

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.

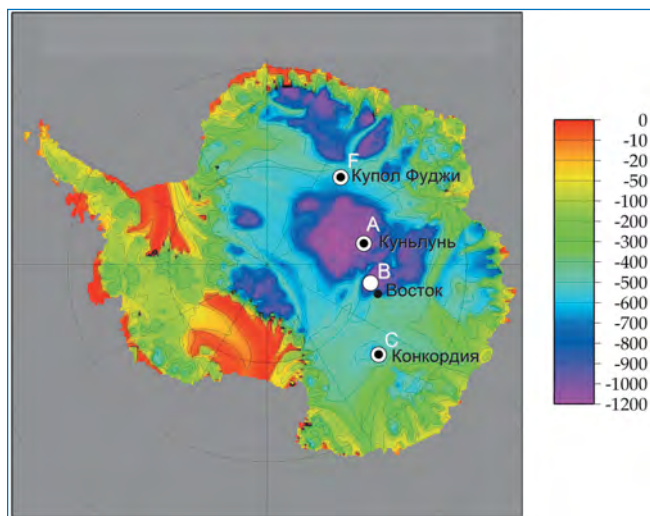
Для изучения причин и механизмов перестройки климатической системы в середине плейстоцена необходимо иметь количественные данные об изменении климата и газового состава атмосферы за последние 1,3–1,5 млн лет. Наиболее надежным и универсальным источником палеоклиматической информации — и единственным 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



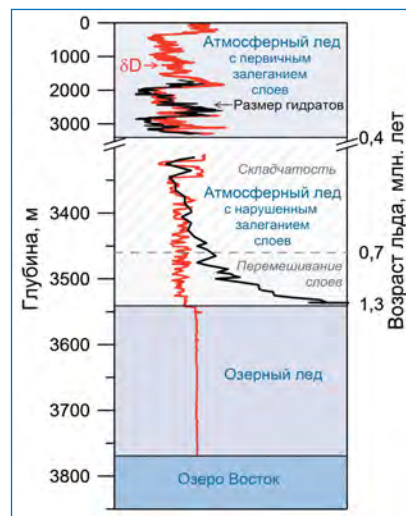
Расчетный возраст льда в нижнем 50-метровом слое антарктического ледниково-го покрова, ледниковые купола (А, В, С, F) и антарктические станции, на которых производится или планируется бурение на древний лед. Карта возраста льда заимствована из документов IPICS (<http://pastglobalchanges.org/init/end-aff/ipics/documents>), шкала возраста дана в тыс. лет

глубокого бурения льда в районе труднодоступного Купола А (станция Куьлуьнь). К настоящему времени скважина достигла глубины 800 м. Весь полученный ледяной керн вывезен из Антарктиды в шанхайский Институт полярных исследований, но изучение его пока не начато.

Американские ученые предпринимают попытки получить предварительную информацию о газовом составе атмосферы Земли во время и до МРТ, изучая древний голубой лед, обнаруженный в Трансантарктических горах в районе Аллан Хиллс (Allan Hills) вблизи американской антарктической базы Мак-Мёрдо. Возраст этого льда достигает 1 млн лет, а по последним сообщениям — даже 2,7 млн лет, если доверять аргонным датировкам. Однако особенности залегания голубого льда таковы, что он позволяет получить только снимок состояния атмосферы в далеком прошлом с весьма неопределенной временной привязкой.

В 2016 году консорциум четырнадцати научно-исследовательских организаций из 10 европейских стран начал реализацию предварительной фазы проекта Beyond EPICA — Oldest Ice (BE-OI). В работах на правах партнеров участвуют американские, австралийские и японские ученые. На осуществление предварительного этапа этого проекта в 2016–2019 годах выделено значительное финансирование из новой европейской рамочной программы «Горизонт 2020». Научная программа первого этапа включает проведение рекогносцировочных работ в Антарктиде, развитие новых методов датирования и аналитических исследований льда, а также создание новых технологий и технических средств для быстрого получения предварительной информации о строении, составе и возрасте ледниковой толщи. В рамках проекта BE-OI ведется поиск древнейшего льда в окрестностях антарктических куполов С (район франко-итальянской станции Конкордия) и F (район японской станции Купол Фуджи). В соответствии с текущими планами консорциума BE-OI керновое бурение глубокой скважины на древний лед в 40 км к юго-западу от Купола С может стартовать уже в 2019–2020 годах.

Как видим, области поиска древнего льда и места, уже выбранные для осуществления национальных и международных проектов глубокого бурения, находятся в непосредственной близости от антарктических станций. Это связано с тем, что до сих пор доминирующим критерием при выборе районов исследований является их логистическая доступность.



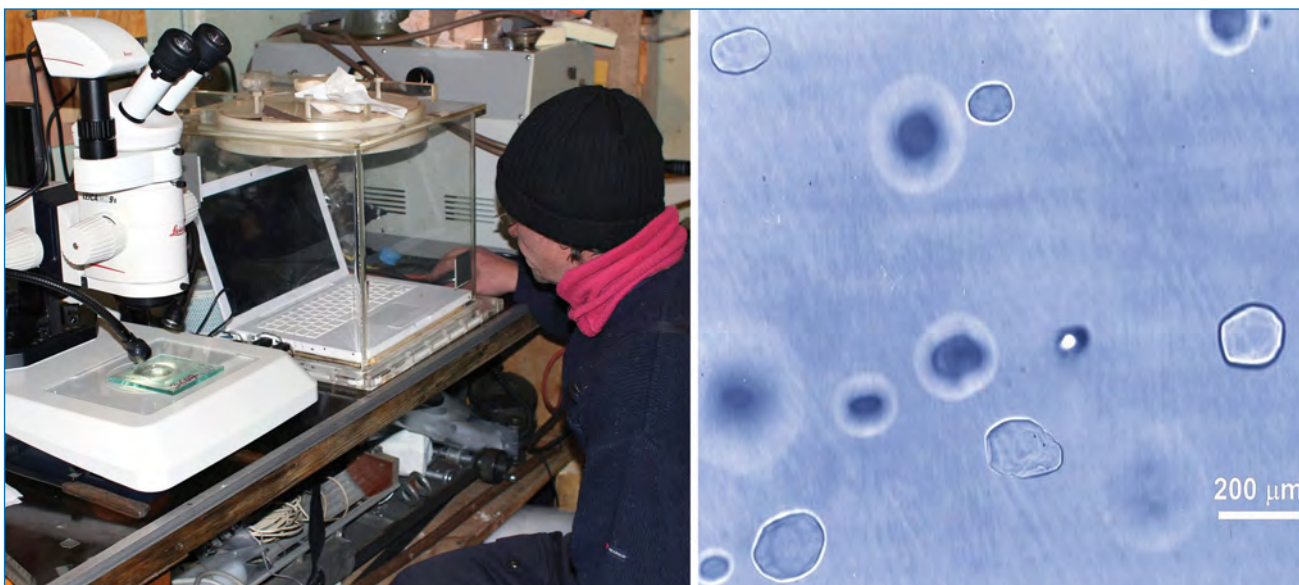
Вертикальное строение ледника в районе станции Восток

В окрестностях Купола В, который расположен примерно в 260 км от станции Восток и, следовательно, близок к району научной и логистической деятельности Российской антарктической экспедиции, систематические работы, направленные на поиск древнего льда, пока не проводились. Вместе с тем результаты исследований ледяного керна, добытого на станции Восток, свидетельствуют о том, что именно здесь шансы обнаружить атмосферный лед, возраст которого существенно превышает 1 млн лет, наиболее велики.

В разрезе ледника, вскрытом скважиной на станции Восток, выделяются три участка. Верхние 3310 м разреза представляют собой атмосферный лед с первичным залеганием слоев. Эта часть ледниковой толщи, легко датируемая традиционными методами, содержит уникальную информацию о прошлых изменениях климата и газового состава атмосферы за последние 420 тыс. лет. В интервале глубин 3310–3539 м ледниковый покров сложен атмосферным льдом, испытавшим складчатые деформации и перемешивание слоев в придонной части ледника. Наконец, глубже 3539 м залегают 230-метровая толща водного (озерного) льда, наросшего снизу на подошву ледника за время его движения над подледниковым озером Восток.

Очевидно, что атмосферный лед, залегающий в интервале глубин 3310–3539 м, должен быть значительно старше ледяных отложений, слагающих вышележащую толщу ледника. Однако датировать этот лед с помощью традиционных методов, используемых в гляциологии, не представляется возможным из-за частично нарушенной возрастной последовательности залегания слоев. Для оценки возраста ледяного керна в этом интервале было предложено использовать явление роста кристаллических включений гидратов воздуха во льду, впервые обнаруженное и изученное в «восточном» керне. Детальные микроскопические исследования гидратов воздуха, проведенные по кернам Восток и Конкордия в холодной гляциологической лаборатории станции Восток, показали, что в наиболее древних (старше 400 тыс. лет) и теплых (с температурой выше  $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) придонных слоях антарктического ледника средний радиус гидратных включений увеличивается линейно с возрастом льда.

Для интерпретации экспериментальных данных была разработана математическая модель, которая описывает эволюцию распределения гидратов по размерам во времени и, следовательно, позволяет оценивать приращение возраста гидратов по экспериментальным данным об их геометрических характеристиках. С помощью этой модели и данных о размере гидратов в керне со станции Восток был оценен максимальный возраст атмосферного льда в этом районе антарктического ледникового покрова, который составил  $1,3 \pm 0,17$  млн



Микроскопические исследования кристаллических включений гидратов воздуха в шлифах древнего льда в холодной гляциологической лаборатории станции Восток

лет. Совсем недавно эта «гидратная» датировка «восточного» керна была подтверждена результатами абсолютного датирования, сделанного по содержанию космогенного изотопа криптон-81 в экстрагированном из льда атмосферном воздухе (материал готовится к публикации). Таким образом, теперь есть все основания утверждать, что имеющийся в распоряжении российских исследователей ледяной керн со станции Восток является на сегодняшний день самым древним и, более того, единственным полученным в Восточной Антарктиде керном, возраст льда в котором превышает 1 млн лет.

Комплексные исследования древнего атмосферного льда со станции Восток проводятся в настоящее время в Лаборатории изменений климата и окружающей среды (ЛИКОС) ААНИИ при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект РНФ 18-17-00110 «Исследование причин перестройки климатической системы Земли в середине плейстоцена по данным кернов древнего льда Антарктиды»). Научная программа проекта, рассчитанная на три года (2018–2020), предусматривает проведение структурных, изотопных и газовых анализов имеющихся ледяных кернов из скважин 5Г-1 и 5Г-3 с целью получения первых данных об изменении климата и газового состава атмосферы в период времени от 1,3 млн до 0,8 млн лет назад. Ожидается, что успешное выполнение этой

Изотопные исследования керна древнего льда со станции Восток в ЛИКОС ААНИИ



программы поможет лучше понять генезис МРТ, а также внесет существенный вклад в разработку новых методов датирования и исследования кернов древнего антарктического льда еще до старта крупного международного проекта глубокого бурения в районе Купола С.

Логическим продолжением этих работ, в случае пролонгации проекта РНФ на 2021–2022 годы, могло бы стать проведение непрерывных исследований строения и состава древней ледяной породы и заключенного в ней атмосферного воздуха с высоким разрешением по глубине и возрасту. Для реализации такой программы необходимо отобрать новый, непрерывный керн по всей толще древнего атмосферного льда, что можно сделать путем забуривания нового бокового ствола глубокой скважины на станции Восток с глубины примерно 3300 м.

Наличие льда возрастом более 1 млн лет под станцией Восток означает, что в районе Ледораздела В, откуда берет начало линия тока льда, проходящая через скважину 5Г, может залежать еще более древний антарктический лед с ненарушенной стратиграфией. В связи с этим весьма актуальным является осуществление комплексного гляцио-геофизического похода на Ледораздел В с целью детального исследования района Купола В и выбора наиболее подходящего места для реализации будущего проекта глубокого бурения антарктического ледника на древний лед. Программа походных исследований должна предусматривать радарное профилирование снежной и ледяной толщ ледника по маршруту похода и в окрестностях ледораздела, измерение скорости и направления движения льда, определение изотопного состава и скорости аккумуляции снега, а также бурение мелкой скважины на ледоразделе с последующим исследованием керна. Полученные данные будут использованы для моделирования распределений возраста льда по глубине на различных участках ледника вблизи ледораздела.

Успешное выполнение текущего проекта РНФ и создание — за счет заблаговременного проведения соответствующих полевых работ — задела для продолжения этих исследований в ЛИКОС ААНИИ обеспечит российским ученым достойное место в складывающейся системе национальных и международных проектов изучения древнейшего льда планеты, которые будут занимать центральное место в антарктических программах в ближайшие 15–20 лет.

*В.Я. Липенков (ААНИИ).  
Фото автора*