

Изотопный режим подледникового озера Восток по данным исследований глубокого ледяного керна

© 2012 г. А.А. Екайкин, В.Я. Липенков, А.В. Козачек

Арктический и Антарктический научно-исследовательский институт, Санкт-Петербург

ekaykin@aari.ru

Статья принята к печати 9 июля 2012 г.

Антарктида, гидрологический режим, изотопный состав, ледяной керн, подледниковое озеро Восток.
Antarctica, hydrological regime, ice cores, isotope content, subglacial Lake Vostok.

Представлены новые данные измерения изотопного состава (концентрации дейтерия, δD , и кислорода $18, \delta^{18}O$) керна глубокой скважины 5Г-2 на станции Восток в интервале глубин 3600–3720 м. Сопоставление изотопного профиля с полученными ранее данными по керну скважины 5Г-1 в интервале 3540–3650 м показало хорошее соответствие результатов, что говорит об удовлетворительном качестве измерений. Анализ изотопного состава всей толщи озёрного льда (3540–3720 м) позволил получить новые сведения о гидрологическом режиме подледникового озера Восток. По характеру изотопной изменчивости керн озёрного льда можно разделить на три интервала, различающиеся степенью влияния основных процессов, формирующих изотопный состав льда. Обнаружены свидетельства пульсации интенсивности притока и/или изотопного состава талой ледниковой воды, поступающей в озеро в его северной части, что говорит о неполном смешивании воды источников, питающих озеро Восток, с резидентной водой озера. В свою очередь это показывает, что слой воды, залегающий непосредственно под нижней поверхностью ледника в районе станции Восток, не репрезентативен с точки зрения изучения свойств воды в глубоководной части озера.

Введение

Озеро Восток, расположенное под 4-километровой толщей Восточно-Антарктического ледникового щита — крупнейший объект подлёдной гидрологической системы шестого континента. Его объём около 6000 км^3 , это — пятый по величине пресноводный водоём Земли. Будучи изолированным от остальной части географической оболочки нашей планеты на протяжении многих миллионов лет, оз. Восток привлекает пристальное внимание специалистов самых разных областей, в первую очередь тех, кто занят поисками новых форм жизни.

По сложившимся к настоящему времени представлениям, озеро существует благодаря гидротермальному потоку тепла, за счёт которого температура льда на определённой глубине достигает точки плавления. При этом в северной части озера, где толщина льда 4300 м, лёд тает, а в южной части, где расположена станция Восток, при толщине ледника около 3800 м идёт процесс льдообразования. Слой озёрного (конгеляционного) льда, намерзающий на нижней поверхности ледяного покрова, выносится за пределы озёрной котловины вследствие движения ледника. В толще озёрного льда выделяются два слоя: так называемый «озёрный лёд 1» (3537–3618 м¹), содержащий видимые

минеральные включения, и абсолютно чистый «озёрный лёд 2» (3618–3769 м). Предполагается, что лёд 1 образовался в узком (и мелководном?) проливе, отделяющем небольшой остров от западного борта озера, а лёд 2 — над глубоководной южной котловиной озера (см. схему формирования льда на рис. 1, в [4]).

Изотопный состав (концентрации дейтерия, δD , и кислорода $18, \delta^{18}O$) озёрной воды и льда определяется гидрологическим режимом озера, поэтому изотопные данные можно использовать для изучения компонент озёрной гидрологической системы. На рис. 1 дана упрощённая схема циркуляции воды в подледниковом оз. Восток, принятая для построения простой изотопной модели. Талые ледниковые воды — основной и, возможно, единственный источник поступления воды в озеро. Более пресные, чем резидентная озёрная вода, они поднимаются вдоль наклонной нижней поверхности ледника, смешиваясь по пути с нижележащими слоями озёрной воды. В южной части озера образование озёрного льда сопровождается изотопным фракционированием: формирующийся лёд обогащён тяжёлыми изотопами по сравнению с водой, причём эффективный коэффициент фракционирования зависит от механизма образования — скорости замерзания, наличия либо отсутствия кристаллов внутриводного льда и

¹Здесь и далее указана не вертикальная глубина, а глубина скважины по керну, т.е. фактически длина скважины. Максимальное расхождение между этими величинами на дне скважины составляет около 11 м: глубина скважины 5Г-2 по керну, равная 3769 м, соответствует вертикальной глубине (толщине) ледника 3758 м.

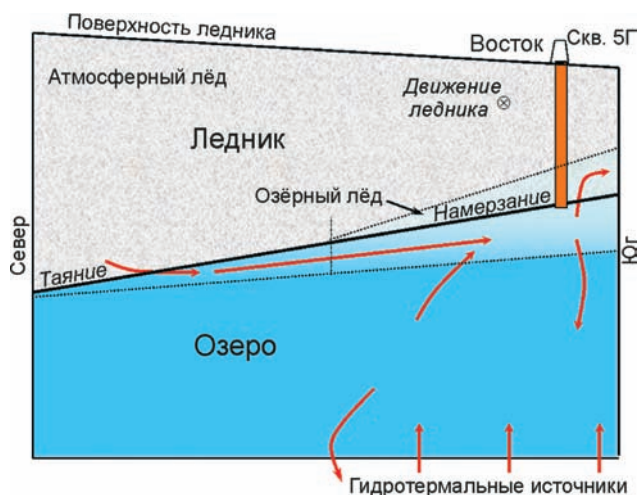


Рис. 1. Схема циркуляции воды в подледниковом озере Восток, принятая для построения простой изотопной модели
Fig. 1. The scheme of the water circulation in the subglacial Lake Vostok accepted to construct a simple isotope model

«водных карманов». Кроме того, в озере есть дополнительный источник воды — гидротермальный, не влияющий на массовый баланс озера (поскольку сам питается озёрной водой), но изменяющий его изотопный состав. Если озеро находится в равновесии, то масса воды, поступающей в озеро за счёт таяния ледника, равна массе озёрного льда, выносимого за тот же период времени за пределы озера, а изотопный состав озёрного льда равен средневзвешенному изотопному составу талых и гидротермальных вод.

Непосредственные исследования гидрологической системы подледникового озера Восток начались в январе 1998 г., когда глубокая скважина 5Г-1 на станции Восток достигла толщи озёрного льда на глубине 3537 м. Первые результаты изучения концентрации тяжёлых изотопов в озёрном льду опубликованы в работе [9], в которой показано, что изотопный состав конгеляционного льда существенно отличается от состава вышележащей толщи льда атмосферного происхождения как по своему среднему значению, так и по характеру вертикальной изменчивости. Установлено, что амплитуда изотопных колебаний в озёрном льду на 1–2 порядка меньше, чем в «обычном» ледяном керне, и фактически не превышает типичной ошибки инструментальных измерений изотопного состава (0,5‰ для δD и 0,05‰ для $\delta^{18}O$).

В работе Ж. Жузель с соавторами [9] также сделана попытка оценить изотопный состав озёрной воды, исходя из недостаточно обоснованного предположения, что концентрация тяжёлых изотопов в воде озера равна их концентрации в талой ледниковой воде Центральной Антарктиды. Этот подход скорректирован Р. Сушезом с соавторами [13, 14], которые предположили, что озеро представляет собой замкнутую систе-

му, поэтому со временем в озёрной воде за счёт изотопного фракционирования при образовании озёрного льда накапливаются лёгкие изотопы. Эти же авторы предложили механизм льдообразования, предусматривающий не только равновесное замерзание, но и формирование кристаллов внутриводного льда, из-за чего эффективный коэффициент фракционирования может быть не равен равновесному. Они же обратили внимание, что изотопный состав озёрного льда не равен изотопному составу льда атмосферного происхождения, характерному для данного района Центральной Антарктиды, а это неизбежно наблюдалось, если бы озеро находилось в массовом и изотопном равновесии. Данный факт был интерпретирован как свидетельство наличия в озере дополнительного источника воды помимо талой ледниковой, а именно — гидротермальных вод. Последний вывод был впоследствии подтверждён результатами измерения концентрации и изотопного состава гелия в озёрном льду [8], а также исследованиями химического [6], минерального [10] и микробиологического [5] состава льда.

В январе 2005 г., после 8-летнего перерыва, было продолжено бурение глубокой скважины 5Г-1, которое прекратилось в 2007 г. на глубине 3667 м в результате аварии и потери снаряда. Новые данные об изотопном составе керна озёрного льда до глубины 3623 м были опубликованы в работе [1]. Для интерпретации изотопных данных была разработана простая изотопная модель, в которой впервые учитывалась возможность неполного смешивания талой ледниковой воды с резидентной водой озера на пути её движения из зоны таяния в зону замерзания. Анализ изотопного состава нижней части керна скважины 5Г-1 впервые позволил установить влияние гидротермальных источников на изотопный режим озера, которое заключалось в ослаблении корреляции между колебаниями $\delta^{18}O$ и δD . Кроме того, авторы исследовали процессы диффузионного сглаживания изотопного сигнала в озёрном льду и показали, что в анализируемой толще льда так называемая «длина диффузии» (параметр, представляющий собой характерную длину вертикального перемещения молекул воды в толще льда) составляет 5–8 см. Таким образом, колебания изотопного состава с периодом порядка 10–15 см полностью стираются в процессе диффузии.

В 2010 г. в работе [7] были обобщены результаты исследований изотопного состава толщи озёрного льда до глубины 3650 м. Основные из них следующие:

1) усовершенствована простая изотопная модель, предложенная в работе [1]. В частности, учтено, что гидротермальные воды, скорее всего, представляют собой не независимый источник, а питаются водами самого озера;

2) за счёт существенного улучшения точности масс-спектрометрических измерений надёжно уста-

новлено наличие значимых вариаций изотопного состава озёрного льда;

3) показано, что обнаруженные вариации нельзя объяснить изменениями эффективного коэффициента изотопного фракционирования в процессе льдообразования и, следовательно, связаны они с колебаниями изотопного состава озёрной воды. Поскольку характерный временной масштаб этих вариаций на порядок меньше расчётного времени оборота воды в озере (около 100 тыс. лет), то они с большой долей вероятности обусловлены пульсациями изотопного состава и/или расхода источников, питающих озеро (талой ледниковой или гидротермальной воды). В свою очередь, это указывает на неполное смешивание вод источников с резидентной озёрной водой;

4) установлено, что в исследованной толще «озёрного льда 2» (3618–3650 м) изменчивость тяжёлых изотопов (δD и $\delta^{18}O$) не коррелирует друг с другом, что, согласно представлениям авторов, можно объяснить лишь существенным влиянием гидротермальных источников на изотопный режим озера;

5) оценен изотопный состав основных компонент гидрологической системы озера, $\delta D/\delta^{18}O$, ‰:

среднее значение изотопного состава озёрного льда	–442,6/–56,28
наиболее вероятная оценка изотопного состава талой ледниковой воды, питающей озеро	–445/–57,2
изотопный состав воды, из которой образуется исследуемый нами лёд	–449/–57,9
изотопный состав гидротермальных вод	–430/51

Отметим, что изотопный состав гидротермальных вод не поддаётся точной оценке на основании имеющихся данных, но один из вероятных сценариев даёт именно такие величины. В 2009 г. с глубины 3600 м начато бурение нового ствола скважины 5Г, получившего название 5Г-2, которое успешно закончилось 5 февраля 2012 г. проникновением в оз. Восток на глубине 3769,3 м. Таким образом, для исследований специалисты получили около 170 м керна скважины 5Г-2, который в интервале 3600–3667 м дублирует керн 5Г-1. В настоящей работе мы представляем новые изотопные данные по керну 5Г-2 в интервале 3600–3720 м и сравниваем их с результатами предыдущих измерений. Полученный сводный ряд изотопного состава озёрного льда анализируется для получения новой информации о гидрологическом и изотопном режимах подледникового озера Восток.

Методика работ

Пробы льда, предназначенные для изотопных анализов, отбирались в полевых условиях на станции Восток вскоре после извлечения льда из скважины. Перед отбором проб поверхность ледяного керна зачищалась, чтобы исключить возможное их загряз-

нение промывочной жидкостью. Затем с боковой поверхности керна срезался горбыль толщиной около 5 мм, который далее разрезался на 50-сантиметровые куски. После этого каждый образец запаивался в полиэтиленовый пакет, плавился в нём, переливался в специальный герметичный пластиковый контейнер и повторно замораживался. Для предотвращения изменения изотопного состава в результате испарения и обмена с окружающей средой образцы транспортировались и хранились в замороженном виде на протяжении всего времени с момента пробоотбора на станции Восток до размораживания непосредственно перед измерением в лаборатории.

Образцы керна скважины 5Г-1 исследовались в различных лабораториях России и Европы. Методика измерений подробно изложена в работе [7]. Случайная ошибка измерений для этих образцов составила 0,45–0,5‰ для δD и 0,03–0,05‰ для $\delta^{18}O$.

Все новые данные по керну 5Г-2, представленные в настоящей работе, получены в августе 2012 г. в лаборатории изменений климата и окружающей среды Арктического и Антарктического научно-исследовательского института (ААНИИ). Изотопный состав определялся с помощью лазерного анализатора Picarro L1102-*i*, в котором используется технология WS-CRDS. Перед началом работы прибор был откалиброван на стандартах МАГАТЭ VSMOW-2, GISP и SLAP-2. Зависимость между измеренными и истинными значениями близка к прямой линии и стабильна во времени. Коэффициент памяти прибора составил 0,03 для $\delta^{18}O$ и 0,07 для δD . Отметим, что при измерении озёрного льда влияние эффекта памяти несущественно из-за малой изменчивости изотопных значений. Образцы измеряли с использованием рабочего стандарта VOS, изготовленного из снега, собранного в районе станции Восток. Его изотопный состав близок к изотопному составу керна озёрного льда. Каждый образец измерялся дважды. Воспроизводимость результатов составила 0,05‰ для $\delta^{18}O$ и 0,3‰ для δD , т.е. удовлетворительна для данного типа приборов. В интервале 3670–3720 м изотопный состав керна 5Г-2 измерялся по 10-сантиметровым пробам (воспроизводимость результатов 0,05‰ для $\delta^{18}O$ и 0,2‰ для δD); полученные результаты осреднялись потом по пяти соседним значениям. Таким образом, случайная ошибка отдельных значений ряда после осреднения в этом интервале оценивается в 0,02‰ для $\delta^{18}O$ и в 0,1‰ для δD .

Случайная погрешность значений $dxs4$ по керну 5Г-2 составляет 0,36‰ для интервала 3600–3670 м и 0,12‰ – для нижележащего интервала.

Интерпретация изотопных данных проводилась с использованием простой изотопной модели оз. Восток, детально изложенной в работе [7]. Основные принципы, на основании которых делалось

заключение о природе наблюдаемых в озёрном льду вариаций изотопного состава, таковы:

1) независимо от механизма льдообразования изотопный состав озёрного льда связан на диаграмме $\delta D - \delta^{18}O$ с изотопным составом озёрной воды линией с наклоном (коэффициентом регрессии), равным $4,060 \pm 0,035$;

2) при изменении изотопного состава озёрной воды за счёт колебаний состава талой ледниковой воды и за счёт изменения степени смешивания талой ледниковой и резидентной озёрной воды наблюдаемые вариации изотопного состава льда располагаются на диаграмме $\delta D - \delta^{18}O$ вдоль линии с наклоном 8 и 4–8 соответственно;

3) отсутствие корреляции между δD и $\delta^{18}O$ в озёрном льду (при условии, что оно не связано с

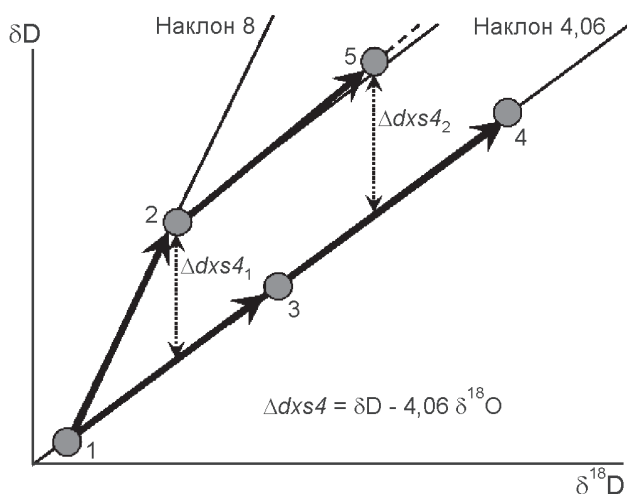


Рис. 2. Схема, иллюстрирующая поведение параметра $dxs4$. Изотопный состав озёрного льда связан с изотопным составом воды линией регрессии с наклоном 4,06. Параметр $dxs4$, рассчитываемый как $\delta D - 4,06 \delta^{18}O$, постоянен вдоль любой линии с таким наклоном. Таким образом, значение $dxs4$ одинаково для воды (точка 1) и для льда, сформированного из этой воды при различных физических условиях (точки 3 и 4). Если изотопный состав воды меняется вдоль линии с наклоном, отличным от 4 (например, от точки 1 к точке 2), то параметр $dxs4$ изменится на величину $\Delta dxs4_1$. Лёд (точка 5), сформированный из такой воды (точка 2), имеет $dxs4$ выше, чем лёд в точках 3 и 4, но почти такой же, как для воды в точке 2. При этом $\Delta dxs4_1$ чуть меньше, чем $\Delta dxs4_2$, поскольку наклон линии вода–лёд в незначительных пределах зависит от изотопного состава воды

Fig. 2. The scheme illustrating the behavior of $dxs4$ parameter. Isotopic composition of the lake ice is related to that of the lake water by the line with slope of 4.06. The $dxs4$ parameter calculated as $\delta D - 4.06 \delta^{18}O$ is constant along any line with this slope. Thus, the $dxs4$ value is the same for water (point 1) and for ices formed from this water under different physical conditions (points 3 and 4). If the water isotopic composition changes along a slope different from 4 (e.g., from point 1 to 2) the $dxs4$ will change by $\Delta dxs4_1$ as illustrated. Ice (point 5) formed from water (point 2) has the $dxs4$ values higher than ice (points 3 and 4), but nearly the same as water (point 2). Note that $\Delta dxs4_1 < \Delta dxs4_2$ because the water-ice slope slightly depends on the water isotopic composition

ошибкой измерения) свидетельствует о влиянии гидротермальных вод;

4) влияние двух основных процессов на изменчивость изотопного состава озёрного льда – механизма льдообразования и вариаций изотопного состава воды озера – можно, таким образом, разделить с помощью простого параметра: $dxs4 = \delta D - 4,06\delta D$. Изменения этого параметра в озёрном льду однозначно говорят о вариациях изотопного состава озёрной воды (см. пояснительную схему на рис. 2).

Результаты

На рис. 3, а, б приведены данные по изотопному составу кернов скважины 5Г-1 в интервале 3540–3650 м и скважины 5Г-2 в интервале 3600–3720 м. Обращает внимание одинаковый характер изменения концентраций δD и $\delta^{18}O$ в общем интервале (3600–3650 м) обоих кернов, что говорит о хорошем качестве измерений. В наибольшей степени это справедливо для кислорода 18, тогда как расхождения в данных по дейтерию, по-видимому, обусловлены относительно большей погрешностью измерения δD по керну 5Г-1. Кроме того, по керну скважины 5Г-2 значения δD систематически занижены на 0,4‰. Указанную разницу вряд ли можно объяснить тем фактом, что представленные профили получены по разным кернам, поскольку расстояние между стволами скважин 5Г-1 и 5Г-2 составляет от нескольких сантиметров до первых метров и, кроме того, разница между значениями $\delta^{18}O$ равна всего 0,005‰. Поскольку наблюдаемое различие изотопного состава лежит в пределах систематической погрешности его определения в разных лабораториях (см. обзор в работе [7]), мы связываем его именно с этим фактором. Также из рис. 3 очевидно, что мелкомасштабная (в пределах нескольких метров) изменчивость изотопного состава не всегда воспроизводится при анализе керна в параллельной скважине, что также связано со случайной погрешностью измерений. Этот вывод подчёркивает необходимость многократного измерения каждого образца керна озёрного льда для получения надёжного изотопного сигнала.

В целом, данные керна 5Г-2 подтверждают тенденцию к постепенному росту концентрации тяжёлых изотопов в озёрном льду с глубины около 3615 м, достигающей максимума на глубине около 3660 м. Далее следует плавное снижение содержания дейтерия и кислорода 18 до глубины около 3710 м, сменяющееся относительно резким ростом в самых глубоких интервалах исследованной части керна. Для интерпретации вновь полученных данных мы применили изложенную ранее методику анализа изотопного состава озёрного льда. На рис. 3, в показано изменение по глубине параметра $dxs4$, который характеризуется значимой изменчи-

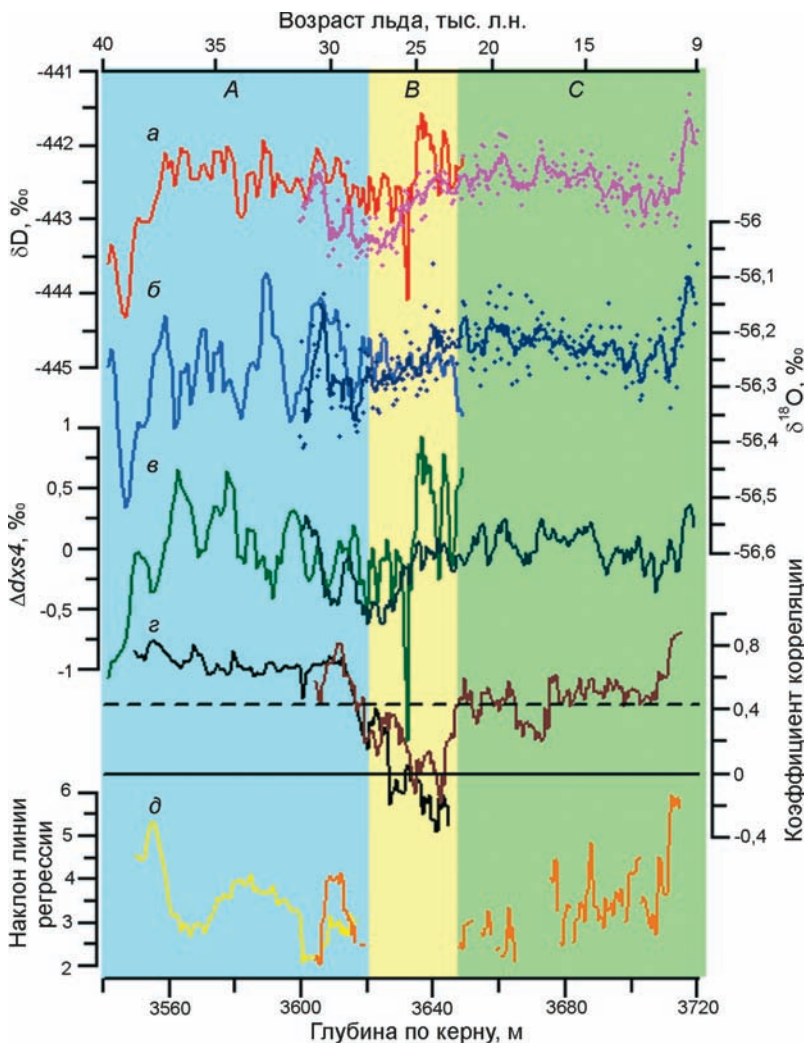


Рис. 3. Изменение изотопного состава ледяных кернов скважин 5Г-1 и 5Г-2 в интервале глубины 3540–3720 м:

a и *б* – концентрации соответственно δD и $\delta^{18}O$; представлены сглаженные кривые по пяти значениям, точками обозначены исходные результаты измерения керна скважины 5Г-2; *в* – изменения параметра $dxs4$; *г* – график скользящего коэффициента корреляции изменений δD и $\delta^{18}O$, рассчитанного по 21 значению; коэффициент корреляции выше пунктирной линии значим с вероятностью 95%; *д* – график скользящего коэффициента регрессии, рассчитанный по 21 значению; показаны лишь значения коэффициента, значимые с вероятностью 95%.

Разным цветом выделены участки ледяного керна (*A*, *B* и *C*), различные по характеру изменчивости изотопного состава. На верхней горизонтальной шкале приведена оценка возраста льда, выполненная по данным [11]

Fig. 3. The variations of the 5G-1 and 5G-2 ice cores isotope content in the depth interval 3540–3720 m.

a and *б* – concentrations of δD and $\delta^{18}O$. The curves represent the smoothed by 5 datapoints profiles. The small dots depict initial values of the 5G-2 samples; *в* – the changes of the $dxs4$ parameter; *г* – the variability of the running correlation coefficient of δD and $\delta^{18}O$ calculated by 21 datapoints. The values above the dashed line are significant with the 95% level; *д* – the variability of the running regression coefficient calculated by 21 datapoints (only the values significant at the 95% level are shown).

The color shading highlights the intervals of the ice core (*A*, *B* and *C*) different in terms of the isotopic behavior. The upper horizontal axis represents the ice age as calculated based on the data from [11]

востью, особенно в верхней части керна 5Г-2. Это свидетельствует, что изменения изотопного состава озёрного льда, по меньшей мере, частично связаны с изменением изотопного состава озёрной воды. На рис. 3, *г* и *д* даны графики скользящих значений коэффициентов корреляции и регрессии, рассчитанных по интервалам длиной в 21 значение (что эквивалентно 10,5 м керна). На графиках отчётливо выделяются три участка (*A–C*):

1) 3540–3619 м – характеризуется значимой положительной корреляцией с коэффициентом порядка 0,6–0,8; наклон линии регрессии $\delta D/\delta^{18}O$, по данным керна скважины 5Г-1 [7], равен 4,0, а в интервале 3600–3620 м скважины керна 5Г-2 – $3,0 \pm 0,7$;

2) 3619–3647 м – имеет незначимую корреляцию по кернам обеих скважин;

3) 3647–3720 м – коэффициент корреляция вновь растёт до значений 0,4–0,6 (за исключением небольших участков), в самом конце интервала увеличиваясь до уровня 0,8–0,9. Наклон линии регрессии $\delta D/\delta^{18}O$ равен $4,2 \pm 0,5$.

По нашему мнению, представленные здесь данные позволяют с большой долей уверенности сделать выводы о механизме образования озёрного льда и о гидрологическом режиме южной части подледникового озера Восток.

Границы первого интервала (*A*) точно совпадают с толщей «озёрного льда 1», сформировавшегося вблизи западного берега озера. Помимо наличия видимых минеральных включений, этот лёд характеризуется относительно высоким содержанием газа [3], что свидетельствует о сложном механизме льдообразования, включающем в себя захват и последующее замерзание водных карманов, а также образование кристаллов внутриводного льда. Данный интервал отличается как относительно большой скоростью намерзания льда, так и быстрыми изменениями этой скорости в пространстве и во времени [11]. Поэтому главный фактор изменения изотопного состава льда в этом интервале – вариации условий и механизма льдообразования, что отражается в изменении эффективного коэффици-

ента фракционирования и подтверждается наклоном линии регрессии между $\delta^{18}\text{O}$ и δD , равным 4.

Второй интервал льда (*B*) образован приблизительно в 43–34 км вверх по линии тока (к северо-западу) от станции Восток, вблизи небольшого острова (см. рис. 1 в работе [4]). Отсутствие корреляции между δD и $\delta^{18}\text{O}$ в этом интервале ранее было интерпретировано [7] как проявление гидротермальной активности на дне озера. Геология оз. Восток изучена недостаточно, однако имеющиеся данные не исключают возможности расположения в этом районе разломов земной коры, по которым и поступает гидротермальная вода. Тот факт, что это отражается в изотопном составе озёрного льда, говорит о неполном смешивании этой воды с резидентной озёрной водой, что подтверждается результатами лабораторных экспериментов циркуляции воды в озере [16].

Третий интервал льда (*C*) образовался над глубоководной южной котловиной оз. Восток на расстоянии 34–8 км от станции. Есть основание предполагать, что механизм льдообразования «озёрного льда 2» относительно прост и заключается в равновесном замерзании озёрной воды без образования кристаллов внутриводного льда и водных карманов [4]. Это отражается в пониженной амплитуде изменчивости изотопного состава в этом интервале ледяного керна. Вместе с тем изменения параметра $dxs4$ говорят о незначительных (с амплитудой порядка 0,25‰) колебаниях изотопного состава воды за счёт пульсаций притока талой ледниковой и/или гидротермальной воды. Если принять гипотезу о равновесном образовании льда, то можно точно рассчитать изотопный состав воды, из которой образовался лёд интервала *C* (3647–3720 м). При средних значениях изотопного состава льда из этого интервала, равных –56,22‰ для $\delta^{18}\text{O}$ и –442,4‰ для δD , и равновесных коэффициентах фракционирования соответственно 1,003 и 1,0208 [9] получаем изотопный состав воды, равный соответственно –59,04 и –453,8‰. Эти значения существенно ниже оценок, приведённых в работе [7], поскольку в последней в качестве наиболее вероятного сценария предполагалось, что озёрный лёд на 50% состоит из кристаллов внутриводного льда.

В самой глубокой части интервала изменчивость изотопного состава возрастает, а наклон линии регрессии увеличивается до 6 (см. рис. 3, *д*), т.е. приближается к значению, типичному для атмосферного льда. Появление этого сигнала показывает, что данный район озера более доступен для поступления талых вод из его северной части, чем участки водоёма, примыкающие к его западному берегу. Это может объясняться тем, что, согласно современным представлениям, в озере господствует циркуляция, направленная по часовой стрелке [12, 15], т.е. вдоль восточ-

ного берега озера должно наблюдаться относительно сильное течение, направленное с севера на юг.

Можно представить альтернативное объяснение изотопным вариациям в интервале *C*, основанное не на пространственном, а на временном факторе. Действительно, участок керна *A* сформировался в интервале времени 40–28 тыс. л.н., участок *B* – 28–23 тыс. л.н., а *C* – 23–9 тыс. л.н. (возраст льда рассчитан по данным работы [11]). Климатические условия в Центральной Антарктиде с тех пор существенно изменились, что могло повлиять на условия льдообразования и циркуляцию воды в озере. В большей степени это касается интервала *C*, поскольку интервалы *A* и *B* (40–23 тыс. л.н.) сформировались в эпоху относительно стабильных климатических условий, характерных для максимума последнего оледенения. Резкий переход от максимума оледенения к голоцену в районе станции Восток начался 17 тыс. л.н., а 11 тыс. л.н. был достигнут термический оптимум [2]. Последний приблизительно совпадает по времени с резким изменением изотопного состава озёрного льда (см. рис. 3). Климатические колебания, по-видимому, сопровождались изменением формы ледникового щита, а следовательно, и наклоном нижней поверхности ледника над оз. Восток, что могло изменять условия поступления талых ледниковых вод в южную часть озера. Кроме того, мощность ледника увеличилась приблизительно на 100 м [2], что привело к повышению давления на границе лёд–вода приблизительно на 10 бар и соответственно к понижению температуры замерзания воды на 0,1 °С. Однако отвечающее этому изменению равновесного коэффициента изотопного фракционирования должно было быть несущественным и не повлиять на изменение изотопного состава формирующегося льда.

Отметим, что явно выраженный сигнал, связанный с талой ледниковой водой, в нижней части керна скважины 5Г-2 подтверждает предположение о неполном смешивании воды источников, питающих озеро, с резидентной озёрной водой. Это позволяет сделать важный вывод, что слой воды, располагающийся непосредственно под ледниковым покровом под станцией Восток, не репрезентативен с точки зрения условий, существующих в более глубоких слоях озера.

Выводы и планы дальнейших исследований

Успешное завершение бурения скважины 5Г-2 на станции Восток 5 февраля 2012 г. предоставило в распоряжение исследователей ценнейшие образцы керна озёрного льда, изучение которых позволило установить многие параметры озёрной гидрологической системы до начала этапа непосредственного изучения водной толщи. Рассмотренные в настоящей работе

новые данные об изотопном составе кернa скважины 5Г-2 в интервале глубины 3600–3720 м получены в недавно созданной в ААНИИ лаборатории изменений климата и окружающей среды. Сопоставление этих данных с опубликованными ранее результатами изучения кернa скважины 5Г-1 до глубины 3650 м указывает на хорошую воспроизводимость изотопных значений, что свидетельствует о высоком качестве измерений и пригодности полученных изотопных профилей для дальнейших исследований.

На основании данных об изотопном составе вся толща озёрного льда может быть разделена на три интервала:

1) 3540–3619 м – «озёрный лёд 1», вариации изотопного состава которого обусловлены в первую очередь изменением условий и механизма льдообразования;

2) 3619–3647 м – характеризуется отсутствием корреляции между вариациями $\delta^{18}\text{O}$ и δD , что интерпретируется как проявление гидротермальной активности на дне озера;

3) 3645–3720 м – отличается от двух предыдущих пониженной изменчивостью изотопных значений, по-видимому, вследствие относительно стабильных и равновесных условий льдообразования. Вместе с тем в этом интервале есть признаки изменения изотопного состава озёрной воды, усиливающиеся в наиболее глубокой части интервала и связанные с пульсациями интенсивности притока и/или изотопного состава талой ледниковой воды из северной части озера в пространстве (при приближении к восточному берегу озера, вдоль которого проходит относительно сильное течение с севера на юг) и/или во времени (при переходе от максимума последнего оледенения к голоцену).

Существование указанных вариаций свидетельствует о неполном смешивании воды источников, питающих озеро Восток, с резидентной озёрной водой. Из этого следует, что слой воды, расположенной непосредственно под ледником в районе станции Восток, не репрезентативен с точки зрения условий в более глубоких слоях озера, поэтому дальнейшие исследования оз. Восток должны включать в себя отбор проб воды с разных горизонтов: от раздела лёд–вода до дна озера.

В ближайшие планы работ по изучению изотопного состава озёрной воды и льда входит анализ кернa скважины 5Г-2 в интервале 3720–3769 м, сформировавшегося в юго-восточной части озера в непосредственной близости от станции Восток 9–0 тыс. л.н. Предполагается также исследовать мелкомасштабную (порядка 1 см) изменчивость изотопного состава в самых нижних горизонтах озёрного льда, содержащих первоначальный сигнал, не ослабленный молекулярной диффузией. Наконец, будет проанализирована проба озёрной воды, под-

нятая на поверхность в результате первого проникновения в озеро. Сопоставление изотопного состава этой пробы с изотопным составом озёрного льда позволит экспериментально определить эффективный коэффициент фракционирования и установить механизм льдообразования.

Благодарности. Авторы благодарят буровых мастеров Национального минерально-сырьевого университета «Горный» (СПГГИ), Санкт-Петербург, успешно завершивших под руководством профессора Н.И. Васильева многолетний проект бурения льда на станции Восток и предоставивших в распоряжение авторов образцы ледяного кернa высочайшего качества, а также Российскую антарктическую экспедицию за логистическое обеспечение гляциологических работ в Центральной Антарктиде.

Настоящая работа выполнена в рамках Проекта 2 ФЦП «Антарктика» при финансовой поддержке РФФИ, грант 10-05-01049-а.

Литература

1. *Екайкин А.А., Липенков В.Я., Йонсен С., Прилепский Э.Б., Шибяев Ю.А.* Изотопный состав воды подледникового озера Восток // МГИ. 2005. Вып. 98. С. 92–99.
2. *Липенков В.Я., Барков Н.И., Саламатин А.Н.* История климата и оледенения Антарктиды по результатам изучения ледяного кернa со станции Восток // Проблемы Арктики и Антарктики. 2000. Вып. 72. С. 197–236.
3. *Липенков В.Я., Истомин В.А., Преображенская А.В.* Опыт исследования газового режима подледникового озера Восток // Проблемы Арктики и Антарктики. 2003. Вып. 74. С. 66–87.
4. *Липенков В.Я., Полякова Е.В., Екайкин А.А.* Закономерности формирования конжеляционного льда над подледниковым озером Восток // Лёд и Снег. 2012. № 4 (120). С. 65–77.
5. *Bulat S.A., Alekhina I.A., Blot M.* DNA signature of thermophilic bacteria from the aged accretion ice of Lake Vostok, Antarctica: implications for searching life in extreme icy environments // Intern. Astrobiology. 2004. V. 3. № 1. P. 1–12.
6. *De Angelis M., Petit J.R., Savarino J., Souchez R., Thiemens M.H.* Contributions of an ancient evaporitic-type reservoir to subglacial Lake Vostok chemistry // Earth and Planetary Science Letters. 2004. V. 222. P. 751–765.
7. *Ekaykin A.A., Lipenkov V.Y., Petit J.R., Johnsen S., Jouzel J., Masson-Delmotte V.* Insights into hydrological regime of Lake Vostok from differential behavior of deuterium and oxygen-18 in accreted ice // Journ. of Geophys. Research. 2010. V. 115 (C05003). P. 1–14.
8. *Jean-Baptiste P., Petit J.R., Lipenkov V.Y., Raynaud D., Barkov N.I.* Constraints on hydrothermal processes and water exchange in Lake Vostok from helium isotopes // Nature. 2001. V. 411. № 6836. P. 460–462.
9. *Jouzel J., Petit J.R., Souchez R.* More than 200 m of lake ice above subglacial Lake Vostok, Antarctica // Science. 1999. V. 286. P. 2138–2141.

10. *Leitchenkov G.L., Belyatskiy B.V., Rodionov N.V., Sergeev S.A.* Insight into the geology of the East Antarctic hinterland: a study of sediment inclusions from ice cores of the Lake Vostok borehole // U.S. Geological Survey and U.S. National Academy (014). 2007. P. 1–4.
11. *Salamatin A.N., Tsyganova E.A., Popov S.V., Lipenkov V.Y.* Ice flow line modeling in ice core data interpretation: Vostok Station (East Antarctica) // *Physics of Ice Core Records* / Ed. by T. Hondoh. Hokkaido Univ. Press, Sapporo, 2009. P. 167–194.
12. *Siegert M.J., Ellis-Evans J.C., Tranter M., Mayer C., Petit J.R., Salamatin A.N., Prisco J.* Physical, chemical and biological processes in Lake Vostok and other Antarctic subglacial lakes // *Nature*. 2001. V. 414. P. 603–609.
13. *Souchez R., Petit J.R., Tison J.L., Jouzel J., Verbeke V.* Ice formation in subglacial Lake Vostok, Central Antarctica // *Earth and Planetary Science Letters*. 2000. V. 181. P. 529–538.
14. *Souchez R., Petit J.R., Jouzel J., De Angelis M., Tison J.L.* Reassessing Lake Vostok's behavior from existing and new ice core data // *Earth and Planetary Science Letters*. 2004. V. 217. P. 163–170.
15. *Walsh D.* A note on eastern boundary intensification of flow in lake Vostok // *Ocean Model*. 2004. V. 4. P. 207–218.
16. *Wells M.G., Wettlaufer J.S.* Circulation in Lake Vostok: A laboratory analogue study // *Geophys. Research Letters*. 2008. V. 35 (L03501). P. 1–5.

Summary

On the 5th of February 2012 the long-lasting project of deep ice drilling at Russian Antarctic station of Vostok was completed by the penetration to the subglacial lake at the depth of 3769.3 m. The study of the ice core representing the frozen lake water and obtained as a result of the drilling, has allowed to make preliminary conclusions on the lake hydrological regime before its direct studies. In this work we present the new isotopic data (δD and $\delta^{18}O$) from the 5G-2 ice core from the depth interval 3600–3720 m. The measurements were performed in the recently established Climate and Environment Research Laboratory of Arctic and Antarctic Research Institute (St. Petersburg, Russia). The comparison of the new isotope profile with the previously published 5G-1 data (3540–3650 m) demonstrates a good reproducibility, which means a

satisfying quality of the measurements. The analysis of the whole available lake ice thickness isotope profile (3540–3720 m) has allowed to obtain a new information on the Lake Vostok's hydrological regime. Based on the isotopic behavior, the lake ice core is divided into three sections. The first (3540–3619 m) corresponds to the so-called «lake ice 1», the ice containing visible mineral inclusions that was formed close to the western lake shore. The isotopic variability in this section was formed due to the changing conditions and mechanisms of the ice formation (ice accretion rate, concentrations of the frazil ice crystals and frozen water pockets). The second (3619–3647 m) is characterized by a weak correlation between deuterium and oxygen 18, which is interpreted as an influence of the hydrothermal activity on the lake's isotopic regime. In the third section (3647–3720 m), formed over the deep basin in the southern part of the lake, the isotopic variability is reduced due to the relatively stable steady-state conditions of the ice formation. At the same time, the signature of the lake water isotopic variability is observed here, which is attributed to the pulsations of the flux and/or isotope content of the melt glacier waters coming from the northern part of the lake. In turn, this means not complete mixing of the lake source waters with the resident water of the lake and, thus, that the water layer just beneath the glacier in the Vostok station area is not representative in terms of the conditions in the main lake body. We suggest that the future direct lake studies must include water sampling at different depths from the lake-water interface to the bottom. Meanwhile, in the nearest future this study will be developed by the completing of the measurements of the whole 5G-2 core (to the depth of 3769 m), as well as the analysis of the short-term (1 cm) variations in the bottom part of the ice core, where the isotopic signal must be fully preserved without being erased by the molecular diffusion. Also, the measurement of the first lake water sample recovered from the drill after the penetration will allow the comparison with the lake ice isotope content in order to experimentally define the effective isotope fractionation coefficient and thus constrain the possible mechanism of the lake ice formation.