

лополюсном пространстве СЛО, проведенных на ледовой базе «Барнео» начиная с МПГ-2007/08.

Важно, что идеология многолетнего мониторинга основана на постоянстве географического района исследований и времени наблюдений, организации полевых работ, использовании идентичного оборудования для сбора проб и лабораторных методов их обработки. Именно такой подход дал возможность для сравнения получаемых результатов наблюдений в одном районе, сделать выводы о направленности и величинах трендов и динамике изменений на межгодовом уровне, влиянии климатического фактора на изменения физической среды и составе биологических водных и ледовых сообществ. Выполненные наблюдения позволили собрать разнообразные материалы в околополюсном пространстве в соответствии с этой идеологией, а анализ полученных данных показал, что в Центральном Арктическом бассейне происходят заметные изменения физических и биологических характеристик водно-ледовой экосистемы. Выявлены изменения качественного состава ледяного покрова, гидрофизических характеристик поверхностных вод, а также видового состава биологических сообществ морского льда. Смена до-

минирования многолетних льдов сезонными льдами привела к перестроению в составе, структуре и функционировании биологических сообществ, прежде всего растительных. Сделано предположение, что в связи с возрастанием площади открытых ото льда водных пространств будет возрастать роль планктонных над ледовыми сообществами в создании органической продукции в океане. Важность продолжения мониторинга водно-ледовой экологической системы в центральных районах СЛО трудно переоценить.

*Работа выполнена при финансовой поддержке темы госзадания № 0149-2018-0008, а также частичной поддержке грантов РФФИ № 18-05-00099 и РФФИ/РГО № 17-05-41197. Логистическая поддержка настоящей экспедиции была оказана Экспедиционным центром РГО и сотрудниками ледовой базы «Барнео» имени А.В. Орлова, которым автор выражает глубокую благодарность за помощь в организации и проведении полевых работ.*

*И.А. Мельников (Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН).  
Фото автора*

## ДВЕ ТЫСЯЧИ ЛЕТ КЛИМАТИЧЕСКОЙ ИСТОРИИ ЦЕНТРАЛЬНОЙ АНТАРКТИДЫ ПО ДАННЫМ ФИРНОВЫХ ОТЛОЖЕНИЙ В РАЙОНЕ СТАНЦИИ ВОСТОК

Ледниковый покров Антарктиды представляет собой гигантское хранилище данных о прошлых изменениях климата нашей планеты. Даже в разгар лета температура воздуха в центральных районах материка едва ли поднимается выше  $-20^{\circ}\text{C}$ , поэтому все атмосферные осадки выпадают исключительно в твердом виде, а выпав — остаются здесь навсегда. На протяжении десятков и сотен тысяч лет они откладываются слой за слоем на поверхности ледникового покрова, сохраняя для нас информацию о погодных условиях, сопутствовавших формированию этого снега.

Вот уже на протяжении более 50 лет изучение ледяных кернов — образцов льда, добытых в результате глубокого бурения антарктического ледяного щита, — приносит ценные сведения о колебаниях температуры воздуха, количестве осадков, содержании парниковых газов в атмосфере, интенсивности атмосферной циркуляции и многих других параметрах в далеком прошлом. Два наиболее известных проекта по глубокому бурению льда в Антарктиде были осуществлены на российской станции Восток и на франко-итальянской станции Конкордия. Первый позволил впервые получить полную климатическую запись за последние четыре полных климатических цикла (400 тыс. лет, см.: *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., Stevenard M.* Climate and atmospheric history of the past 420,000 years from the Vostok ice core, Antarctica // *Nature*. 1999. V. 399. № 6735. P. 429–436), а второй продлил климатический ряд до 800 тыс. лет в прошлое (EPICA. Eight glacial cycles from an Antarctic ice core // *Nature*. 2004. № 429. P. 623–628).

Международная группа экспертов по изучению ледяных кернов (IPICS — *International Partnership in Ice Core Sciences*) сформулировала несколько приоритетных задач, на которые следует направить усилия международного научного сообщества (см.: <http://www.pages-igbp.org/ini/end-aff/ipics/white-papers>):

1. Поиск древнейшего в мире льда, который дал бы возможность реконструировать климатическую изменчивость за последние 1,5 млн лет. Обзор усилий, достигнутых в этом направлении за последнее время, см. в статье (*Липенков В.Я., Екайкин А.А.* В поисках древнейшего льда Антарктиды // *Лед и снег*. 2018. Т. 58. № 2. С. 255–260. doi: 10.15356/2076-6734-2018-2-255-260).

2. Изучение предыдущего межледниковья 120 тыс. л.н.

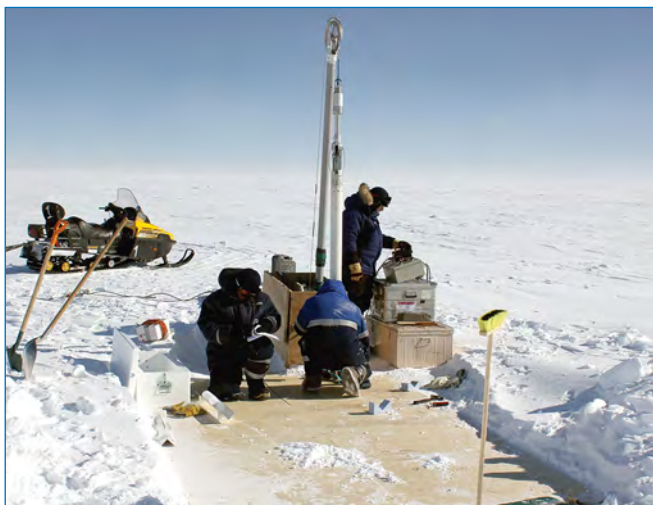
3. Исследование причин и механизмов резких климатических колебаний во время последнего ледникового периода, а также перехода от холодной климатической эпохи к голоцену.

4. Изучение климатической изменчивости на протяжении последних 2 тыс. лет.

Последний проект ставит целью изучение того естественного фона, на котором развиваются современные глобальные климатические изменения, связанные с деятельностью человека.

Недавно опубликованные сводные климатические кривые, охватывающие два последних тысячелетия, включают всего лишь 11 записей антарктических ледяных кернов (PAGES 2k consortium. Continental-scale temperature variability during the past two millennia // *Nature Geoscience*. 2013. V. 6. P. 339–346). В Антарктиде ощущается острая нехватка климатической информации для этого интервала времени, и это особенно актуально для Центральной Антарктиды.

Не является исключением и район станции Восток. 400-тысячелетний ряд имеет слишком грубое временное разрешение и поэтому не может быть использован для детального анализа климата в масштабе десятков и сотен лет. Детальный климатический ряд, полученный по данным мелких скважин и глубоких шурфов, охватывает лишь последние 300 лет (*Екайкин А.А., Козачек А.В., Липенков В.Я., Шибачев Ю.А.* Multiple climate shifts in the Southern Hemisphere over the past three centuries based on central Antarctic snow pits and core studies // *Annals of Glaciology*. 2014. V. 55. № 66. P. 259–266).



Бурение скважины VK16 в районе ст. Восток в сезон 63-й РАЭ

В связи с этим Лаборатория изменений климата и окружающей среды ААНИИ начала новый проект мелкого бурения льда в районе станции Восток с целью получения детального климатического ряда длиной 2000 лет. Для достижения этой цели необходимо пробурить минимум 3 скважины глубиной 70 м и исследовать добытый ледяной керн.

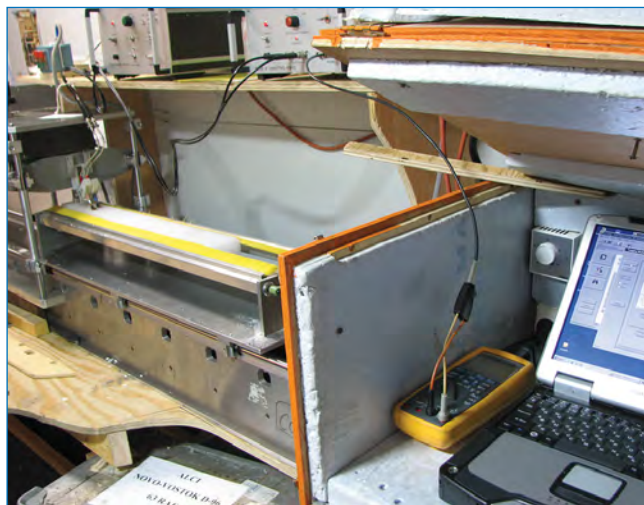
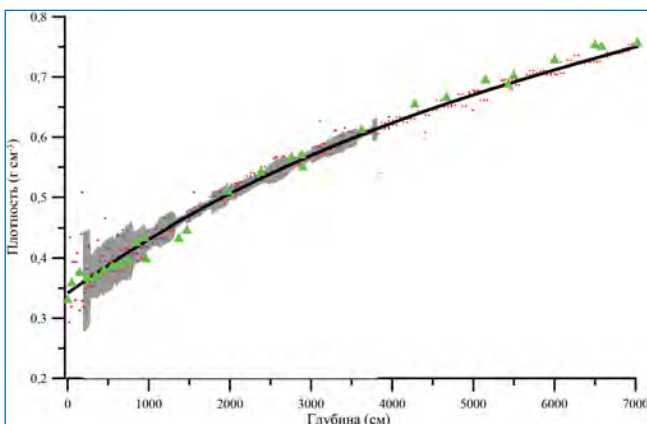
Бурение первой скважины VK16 было начато в сезон 62-й РАЭ (декабрь 2016 — январь 2017 года). Для буровых работ мы использовали легкую механическую буровую установку (т.н. «бур Пурше»), предоставленную нашими французскими коллегами из гляциологической лаборатории г. Гренобля и ранее успешно испытанную при бурении 20-метровой скважины в районе мегадюн (*Ekykin A.A., Eberlein L., Lipenkov V. Ya., Popov S., Scheinert M., Schr der L., Turkeev A. Non-climatic signal in ice core records: lessons from Antarctic megadunes // The Cryosphere. 2016. V. 10. P. 1217–1227*). В первый сезон удалось пробурить всего лишь 26 м. Причиной относительно низкой производительности труда стала эпидемия гриппа, сразившая всех членов гляциобурового отряда, из-за которой количество рабочих дней было существенно сокращено.

В сезон 63-й РАЭ (декабрь 2017 — январь 2018 года) бурение было возобновлено, а 15 января 2018 года успешно закончено на глубине 70,2 м. Возраст фирна на этой глубине приблизительно равен 2200 лет.

В общей сложности был выполнен 161 буровой рейс, средний выход керна составил около 44 см за рейс.

Плотность кернов VK16 и VK18 (красные и синие точки).

Серая заливка — доверительный интервал значений плотности, а черная кривая — аппроксимирующая функция. Зелеными треугольниками показан сводный профиль плотности по ранее опубликованным данным (*Lipenkov V. Ya., Salamatin A.N., Duval P. Bubbly-ice densification in ice sheets: II. Application // J. Glaciol. 1997. № 43 (145). P. 397–407.*)



Измерение электропроводности керна VK16

25 января 2018 года было начато бурение второй скважины, VK18. За четыре буровых дня было выполнено 66 буровых рейсов, и 29 января 2018 года глубина скважины достигла 40,2 м. Таким образом, средний выход керна составил около 61 см за рейс.

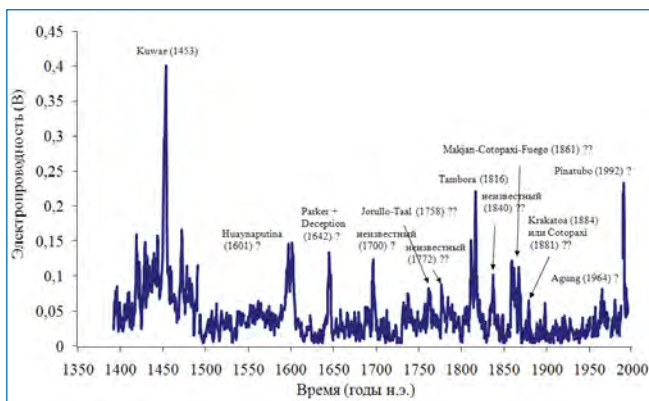
После этого скважина VK18 была законсервирована, работа в ней будет продолжена в сезон 64-й РАЭ.

Почему же для изучения палеоклимата нам необходимо бурить несколько скважин? Почему недостаточно обойтись анализом всего лишь одного керна? Дело в том, что измеряемые по керну характеристики содержат не только климатический сигнал, но и т.н. «стратиграфический шум» (*Ekykin A.A., Kozachek A.V., Lipenkov V. Ya., Shibaev Yu.A. Multiple climate shifts in the Southern Hemisphere over the past three centuries based on central Antarctic snow pits and core studies // Annals of Glaciology. 2014. V. 55. № 66. P. 259–266*), причем доля этого шума может составлять 80–90 % от общей дисперсии ряда. Наличие этого шума не позволяет изучать климатическую изменчивость с периодом колебаний меньше нескольких сотен лет. Чтобы надежно разделить сигнал и шум, нужно минимум три параллельных ряда.

Извлеченный из скважины фирновый керн частично обрабатывается в гляциологической лаборатории станции Восток. Прежде всего точно измеряется общая длина керна и определяется плотность каждого его куска. Данные по плотности в дальнейшем позволяют рассчитать временную изменчивость скорости снегонакопления.

Затем с поверхности керна срезается тонкий слой фирна, который режется на 10-сантиметровые куски, — этот материал пойдет на изучение изотопного состава керна — концен-

Запись электропроводности по керну VK16 с идентификацией наиболее крупных вулканических пиков



трации тяжелых молекул  $H_2^{18}O$  и  $HD^{16}O$ . Измерение изотопного состава занимает центральное место при анализе любых фирновых и ледяных кернов, поскольку позволяет реконструировать изменение температуры воздуха в прошлом (Екайкин А.А. Стабильные изотопы воды в гляциологии и палеогеографии: Методическое пособие. СПб.: ААНИИ, 2016. 63 с.).

Далее по плоскому срезу керна измеряется электропроводность льда.

Электропроводность фирново-ледяных отложений Антарктиды — комплексный параметр, который характеризует валовую концентрацию химических примесей. Последняя, в свою очередь, может определяться несколькими факторами, например расстоянием до источника морских ионов (площадью морского льда вокруг Антарктики) и интенсивностью атмосферной циркуляции. Кроме того, в записи электропроводности отчетливо видны пики, связанные с отложением продуктов вулканических извержений.

Таким образом, измерение электропроводности керна — мощный инструмент, который позволяет надежно датировать слои фирна в том случае, когда есть возможность идентифицировать тот или иной пик.

Так, в керне VK16 удалось надежно определить положение пиков вулканов Тамбора (1816 год), Хуайнапутина (1601 год) и Куваэ (1453 год), а также еще несколько более мелких извержений, что позволило выполнить датировку керна.

Более того, кросс-корреляция записей электропроводности нескольких кернов позволяет создать единую для них хроностратиграфическую шкалу.

После измерения электропроводности остаток керна VK16 был частично вывезен в Россию для химических анализов (они будут выполнены в Лимнологическом институте ЛИН СО РАН, г. Иркутск), а частично — оставлены в кернохранилище станции Восток.

Изотопные пробы керна VK16, добытые в сезон 62-й РАЭ, были доставлены в Санкт-Петербург в 2017 году и уже проанализированы в ЛИКОС ААНИИ. Пробы сезона 63-й РАЭ на момент написания этой заметки находились на борту НЭС «Академик Федоров». В июне 2018 года они должны быть доставлены в ААНИИ, после чего начнется их измерение.

В целом этот проект продлится еще 2–3 года, и его результатом будет не только надежная детальная реконструкция климата Центральной Антарктиды за последние 2 тыс. лет, но и оценка соотношения сигнала и шума в вариациях изотопного состава снежно-фирновых отложений.

*Мы благодарим за помощь при выполнении полевых работ сотрудников РАЭ Виталия Заровчатского, Максима Зюкова и Сергея Пряхина.*

*А.А. Екайкин, В.Я. Липенков (ААНИИ), А.В. Туркеев (РАЭ).  
Фото А.А. Екайкина*

## ПОИСКИ И ИССЛЕДОВАНИЯ ДРЕВНЕЙШЕГО ЛЬДА ЗЕМЛИ

Многочисленные результаты исследований колонок морских донных осадков свидетельствуют о том, что примерно 1 млн лет назад на Земле произошло изменение моды глобальных осцилляций климата, которое заключалось в переходе от 40-тысячелетней периодичности в смене ледниковых и межледниковых эпох к 100-тысячелетней, с более амплитудными климатическими колебаниями. Причины, которые в середине плейстоцена вызвали перестройку климатической системы нашей планеты (в англоязычной литературе — *Mid Pleistocene Transition*, или МРТ), остаются неизвестными. По-видимому, они кроются в природе малоизученных обратных связей между климатом, криосферой и углеродным циклом. Одна из наиболее общепринятых гипотез объясняет МРТ нелинейной реакцией ледниковых покровов на медленное продолжительное похолодание климата, вызванное постепенным понижением концентрации  $CO_2$  в атмосфере. По мнению климатологов, решение проблемы МРТ станет прорывом в понимании роли углеродного цикла в глобальных изменениях климата в широком диапазоне природных условий, существовавших на Земле в далеком прошлом, и, как следствие, приведет к повышению точности оценок современного антропогенного воздействия на климат планеты.

Для изучения причин и механизмов перестройки климатической системы в середине плейстоцена необходимо иметь количественные данные об изменении климата и газового состава атмосферы за последние 1,3–1,5 млн лет. Наиболее надежным и универсальным источником палеоклиматической информации — и единственным прямым источником данных о газовом составе атмосферы в прошлом — являются керны атмосферного льда. Самый длинный на сегодняшний день палеоклиматический ряд был получен по керну скважины, пробуренной в Антарктиде в рамках европейского проекта EPICA на Куполе С (станция Конкордия). Возраст ледяных от-

ложений, вскрытых скважиной, достигает здесь 800 тыс. лет. Вместе с тем ученые полагают, что в основании восточноантарктического ледникового покрова, в отдельных его районах, должен сохраняться значительно более древний атмосферный лед с ненарушенным залеганием ледяных слоев, возраст которых может достигать 1,5 млн лет.

Начиная с 2004 года поиск и исследование древнего льда в Антарктиде (The Oldest Ice Project, см. <http://pastglobalchanges.org/ini/end-aff/ipics/documents>) занимают первое место в ряду приоритетных задач международного гляциологического сообщества, сформулированных Координационным комитетом «Международное партнерство в исследованиях ледяных кернов» (*International Partnership in Ice Core Science* — IPICS), входящим в рабочую группу по физическим наукам Научного комитета по антарктическим исследованиям (*SCAR Physical Sciences Group*). Реализация этого проекта позволила бы ответить на многие из научных вопросов, которые были определены SCAR с помощью методики «сканирования горизонтов» в качестве основных для изучения Антарктики и Южного океана на период до 2035 года.

Наиболее перспективными районами для поиска древнего льда считаются ближайшие окрестности крупнейших ледниковых куполов Восточной Антарктиды — А, В, С и F и седловины ледоразделов в местах, которые характеризуются умеренной мощностью ледникового покрова (порядка 2500 м), плоским рельефом подледникового ложа, близкой к нулевой скоростью горизонтального движения льда, отсутствием донного таяния и низкой скоростью аккумуляции ледяных отложений. Поиском мест с таким набором условий в настоящее время активно занимаются европейские, американские, австралийские, японские и китайские ученые.

В антарктический сезон 2010/11 года китайские специалисты приступили к осуществлению национального проекта