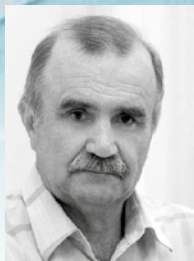


ИЗУЧЕНИЕ ГИДРОХИМИЧЕСКИХ ОСОБЕННОСТЕЙ СНЕЖНО-ФИРНОВОГО ПОКРОВА АНТАРКТИДЫ



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



Тамара Кухарчик,
главный научный
сотрудник Института
природопользования
НАН Беларуси, 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 абляции 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 вариативности 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. начато 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 «У». 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 глу-

бину 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 – свежавыпавшего (рис. 1, 2).

Ионный состав снега исследовали с помощью стандартных методов в лаборатории Института природопользования НАН Беларуси, содержание микроэлементов – методом ICP-MS в Институте биоорганической химии НАН Беларуси, 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 вариативность его основных показателей в оазисе Вечерний [11]. Показано, что снеговые 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 мСм/см (10,7 мСм/см). Почти в 90% случаев реакция среды снеговых вод характеризуется как слабокислая, их химический состав и минерализация определяется преимущественно содержанием хлоридов и ионов натрия. 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. 3).

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

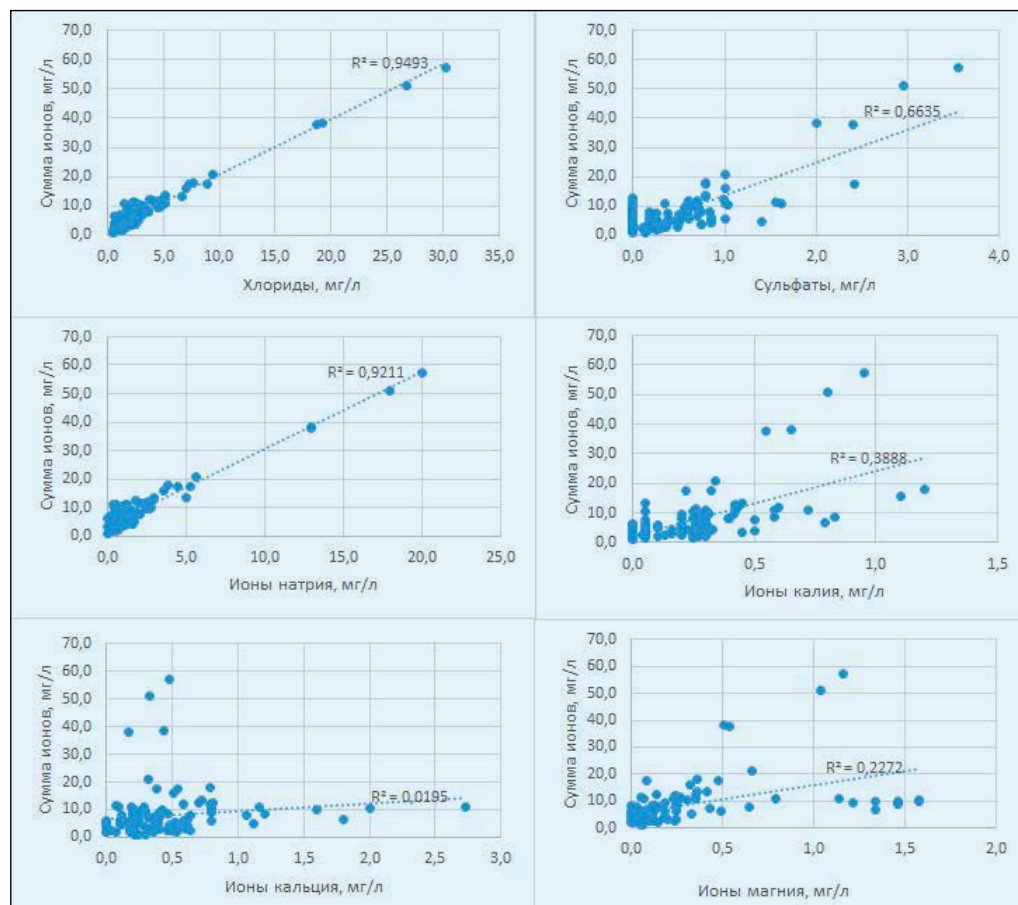


Рис. 1. Характер снежного покрова на острове Хорсшу (февраль, 2020 г.)



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 практически 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 Маргерит (Хоршу 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 свежеснеговом снегу. Все виды проб имеют самые высокие концентрации Na, что подтверждает источник их посту-

пления 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 ($E_{fc} > 100$) 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-

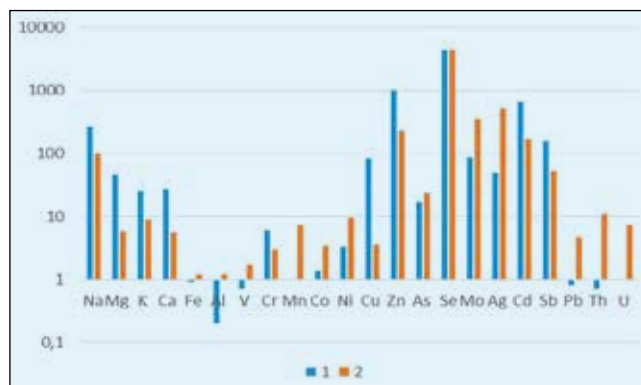


Рис. 5. Коэффициенты обогащения макро- и микроэлементов в пробах свежевыпавшего (1) и старого снега (2), отобранного на островах залива Маргерит

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 ледникового щита. Это потребует значительных усилий по созданию материально-технической базы для отбора, транспортировки и анализа ледовых кернов, однако позволит открыть новые научные горизонты. ■

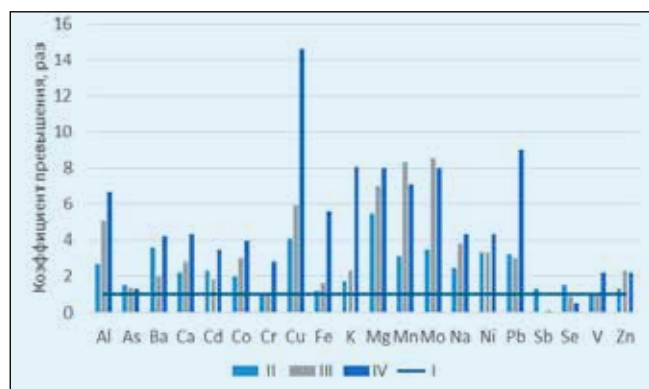


Рис. 4. Соотношение содержания микроэлементов в поверхностном снеге оазиса Вечерний на участках антропогенной деятельности (участки мониторинга II, III и IV) по отношению к фоновой территории (участок I) [12]

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, выполнявших пробоподготовку 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, ShuGui 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. Proprosito, 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 Беларуси / 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 Беларуси,
академик



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



Павел Шаблыко,
младший научный
сотрудник Института
природопользования
НАН Беларуси

Цель научных геолого-геофизических исследований по изучению литосферы 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 съемок 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.