основных ионов и их соотношениях, а также о макро- и микроэлементах в пробах снеговых вод в различных районах Антарктики [1–3]. Исследованиям снежного покрова с помощью региональных и трансконтинентальных профилей различной протяженности посвящен ряд крупных международных проектов, самый известный из которых – ITASE [4–6]. В перечне задач трансантарктических экспедиций – изучение изменения химического состава снежного покрова с удалением от морского побережья, а также выявление других факторов, определяющих вариабельность значений [7–8]. Важными задачами современных исследований ледникового щита являются также палео- и гляциоклиматические реконструкции на основе анализа изотопного состава снеговых вод Антарктики. Зависимости между содержанием стабильных изотопов кислорода и водорода в атмосферных осадках и температурой воздуха, положенные в основу изотопно-температурного метода, позволяют воссоздать климат прошлых эпох по данным антарктических ледяных кернов. Самые длинные климатические ряды с восстановленной температурой воздуха за 420, 720 и 810 тыс. лет получены для станций «Восток», «Купола F» и «Конкордия» соответственно [9–10]. Антропогенное воздействие на Антарктиду также фиксируется в ее снегах и льдах, что позволяет выполнять соответствующие реконструкции.

Малая изученность региона основного базирования белорусских антарктических экспедиций (Земля Эндерби), который оказался в стороне от маршрутов основных трансантарктических экспедиций ITASE, а также необходимость создания системы мониторинга окружающей

среды района размещения Белорусской антарктической станции в соответствии с требованиями Протокола по охране окружающей среды к Договору об Антарктике обусловили формирование следующих основных направлений исследований применительно к снежному покрову: динамика химического (ионного) состава снега в связи с изменениями уровней влияния хозяйственной деятельности человека, климатическими и другими природными факторами; пространственная неоднородность в нем макро- и микроЭлементов и факторы, ее обуславливающие.

Задачи исследований включают выявление территориальных особенностей содержания химических элементов в снежном покрове и вариабельности основных показателей для определения антропогенного воздействия и многолетних тенденций его изменения, влияния на гидрохимический режим водоемов, оценки воздействия природных факторов (океана, биоты, вулканов и других), а также использование анализа содержания стабильных изотопов кислорода и водорода для изучения климатических изменений.

## Районы исследований и методические подходы

Районами исследований стали оазис Вечерний (Холмы Тала, Земля Эндерби, Восточная Антарктида) и острова Дисмал и Хорсшу, залив Маргерит, Антарктический полуостров, Западная Антарктида. В оазисе Вечерний, где в 2015 г. начало строительство белорусской антарктической научной станции, химический состав снежного покрова изучали еще в 2012 г. при подготовке Всесторонней оценки воздействия на окружающую среду (ВООС). Ранее здесь функционировала Советская антарктическая экспедиция «Гора Вечерняя», инфраструктура которой частично используется и сейчас. Острова залива Маргерит изучались в рамках 4-й Турецкой антарктической экспедиции (2020 г.), ныне на островах нет постоянных научных станций. В 1955–1960 гг. на северном побережье острова Хорсшу работала британская станция «Ү». Отбирали пробы снега в рамках 7-й и 14-й БАЭ также в районе Холмов Ларсеманн.

В оазисе Вечернем сформирована сеть мониторинга, которая создана с учетом наличия снежников и потенциальных источников воздействия для ежегодного отбора проб снежного покрова в соответствии с национальными и международными нормативами (рыхлый слой на глубину до 20 см).

На островах Хорсшу и Дисмал в заливе Маргерит брали образцы старого (лежащего) снега с поверхности ледников и снежников, в дни со снегопадом – свежевыпавшего (рис. 1, 2).

Ионный состав снега исследовали с помощью стандартных методов в лаборатории Института природопользования НАН Беларусь, содержание микроэлементов – методом ICP-MS в Институте биоорганической химии НАН Беларусь, концентрация изотопов воды – с помощью лазерного анализатора изотопного состава Picarro L2130 в Институте Арктики и Антарктики в Санкт-Петербурге.

Впервые изучен ионный состав снежного покрова и охарактеризована пространственная вариабельность его основных показателей в оазисе Вечерний [11]. Показано, что суглеводные воды там очень низкоминерализованные с диапазоном суммы ионов в пределах 1,04–57,3 мг/л (среднее – 7,4 мг/л) и величиной удельной электропроводности – 2,7–85,1  $\mu\text{См}/\text{см}$  (10,7  $\mu\text{См}/\text{см}$ ). Почти в 90% случаев реакция среды суглеводных вод характеризуется как слабокислая, их химический состав и минерализация определяется преимущественно содержанием хлоридов и ионов натрия. На тесную зависимость общей минерализации суглеводных вод от содержания хлоридов и ионов натрия указывают высокие значения коэффициента корреляции ( $R^2$ ), составляющие соответственно 0,95 и 0,92 (рис. 3).

Высокая вариабельность показателей гидрохимического состава суглеводных вод на участках бывшей и нынешней хозяйственной деятельности, а также повышенное содержание сульфат-ионов рассматриваются как индикаторы антропогенного воздействия.

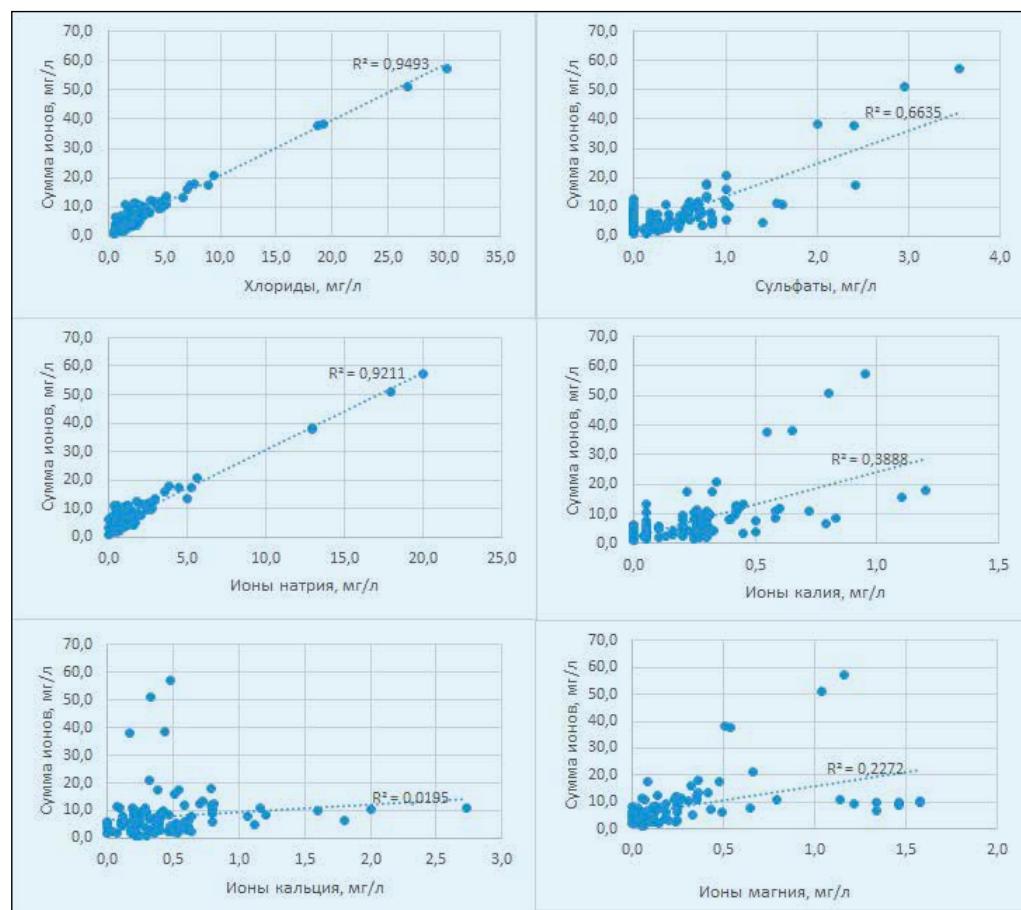


Рис. 1. Характер снежного покрова на острове Хорсшу (февраль, 2020 г.)



Рис. 2. Отбор снега на острове Хорсшу

**Рис. 3.** Зависимость содержания суммы ионов от концентрации основных ионов в снеговой воде оазиса Вечерний и прилегающей части ледникового купола [11]



## Пространственная неоднородность содержания микроэлементов в снежном покрове

В работе [12] обобщены данные о содержании микроэлементов в поверхностном снеге оазиса Вечерний, полученные в 2012–2018 гг. Наименьшее их количество зафиксировано в ледниковом щите в 5 км от берега, что соответствует другим исследованиям.

Распределение макро- и практических всех микроэлементов характеризуется выраженной асимметрией. Их концентрации находятся преимущественно в области низких значений. Установлены различия в их содержании в поверхностном снегу между фоновыми участками и теми, в пределах которых ведется или велась ранее хозяйственная деятельность (рис. 4). В частности, выявлены повышенные концентрации микроэлементов в пробах снега в местах деятельности человека, в том числе

в районе взлетно-посадочной полосы, которая активно использовалась с конца 1970-х до начала 1990-х гг. для самолетов Ил-76ТД и Ил-76Д.

Полученные высокие коэффициенты обогащения (EFc) со значениями  $>100$  для Sb, Se, As, Cd и Zn и относительно высокие (EFc=10–100) для Cr, Cu, Mo и V могут быть обусловлены влиянием местных антропогенных источников, определяющее значение среди которых принадлежит элементам, попавшим в окружающую среду вследствие сжигания топлива в дизельных установках и транспортных средствах, а также коррозии старых объектов инфраструктуры.

Первые данные о содержании макро- и микроэлементов в снеге для островов залива Маргарит (Хорсшу и Дисмал) приведены в работе [13]. Самые низкие средние концентрации Na, Mg, K, Ca, Fe, Cr, Se, Ba, As и Tl зафиксированы в пробах старого снега. Их изменчивость и средние значения значительно выше в свежевыпавшем снегу. Все виды проб имеют самые высокие концентрации Na, что подтверждает источник их посту-

плении с морскими аэрозолями. Некоторые различия между островами обусловлены локальными факторами, например, для свежевыпавшего снега – направлением ветра, для старого – экспозицией склонов и удаленностью от берега.

Помимо многообразия природных факторов, влияющих на химический состав снега, показано возможное антропогенное воздействие, связанное с трансграничным переносом воздушных масс. Повышенные коэффициенты концентрации установлены по ряду технофильных элементов (As, Zn, Cd, Sb, Mo, Ag, Se); самые высокие значения ( $EF_c > 100$ ) зафиксированы как для свежевыпавшего, так и для старого снега и характерны в отношении Se, Zn и Cd (рис. 5).

Полученные результаты будут полезны для моделирования геохимической миграции, оценки воздействия и прогнозирования, а также для уточнения фоновой ситуации при проведении локального мониторинга на острове Хорсшу.

Проведенные исследования подтверждают общую закономерность по изменению (истощению) изотопного состава атмосферных осадков и уменьшению содержания изотопов кислорода и водорода в свежем (отобранном в день выпадения) и лежалом снегу поверхностных горизонтов [14]. Максимальные значения стабильных изотопов кислорода и водорода характерны для островной Антарктики, меньшие – в прибрежной зоне и в континентальной ее части. Описаны возможные факторы, влияющие на содержание изотопов.

Исследования макро- и микроэлементов в снежном покрове, а также ионного состава будут продолжены в рамках текущей и будущих антарктических программ. Это важно для выявле-

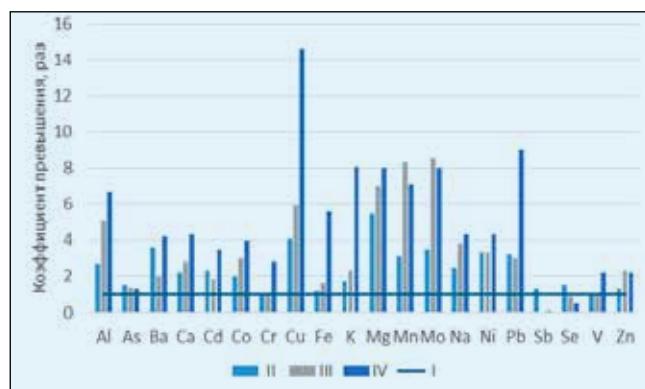


Рис. 4. Соотношение содержания микроэлементов в поверхностном снеге оазиса Вечерний на участках антропогенной деятельности (участки мониторинга II, III и IV) по отношению к фоновой территории (участок I) [12]

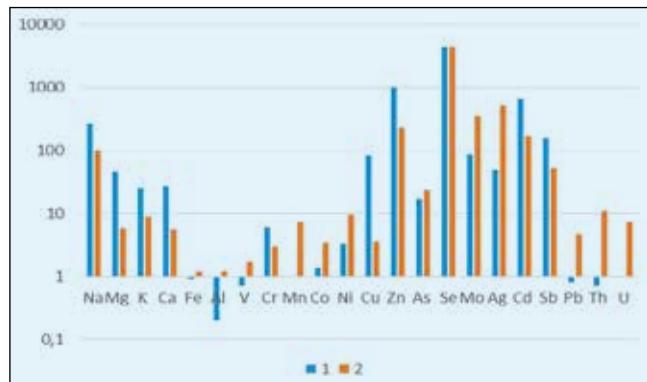


Рис. 5. Коэффициенты обогащения макро- и микроэлементов в пробах свежевыпавшего (1) и старого снега (2), отобранного на островах залива Маргерит

ния временных трендов с учетом климатических изменений и антропогенных воздействий, оценки атмосферных выпадений загрязняющих веществ и их влияния на уязвимые полярные экосистемы. Необходимо расширение программ по изучению изотопного состава снега как инструментария реконструкции палеоклиматических вариаций.

К перспективным направлениям относится отслеживание новых опасных химических веществ, в том числе стойких органических загрязнителей (СОЗ), которые являются глобальной проблемой и регулируются Стокгольмской конвенцией о СОЗ. Несмотря на удаленность континента и очень ограниченную деятельность человека, Антарктида подвержена влиянию загрязнителей, впервые обнаруженных в 1970-х гг. Их изучение в Антарктиде имеет сравнительно долгую историю, однако до сих пор существуют большие пробелы в знаниях об их содержании как в снежном покрове, так и в других компонентах природной среды.

Актуально развитие исследований пластика и микропластика как новой экологической угрозы глобального характера. Полученные данные свидетельствуют как о его попадании на Ледовый континент от местных источников, так и о перемещении частиц микропластика с трансграничными потоками и их осаждении на поверхности Антарктиды.

Опыт изучения снега будет использован при дальнейших исследованиях фирново-ледовых слоев антарктического ледниково-щита. Это потребует значительных усилий по созданию материально-технической базы для отбора, транспортировки и анализа ледовых кернов, однако позволит открыть новые научные горизонты. ■

Работа выполнена в рамках Государственных программ «Мониторинг полярных районов Земли и обеспечение деятельности арктических и антарктических экспедиций на 2011–2015 гг.» и «Мониторинг полярных районов Земли, создание Белорусской антарктической станции и обеспечение деятельности полярных экспедиций на 2016–2020 гг.». Авторы выражают искреннюю благодарность всем участникам Белорусских антарктических экспедиций, и в особенности Ю.Г. Гигиняку, А.А. Гайдашову и В.Е. Мямину, за отбор и доставку в Минск проб антарктического снега, а также Ю.Г. Кокош, М.А. Кудревич, П.В. Курману, А.А. Екайкину, выполнивших пробоотборку и химико-аналитические испытания.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. C. Boutron. Atmospheric trace elements in Antarctic prehistoric ice collected at a coastal ablation area / C. Boutron, M. Leclerc, N. Risler // Atmospheric Environment, 18 (9). 1984. 1947–1953.
2. M. Legrand, P.A. Mayewski. Glaciochemistry of polar ice cores: a review / M. Legrand, P.A. Mayewski // Reviews of Geophysics, 35. 1997. 219–243.
3. M. Thamban. Trace metal concentrations of surface snow from Ingrid Christensen Coast, East Antarctica—spatial variability and possible anthropogenic contributions / M. Thamban, R.C. Thakur // Environmental monitoring and assessment, 185 (4). 2013. 296–2975.
4. N. Bertler. Snow chemistry across Antarctica / N. Bertler, P.A. Mayewski, A. Aristarain [et al.]. // Ann. Glaciol. 2005. V. 41. P. 167–179.
5. T.V. Khodzher. Spatial-temporal dynamics of chemical composition of surface snow in East Antarctica along the Progress station – Vostok station transect / T.V. Khodzher, L.P. Goloboko-va, Y.A. Shibaev [et al.] // The Cryosphere. 2014. V. 8 (3). P. 931–939.
6. Xing Xing Jiang. Spatial variations of Pb, As, and Cu in surface snow along the transect from the Zhongshan Station to Dome A, East Antarctica [J]. Sciences in Cold and Arid Regions / Xing Xing Jiang, ShuGu Hou, YuanSheng Li [et al.]. 2018. 10 (3), 219–231. DOI: 10.3724/SP.J.1226.2018.00219.
7. S. Becagli. Chemical and isotopic snow variability in East Antarctica along the 2001/02 ITASE traverse. Annals of Glaciology / S. Becagli, M. Proposito, S. Benassai [et al.]. 39 (1). 2004. 473–782. DOI: 10.3189/172756404781814636.
8. D.A. Dixon. Variations in snow and firn chemistry along US ITASE traverses and the effect of surface glazing / D.A. Dixon, P.A. Mayewski, E. Korotkikh [et al.] // The Cryosphere. 2013. V. 7 (2). P. 515–535.
9. Екайкин А.А. Стабильные изотопы воды в гляциологии и палеогеографии / А.А. Екайкин – СПб., 2016.
10. K. Kawamura. State dependence of climatic instability over the past 720,000 years from Antarctic ice cores and climate modeling / K. Kawamura, A. Abe-Ouchi, H. Motoyama [et al.] // Sciences Advances. 2017. Vol. 3, no. 2, art. e1600446. https://doi.org/10.1126/sciadv.1600446.
11. С.В. Какарека. Пространственные особенности химического состава снежного покрова Холмов Тала, Восточная Антарктида / С.В. Какарека, Т.И. Кухарчик, Ю.Г. Кокош и др. // Проблемы Арктики и Антарктики. 2021. Т. 67. Вып. 1. С. 28–43. https://doi.org/10.30758/0555–2648–2020–67–1–28–43.
12. S. Kakareka. Study of trace elements in the surface snow for impact monitoring in Vecherny Oasis, East Antarctica / S. Kakareka, T. Kukharchyk, P. Kurman // Environ Monit Assess 192, 725. 2020. https://doi.org/10.1007/s10661–020–08682–8.
13. S. Kakareka. Trace and major elements in surface snow and fresh water bodies of the Marguerite Bay Islands, Antarctic Peninsula / S. Kakareka, T. Kukharchyk, P. Kurman // Polar Science 32 (2022), 100792, ISSN 1873–9652. 2022. https://doi.org/10.1016/j.polar.2022.100792.
14. С.В. Какарека. Стабильные изотопы в снеге прибрежных районов Антарктиды. Доклады НАН Беларусь / С.В. Какарека, Т.И. Кухарчик, А.А. Екайкин, Ю.Г. Гигиняк. 2021. Т. 65 (4). 495–502 https://doi.org/10.29235/1561–8323–2021–65–4–495–502.



**Радим Гарецкий,**  
главный научный  
сотрудник Института  
природопользования  
НАН Беларусь,  
академик



**Ярослав Грибик,**  
зав. лабораторией геотектоники  
и геофизики Института  
природопользования  
НАН Беларусь,  
кандидат геолого-  
минералогических наук,  
доцент



**Павел Шаблыко,**  
младший научный  
сотрудник Института  
природопользования  
НАН Беларусь

Цель научных геолого-геофизических исследований по изучению литосфера Земли Эндерби и ее акватории – познание эволюции геологического развития региона и оценка ресурсного минерально-сырьевого потенциала района расположения белорусской антарктической станции как основы для будущих геологоразведочных работ. Была поставлена задача на основе отбора образцов горных пород и проведения гравиметрической и магнитометрической съемки детально исследовать обстановку в зоне Вечернегорской площади, создать специализированный полигон для мониторинга гравитационного и магнитного полей для установления характера протекания современных тектонофизических процессов в зонах разломов, а также изучить глубинное строение земной коры и верхней мантии с целью тектонического районирования территории.