

Экспресс-информация

УДК 551.32

doi:10.15356/2076-6734-2017-1-133-141

Эволюция климата, оледенения и подледниковой среды Антарктиды по данным исследований ледяных кернов и проб воды озера Восток (Основные итоги работ по проекту РФФИ, 2014–2016 гг.)

© 2017 г. В.Я. Липенков^{1*}, А.А. Екайкин^{1,2}, И.А. Алехина¹, Ю.А. Шибяев¹, А.В. Козачек¹, Д.О. Владимирова¹, Н.И. Васильев³, А.В. Преображенская¹

¹Арктический и Антарктический научно-исследовательский институт, Санкт-Петербург, Россия;

²Институт наук о Земле, Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия;

³Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия

*lipenkov@aari.ru

Evolution of climate, glaciation and subglacial environments of Antarctica from the deep ice core and Lake Vostok water sample studies (Key results of implementation of the Russian Science Foundation project, 2014–2016)

V.Ya. Lipenkov^{1*}, A.A. Ekaykin^{1,2}, I.A. Alekhina¹, Yu.A. Shibaev¹, A.V. Kozachek¹, D.O. Vladimirova¹, N.I. Vasilev³, A.V. Preobrazhenskaya¹

¹Arctic and Antarctic Research Institute, St. Petersburg, Russia;

²Institute of Earth Sciences, St. Petersburg State University, St. Petersburg, Russia;

³St. Petersburg Mining University, St. Petersburg, Russia

*lipenkov@aari.ru

Received August 21, 2016

Accepted November 14, 2016

Keywords: *development, environment, geochemical methods, ice cores, paleoclimate, research laboratory, Russian Science Foundation.*

Summary

Work on the project focused on the following five areas: 1) field works in Antarctica at Vostok and Concordia stations; 2) experimental and theoretical studies in the field of ice core and paleoclimate research; 3) experimental and theoretical works related to the exploration of subglacial Lake Vostok; 4) development of technology and drilling equipment for deep ice coring and exploration of subglacial lakes; 5) upgrading the analytical instrumentation in the Climate and Environmental Research Laboratory (CERL) of the Arctic and Antarctic Research Institute. The main achievements in the field of ice core and paleoclimate research include 1) further elaboration of a new method of ice core dating, which is based on the link between air content of ice and local insolation, 2) investigation of the possible applications of the ¹⁷O-excess measurements in ice core to the paleoclimate research, 3) a better understanding of the mechanisms of the formation of relief-related variations in the isotopic content of an ice core drilled in the area of Antarctic megadunes, and 4) obtaining the first reliable data set on the variations of the ¹⁷O-excess in the Vostok core corresponding to marine isotope stage 11. As part of our studies of subglacial Lake Vostok, we have obtained a large body of new experimental data from the new ice core recovered from the 5G-3 borehole to the surface of the subglacial lake. Stacked profiles of isotopic composition, gas content and the size and orientation of the ice crystals in the lake ice have been composed from the data of three replicate cores from boreholes 5G-1, 5G-2 and 5G-3. The study reveals that the concentration of gases in the lake water beneath Vostok is unexpectedly low. A clear signature of the melt water in the surface layer of the lake, which is subject to refreezing on the icy ceiling of Lake Vostok, has been discerned in the three different properties of the accreted ice (the ice texture, the isotopic and gas content of the ice). These sets of data indicate in concert that poor mixing of the melt (and hydrothermal) water with the resident lake water and pronounced spatial and/or temporal variability of local hydrological conditions are likely to be the characteristics of the southern end of the lake. A considerable part of the funding allocated by the RSF to this project was used for upgrading the analytical instrumentation for ice core studies in the CERL of AARI. Using this grant, we purchased and started working with the Picarro L-2140i, a new-generation laser mass analyzer, and set the upgraded mass spectrometer Delta V Plus into operation. The new equipment was used to carry out research planned as part of the project, including the setting up and carrying out of new measurements of ¹⁷O in ice cores.

Поступила 21 августа 2016 г.

Принята к печати 14 ноября 2016 г.

Ключевые слова: геохимические методы, ледяные керны, научно-исследовательская лаборатория, окружающая среда, палеоклимат, развитие, Российский научный фонд.

Изложены основные результаты работ, выполненных Лабораторией изменений климата и окружающей среды ААНИИ по проекту Российского научного фонда в 2014–2016 гг. Показано, что поддержка фонда способствовала получению научных результатов международного уровня в двух приоритетных направлениях антарктических исследований – реконструкции палеоклимата по ледяным кернам и изучении подледниковой среды Антарктиды.

Введение

В 2014 г. Лаборатория изменений климата и окружающей среды (ЛИКОС) ААНИИ Росгидромета получила грант Российского научного фонда (РНФ) по конкурсу «Проведение фундаментальных и поисковых научных исследований коллективами существующих научных лабораторий». Работы по проекту 14-27-00030 «Эволюция климата, оледенения и подледниковой среды Антарктиды по данным исследований ледяных кернов и проб воды озера Восток» были запланированы и проводились по пяти основным направлениям [1]: 1) развитие аналитической базы исследований в ЛИКОС ААНИИ; 2) планирование и осуществление полевых работ в Антарктиде на внутриконтинентальных станциях Восток и Конкордия; 3) лабораторные и теоретические исследования в области изучения ледяных кернов и палеоклимата; 4) экспериментальные и теоретические исследования, связанные с изучением подледникового озера Восток; 5) совершенствование технологии и технических средств глубокого бурения льда, вскрытия и исследования подледниковых водоёмов. Последний пункт программы проекта выполнялся в сотрудничестве с Санкт-Петербургским горным университетом. В этой статье мы даём обзор наиболее значимых результатов выполнения проекта, полученных в 2014–2016 гг.

Развитие аналитической базы исследований

Значительная часть гранта использована для дальнейшего развития приборной базы ЛИКОС. Основной масс-спектрометр лаборатории Delta V Plus был доукомплектован системой двойного напуска, периферийным оборудованием GasBench II и системой ввода проб Multiport. Выполненная модернизация позволи-

ла расширить возможности масс-спектрометра при проведении таких наиболее востребованных анализов ледяных кернов, как измерения δD , $\delta^{18}O$, ^{17}O -excess в пробах воды, а также O_2/N_2 и $\delta^{18}O$ в атмосферном воздухе, экстрагированном из льда. Закуплен и введён в эксплуатацию лазерный масс-анализатор нового поколения Picarro L-2140i, который стал первым в России прибором, работающим по технологии WS-CRDS с возможностью измерения изотопа ^{17}O (рис. 1). Сотрудниками лаборатории разработана и стала применяться для выполнения задач проекта методика измерения ^{17}O -excess, позволяющая определять значение этого параметра в исследуемом образце с погрешностью 5–6 ppm. На средства гранта в ЛИКОС создаются универсальная установка STAN-2, предназначенная для экстракции атмосферного воздуха из льда с целью измерения его общего содержания и последующего масс-спектрометрического исследования, а также автоматизированная линия подготовки проб воды для измерений ^{17}O -excess на масс-спектрометре Delta V Plus с производительностью до десяти образцов в сутки и точностью до 2 ppm.

Расширение приборной базы лаборатории и возросший опыт её персонала способствовали не только успешному выполнению научных задач проекта, но и росту авторитета ЛИКОС ААНИИ в области исследований стабильных изотопов воды в нашей стране и за рубежом. ЛИКОС регулярно участвует в международных межлабораторных калибровках изотопного оборудования (International Water Isotope Inter-Comparison Test – WICO), проводимых Лабораторией изотопной гидрологии Международного агентства по атомной энергии (МАГАТЭ). Оценка качества изотопных измерений, проводимых в ЛИКОС, по результатам проверки в 2016 г. составила 12 баллов из 12 возможных. С 2015 г. лаборатория проводит ежегодный ра-



Рис. 1. Приборное оснащение ЛИКОС ААНИИ обеспечивает отличное качество и высокую производительность изотопных исследований, позволяет анализировать до 170 образцов в день на содержание дейтерия и ^{18}O и до двух образцов в день, если необходимо дополнительно измерить концентрацию ^{17}O

Fig. 1. Instruments available at CERL AARI allow high-precision measurements of up to 170 samples per day for deuterium and ^{18}O content to be made, and up to 2 samples per day if ^{17}O content also has to be measured

бочий семинар ЛИКОС «Применение лазерных анализаторов изотопного состава в науках о Земле», на котором встречаются и обмениваются опытом десятки специалистов из различных российских научно-исследовательских университетов и представители ведущих компаний-изготовителей изотопного оборудования – Thermo, LosGatos и Picarro.

Полевые работы

Полевые работы по программе проекта вели на двух антарктических станциях – российской станции Восток и франко-итальянской станции Конкордия. На ст. Восток выполнялся мониторинг состояния буровой скважины до, во время и после повторного вскрытия оз. Восток. Полученные геофизические и гляциологические данные использовались для совершенствования технологии вскрытия подледникового водоёма и разработки технических решений для прямых исследований водной толщи озера через существующую скважину. Параллельно с бурением выполнялись непрерывные петроструктурные исследования вновь полученного ледяного керна и отбор образцов льда для запланирован-

ных изотопных, газовых, химических и биологических анализов в ЛИКОС ААНИИ. С целью изучения механизма формирования климатических и рельефообусловленных сигналов в изотопном составе ледяных кернов разработана и реализована специальная программа гляциологических исследований в районе антарктических мегадюн, расположенных в 30 км к востоку от ст. Восток. Она предусматривала изучение пространственной изменчивости накопления и изотопного состава поверхностного снега по профилю, заложенному вкрест простирания мегадюн, а также бурение 20-метровой скважины с отбором и исследованием снежного керна.

В задачу гляциологических работ на ст. Конкордия входили: мониторинговые наблюдения за скоростью накопления и изотопным составом снега; проведение полевых экспериментов по изучению постдепозиционных изменений изотопного состава снежной толщи; стратиграфические и изотопные исследования в шурфе глубиной 6 м. Цель этих работ – сравнение вклада рельефообусловленных и климатических сигналов в профиле изотопного состава снежной толщи в районах антарктических станций Восток и Конкордия. Экспедиционные затраты, связанные с работой участников проекта на ан-

тарктических станциях, финансировались по статье операционных расходов Российской антарктической экспедиции и по линии международного сотрудничества в рамках российско-французской Международной ассоциированной лаборатории «Ледниковые архивы данных о климате и окружающей среде», в состав которой входит ЛИКОС ААНИИ.

Изучение ледяных кернов и палеоклимата

По данным о газосодержании ледяных кернов, полученных на антарктических станциях Восток, Конкордия и Купол Фуджи, оценён вклад различных составляющих в общую изменчивость газосодержания рекристаллизационного льда. Установлено, что высотный сигнал в рядах газосодержания составляет не более 3%, температурный – от 8 до 10%, инсоляционный – не менее 55%, а на долю стратиграфической составляющей и экспериментальных погрешностей приходится в сумме от 22 до 34% общей изменчивости этой характеристики керна. Таким образом, газосодержание рекристаллизационного льда – надёжный индикатор изменения местной инсоляции, и его можно использовать для построения орбитальных шкал возраста ледяных кернов. Разработан алгоритм построения таких шкал и исследована их погрешность [2]. Показано, что стандартная ошибка возраста льда, определённого путём совмещения предварительно датированных рядов газосодержания льда с рассчитанными по уравнениям небесной механики рядами местной инсоляции, не превышает $\pm 2,0$ тыс. лет, т.е. близка к случайной погрешности оптимизированной временной шкалы AICC2012, разработанной ранее для пяти пунктов глубокого бурения в Антарктиде и Гренландии [3].

Впервые в мировой практике выполнены измерения ^{17}O -excess в интервале глубокого керна ст. Восток, соответствующем морской изотопной стадии МИС-11 (около 400 тыс. л.н.). Показано, что изменения ^{17}O -excess происходили синхронно с изменениями изотопного состава льда. Более того, временной ход ^{17}O -excess в МИС-11 практически идентичен временному ходу этой характеристики льда в МИС-1 (голоцен). Новые данные помогут реконструировать историю кли-

мата в эпоху МИС-11 и лучше понять механизм перехода от оледенения к межледниковью.

Изучение пространственной изменчивости скорости накопления и изотопного состава снега в районе антарктических мегадюн позволило лучше понять механизм формирования неклиматических рельефообусловленных вариаций во временных рядах характеристик ледяных кернов [4]. Исследования показали, что значительная пространственная изменчивость изотопного состава поверхностного снега, характерная для этого района Антарктиды, связана с разной интенсивностью постдепозиционных процессов, меняющих первоначальный изотопный состав снега в различных частях снежных дюн. Данные о пространственной изменчивости характеристик снега, скорости перемещения дюн и климатических вариациях изотопного состава снега в этом районе [5] использованы для моделирования вертикального профиля изотопного состава снежной толщи (рис. 2). Одновременно, по керну пробуренной здесь скважины, впервые были получены экспериментальные данные о стратиграфии, возрасте и изотопном составе снежно-фирновых отложений в районе мегадюн до глубины 20 м. Достаточно хорошее совпадение модельного и экспериментального изотопных профилей, которое можно наблюдать на рис. 2, г, свидетельствует о правильности представлений о механизме формирования изотопного профиля снежной толщи, которые были заложены в модель.

Исследования подледникового озера Восток

В ходе выполнения проекта детально проанализирован опыт первого вскрытия оз. Восток 6 февраля 2012 г. [6]. Разработаны рекомендации, благодаря которым удалось успешно контролировать движение озёрной воды и буровой жидкости (смесь керосина и фреона) в скважине во время повторного вскрытия озера, выполненного 25 января 2015 г. В этот раз озёрная вода поднялась в скважине на близкую к расчётной высоту 61 м от поверхности озера, а подъём заливочной жидкости был остановлен на расстоянии 45 м от устья скважины. Вместе с тем, как и в первом случае (6 февраля 2012 г.), повторное бурение скважины показало, что в зоне перемешивания буровой жидкости и озёрной воды об-

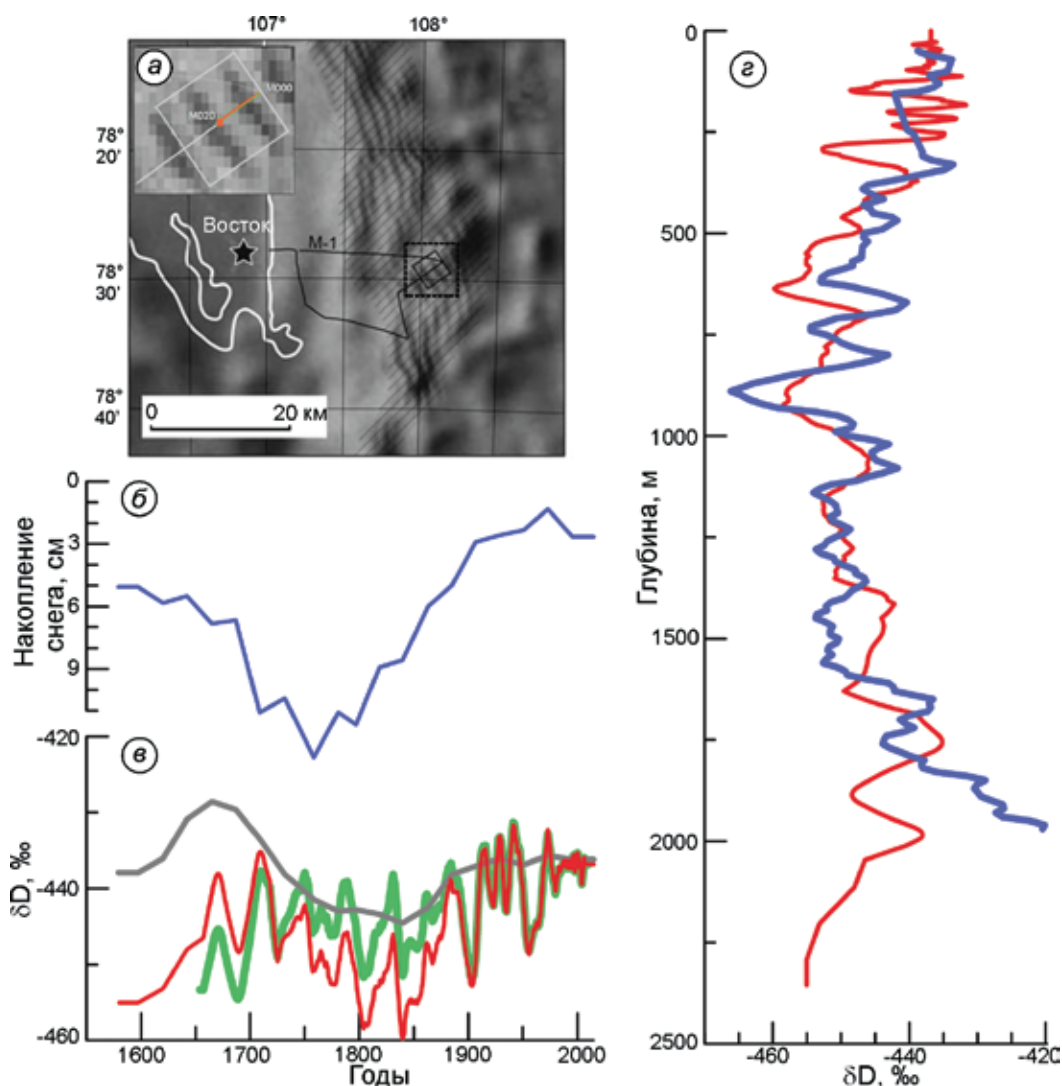


Рис. 2. Моделирование вертикального профиля изотопного состава снежно-фирновых отложений в районе антарктических мегадюн [4]:

a – район антарктических мегадюн (30 км к востоку от ст. Восток), в котором проводились маршрутные гляциологические исследования и бурение 20-метровой скважины с отбором керна; *б* – расчётное изменение аккумуляции в пункте бурения в результате миграции мегадюн; *в* – расчётное изменение изотопного состава снега в пункте бурения в результате миграции мегадюн (бежевая линия), климатическая изменчивость изотопного состава снега в этом районе (зелёная линия) [5] и сумма климатического и рельефообусловленного изотопных сигналов в пункте бурения (красная линия); *z* – смоделированные (красная линия) и измеренные по керну (синяя линия) вертикальные профили изотопного состава снежно-фирновой толщи

Fig. 2. Modeling the isotope profile at a drilling site located in the area of Antarctic megadunes [4]:

a – the area of Antarctic megadunes 30 km east of Vostok Station where the glaciological investigations and the 20-meter deep drilling were carried out; *б* – calculated changes in snow accumulation induced by the movement of megadunes across the drilling site; *в* – calculated changes in the isotopic composition of snow induced by the movement of megadunes across the drilling site (beige), climatic variability of the snow isotopic composition in the Vostok region (green) [5], and a time series of the total (climatic and megadune-related) variability of the isotope composition of snow at the drilling site (red); *z* – simulated (red) and measured along the 20-m core (blue) vertical profiles of the firn isotope composition

разуется твёрдое вещество белого цвета, которое после второго вскрытия озера полностью заполнило объём скважины 5Г-3 в интервале глубин 3697,57–3708,12 м (рис. 3).

Исследование образцов этого материала, выполненного методом рентгенофазового анализа в Институте неорганической химии СО РАН (г. Новосибирск), и полученные в полевых усло-

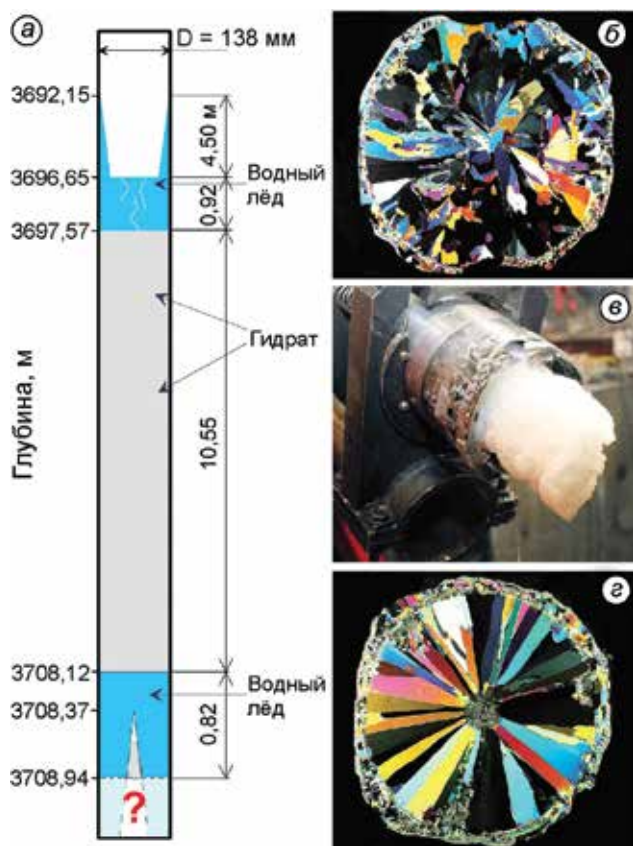


Рис. 3. Гидратная пробка, образовавшаяся в скв. 5Г-3 после второго вскрытия подледникового оз. Восток в январе 2015 г.:

a – положение конжеляционного (водного) льда и гидратного материала в скв. 5Г-3, установленное в результате исследования керна, полученного при повторном бурении скважины; *б* – структура конжеляционного льда над 10-метровой гидратной пробкой (глубина 3697,0 м); *в* – гидратный материал в колонковой трубе бурового снаряда; *г* – структура конжеляционного льда под гидратной пробкой (глубина 3708,5 м)

Fig. 3. A hydrate plug formed in borehole 5G-3 after the second unsealing of subglacial Lake Vostok in January 2015: *a* – the location of the water ice and hydrate matter in borehole 5G-3, as established by studying the core obtained in the course of the borehole redrilling; *b* – the texture of the water ice under a 10-m thick hydrate plug (depth 3697.0 m); *c* – hydrate matter in the ice core barrel of the drill; *d* – the texture of the water ice beneath the hydrate plug (depth 3708.5 m)

виях данные позволили надёжно установить, что он содержит 20–40% клатратного гидрата фреона HCFC-141b, 37–39% керосина и лёд Ih [7]. Гидратная пробка образуется практически мгновенно в зоне контакта буровой жидкости и озёрной воды и, следовательно, может препятствовать отбору проб воды и проведению исследований водной толщи озера. Химический анализ кернов за-

мёрзшей озёрной воды, поднятых из скважины 5Г-1 после первого вскрытия озера, показал, что измеренные концентрации основных ионов достаточно хорошо совпадают с теоретическими значениями, рассчитанными по данным о химическом составе озёрного льда. Вместе с тем общее содержание органических компонентов в замёрзшей озёрной воде достигает 16 мг/л, что свидетельствует о значительном загрязнении изученных образцов буровой жидкостью [8].

В ходе выполнения проекта завершены петроструктурные, газовые и изотопные исследования трёх параллельных кернов озёрного льда, поднятых на станции Восток из скважин 5Г-1, 5Г-2 и 5Г-3 [9, 10]. Анализ полученных данных (рис. 4) с помощью усовершенствованных газовой и изотопной моделей озера позволил уточнить особенности гидрологического режима подледникового водоёма и механизм нарастания озёрного льда на нижнюю поверхность ледника. Установлено, что *озёрный лёд 2*, залегающий глубже 3619 м, формировался путём медленного ортотропного роста ледяных кристаллов в условиях газового и изотопного равновесия с озёрной водой, без заметного участия кристаллов внутриводного льда. Данные о структуре, газосодержании и изотопном составе кернов озёрного льда однозначно и независимо друг от друга показывают, что нарастание льда происходило при существенном вкладе талой воды, поступающей к месту конжеляционного льдообразования из северных участков озера. Все три набора данных указывают на недостаточно интенсивное перемешивание талых и гидротермальных вод с резидентной водой озера и на значительную пространственную и временную (за последние 40 тыс. лет) изменчивость характеристик местного гидрологического режима в южной части озера. Интерпретация результатов измерения газосодержания озёрного льда приводит к выводу, что концентрация атмосферных газов в поверхностном слое воды под ст. Восток значительно меньше теоретически предсказанной предельной концентрации ($1,7\text{--}2,1 \text{ см}^3 \text{ N}_2 \text{ г}^{-1}$, $0,5\text{--}0,7 \text{ см}^3 \text{ O}_2 \text{ г}^{-1}$), соответствующей стационарному газовому режиму озера и равновесию растворённых в воде газов с гидратом воздуха [10]. Таким образом, поверхностный слой озера существенно отличается по своим свойствам от резидентной воды озера и

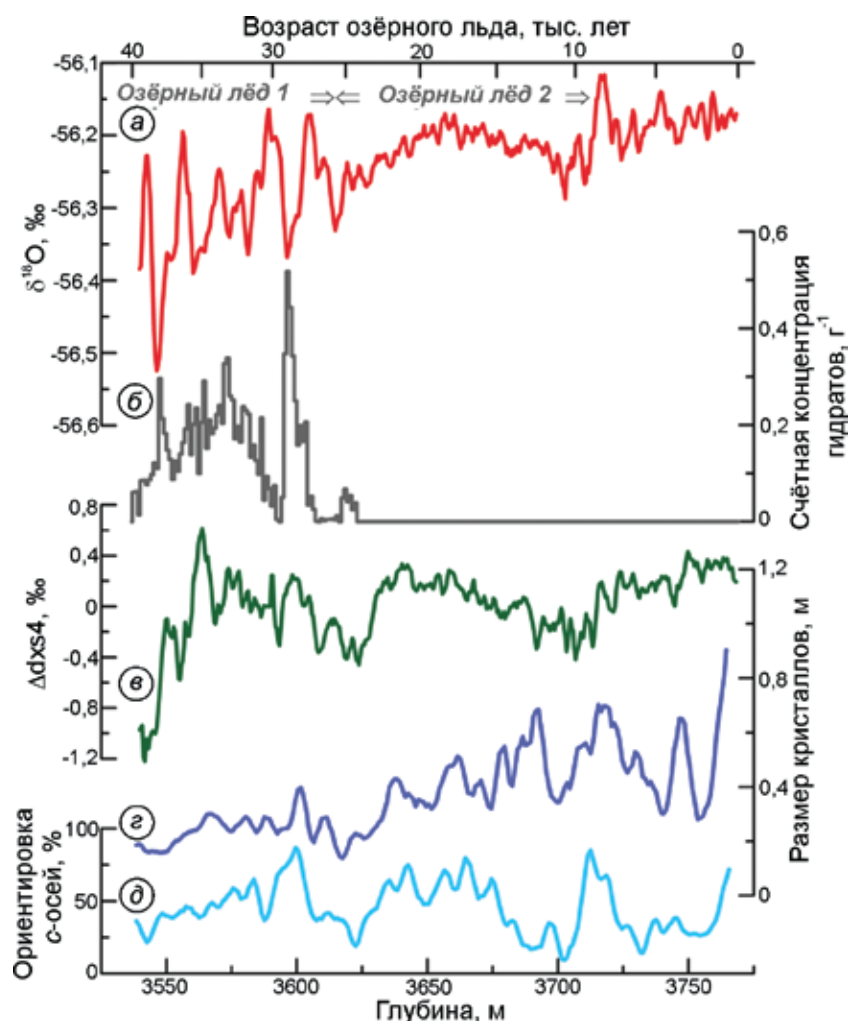


Рис. 4. Изотопные и структурные характеристики конгляционного льда оз. Восток [10]:

a – сводный изотопный ($\delta^{18}\text{O}$) профиль, полученный в результате объединения результатов изотопных исследований параллельных кернов из скв. 5Г-1 и 5Г-2; *b* – счётная концентрация включений газовых гидратов (равна концентрации водных карманов); *v* – изменение по глубине параметра *dxs4*, отражающее изменение изотопного состава озёрной воды (показано в виде отклонения от среднего значения); *z* – размер кристаллов озёрного льда; *d* – доля кристаллов с углом наклона *c*-осей к плоскости нормальной оси керна в пределах $0\text{--}30^\circ$

Fig. 4. Isotopic and physical properties of accreted (lake) ice at Vostok [10]:

a – the $\delta^{18}\text{O}$ stack profile obtained by a combination of measurements performed on the 5G-1 and 5G-2 ice cores; *b* – the number concentration of water pockets (assumed equal to the concentration of gas hydrates); *v* – parameter *dxs4* (a proxy for isotopic composition of lake water) is shown as deviation from its mean value; *z* – the size of the ice crystals; *d* – the fraction of the crystals with a dip angle of their *c*-axes of $0\text{--}30^\circ$

не даёт правильного представления о реальных характеристиках подледникового водоёма.

Буровые технологии

С учётом опыта двух вскрытий озера Восток усовершенствована технология проведения прямых исследований этого подледникового водоёма через существующую скважину на ст. Вос-

ток. Она предполагает значительное расширение нижнего 10-метрового участка скважины специальным механическим снарядом с целью уменьшения амплитуды колебаний уровня воды при спуско-подъёмных операциях и устранения условий, способствующих образованию гидратной пробки. Уточнены последовательность и содержание технологических операций, предшествующих проникновению в озеро и началу его исследований. Усовершенствована конструкция

и определены основные параметры доставочного устройства, которое будет использоваться для спуска к поверхности озера предварительно стерилизованных пробоотборных и измерительных модулей [11]. Разработан эскизный проект бурового снаряда, предназначенного для образования рабочего участка скважины на границе с поверхностью оз. Восток с целью обеспечения заданных условий вскрытия и последующих прямых исследований водной толщи озера. В настоящий момент этот снаряд изготовлен и подготовлен для испытания в глубокой скважине на ст. Восток, которое будет проведено в сезонный период 62-й Российской антарктической экспедиции.

За два с небольшим года работы по гранту РНФ участники проекта опубликовали и подготовили к публикации в общей сложности 20 на-

учных работ, из них 10 – в изданиях, индексируемых в международных базах данных Web of Science и Scopus, а также представили результаты проекта на наиболее крупных международных и российских научных симпозиумах. Поддержка фонда способствовала получению научных результатов международного уровня в двух приоритетных направлениях антарктических исследований – реконструкции палеоклимата по ледяным кернам и изучении подледниковой среды Антарктиды.

Благодарности. Исследования финансировались по гранту РНФ 14-27-00030.

Acknowledgments. The research was financially supported by the Russian Science Foundation, grant no. 14-27-00030.

Литература

1. *Липенков В.Я., Екайкин А.А., Шибаетов Ю.А., АLEXИНА И.А., Преображенская А.В., Козачек А.В., Владимирова Д.О.* Перспективы развития Лаборатории изменений климата и окружающей среды ААНИИ Росгидромета после получения гранта Российского научного фонда // *Лёд и Снег*. 2014. № 4 (128). С. 135–139.
2. *Скакун А.А., Липенков В.Я.* Исследование погрешностей орбитального метода датирования льда по данным о его газосодержании на примере ледяного керна со станции Купол Фуджи (Антарктида) // *Проблемы Арктики и Антарктики*. 2016. Вып. 4 (110). С. 14–29.
3. *Bazin L., Landais A., Lemieux-Dudon B., Toyé Mahamadou Kele H., Veres D., Parrenin F., Martinerie P., Ritz C., Capron E., Lipenkov V., Loutre M.-F., Raynaud D., Vinther B., Svensson A., Rasmussen S., Severi M., Blunier T., Leuenberger M., Fischer H., Masson-Delmotte V., Chappellaz J., Wolff E.* An optimized multi-proxies, multi-site Antarctic ice and gas orbital chronology (AICC2012): 120–800 ka // *Climate of the Past*. 2013. V. 9. № 4. P. 1715–1731. doi: 10.5194/cp-9-1715-2013.
4. *Ekaykin A., Eberlein L., Lipenkov V., Popov S., Scheinert M., Schröder L., Turkeev A.* Non-climatic signal in ice core records: lessons from Antarctic megadunes // *The Cryosphere*. 2016. V. 10. P. 1217–1227. doi: 10.5194/tc-10-1217-2016.
5. *Ekaykin 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 // *An-*

References

1. *Lipenkov V.Ya., Ekaykin A.A., Shibaev Yu.A., Alekhina I.A., Preobrazhenskaya A.V., Kozachek A.V., Vladimirova D.O.* The prospective development of Climate and Environmental Research Laboratory of AARI, Roshydromet after gaining the grant of Russian Science Foundation. *Led i Sneg. Ice and Snow*. 2014, 4 (128): 135–139. [In Russian].
2. *Skakun A.A., Lipenkov V.Ya.* Assessing the uncertainties of an ice core time scale based on orbital tuning of air content records: a case study of the Dome Fuji (Antarctica) ice core. *Problemy Arktiki i Antarktiki. Problems of Arctic and Antarctic*. 2016, 4 (110): 14–29. [In Russian].
3. *Bazin L., Landais A., Lemieux-Dudon B., Toyé Mahamadou Kele H., Veres D., Parrenin F., Martinerie P., Ritz C., Capron E., Lipenkov V., Loutre M.-F., Raynaud D., Vinther B., Svensson A., Rasmussen S., Severi M., Blunier T., Leuenberger M., Fischer H., Masson-Delmotte V., Chappellaz J., Wolff E.* An optimized multi-proxies, multi-site Antarctic ice and gas orbital chronology (AICC2012): 120–800 ka. *Climate of the Past*. 2013, 9 (4): 1715–1731. doi: 10.5194/cp-9-1715-2013.
4. *Ekaykin A., Eberlein L., Lipenkov V., Popov S., Scheinert M., Schröder L., Turkeev A.* Non-climatic signal in ice core records: lessons from Antarctic megadunes. *The Cryosphere*. 2016, 10: 1217–1227. doi: 10.5194/tc-10-1217-2016.
5. *Ekaykin 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. *An-*

- nals of Glaciology. 2014. V. 55. № 66. P. 259–266. doi: 10.3189/2014AoG66A189.
6. Litvinenko V.S., Vasiliev N.I., Lipenkov V.Ya., Dmitriev A.N., Podoliak A.V. Special aspects of ice drilling and results of 5G hole drilling at Vostok station, Antarctica // *Annals of Glaciology*. 2014. V. 55 (68). P. 173–178. doi: 10.3189/2014AoG68A040.
 7. Манаков А.Ю., Ильдяков А.В., Липенков В.Я., Екайкин А.А., Ходжер Т.В. Образование клатратного гидрата фреона HCFC-141b в глубокой скважине на станции Восток (Антарктида) в процессе вскрытия подледникового озера Восток // *Криосфера Земли*. 2017. Т. XXI. № 3. Принято к печати.
 8. Alekhina I., Ekaykin A., Moskvina A., Lipenkov V. Chemical characteristics of the ice cores obtained after the first unsealing of subglacial Lake Vostok / Eds.: D. White, S. Jamieson, M. Siegert. *Exploration of Subsurface Antarctica: Uncovering Past Changes and Modern Processes*. Geological Society. London, 2017. Special Publication. Принято к печати.
 9. Ekaykin A.A., Lipenkov V.Ya., Kozachek A.V., Vladimirova D.O. Stable water isotopic composition of the Antarctic Subglacial Lake Vostok: implications for understanding the Lake's hydrology // *Isotopes in Environmental & Health Studies*. 2016. V. 52. № 4–5. P. 468–476. <http://dx.doi.org/10.1080/10256016.2015.1129327>.
 10. Lipenkov V.Y., Ekaykin A.A., Polyakova E.V., Raynaud D. Characterization of subglacial Lake Vostok as seen from physical and isotope properties of accreted ice // *Philosophy Transactions of the Royal Society of London*. 2016. A 374: 20140303. <http://dx.doi.org/10.1098/rsta.2014.0303>.
 11. Vasilev N.I., Bolshunov A.V., Dmitriev A.N., Podoliak A.V. Round-Trip Assembly for Investigations of Subglacial Lake Vostok // *Intern. Journ. of Applied Engineering Research*. 2016. V. 11. № 9. P. 6376–6380.
 - nals of Glaciology. 2014, 55 (66): 259–266. doi: 10.3189/2014AoG66A189.
 6. Litvinenko V.S., Vasiliev N.I., Lipenkov V.Ya., Dmitriev A.N., Podoliak A.V. Special aspects of ice drilling and results of 5G hole drilling at Vostok station, Antarctica. *Annals of Glaciology*. 2014, 55 (68): 173–178. doi: 10.3189/2014AoG68A040.
 7. Manakov A.Yu., Ildyakov A.V., Lipenkov V.Ya., Ekaykin A.A., Khodzher T.V. Formation of clathrate hydrates of hydrochlorocarbon 141b in the deep borehole at Vostok Station (Antarctica) in the course of the unsealing of subglacial Lake Vostok. *Kriosfera Zemli*. *Earth Cryosphere*. 2017, XXI (3): in press [In Russian].
 8. Alekhina I., Ekaykin A., Moskvina A., Lipenkov V. Chemical characteristics of the ice cores obtained after the first unsealing of subglacial Lake Vostok. Eds.: D. White, S. Jamieson, M. Siegert. *Exploration of Subsurface Antarctica: Uncovering Past Changes and Modern Processes*. Geological Society. London, 2017. Special Publication: in press.
 9. Ekaykin A.A., Lipenkov V.Ya., Kozachek A.V., Vladimirova D.O. Stable water isotopic composition of the Antarctic Subglacial Lake Vostok: implications for understanding the Lake's hydrology. *Isotopes in Environmental & Health Studies*. 2016, 52 (4–5): 468–476. <http://dx.doi.org/10.1080/10256016.2015.1129327>.
 10. Lipenkov V.Y., Ekaykin A.A., Polyakova E.V., Raynaud D. Characterization of subglacial Lake Vostok as seen from physical and isotope properties of accreted ice. *Philosophy Transactions of the Royal Society of London*. Ser. A. 2016, 374: 20140303. <http://dx.doi.org/10.1098/rsta.2014.0303>.
 11. Vasilev N.I., Bolshunov A.V., Dmitriev A.N., Podoliak A.V. Round-Trip Assembly for Investigations of Subglacial Lake Vostok. *Intern. Journ. of Applied Engineering Research*. 2016, 11 (9): 6376–6380.