

ГИДРОЛОГИЧЕСКИЙ РЕЖИМ ПОДЛЕДНИКОВОГО ОЗЕРА ВОСТОК ПО ДАННЫМ ИЗУЧЕНИЯ КЕРНА ОЗЕРНОГО ЛЬДА

канд. геогр. наук В.Я.ЛИПЕНКОВ, канд. геогр. наук А.А.ЕКАЙКИН,
науч. сотр. Ю.А.ШИБАЕВ, инженер Е.В.ПОЛЯКОВА,
науч. сотр. А.В.ПРЕОБРАЖЕНСКАЯ

ГНЦ РФ Арктический и антарктический научно-исследовательский институт, Санкт-Петербург, lipenkov@aari.nw.ru

На основе результатов изучения керна озерного льда установлены значения компонентов водного и изотопного баланса озера Восток и оценен вклад двух основных источников воды (донного таяния и гидротермальных вод) в гидрологический режим подледникового водоема. Показано, что суммарный расход гидротермальных источников (2,8–5,5 млн т воды в год) на порядок меньше скорости поступления талой воды за счет донного таяния ледника в северной части озера.

Ключевые слова: Антарктида, озеро Восток, ледяной керн, гидрологический режим, водный баланс, изотопный состав, газосодержание, гидротермальные воды.

Благодаря своим значительным размерам (площадь водной поверхности порядка 16 тыс. км², мощность водного слоя достигает 1200 м [21]), озеро Восток занимает центральное место в подледниковой гидрологической системе Антарктиды, которая, как теперь считают [26], во многом определяет форму и динамику антарктического ледникового покрова в условиях меняющегося климата планеты. На первом этапе исследования озера – до проникновения в него и производства прямых измерений физических и геохимических характеристик озерной воды – единственным источником экспериментальных данных о гидрологическом режиме этого уникального водоема является ледяной керн глубокой скважины 5Г, пробуренной на российской внутриконтинентальной станции Восток.

Скважина расположена над южной глубоководной частью озера (рис. 1 цв. вклейки), где происходит намерзание озерной воды на подошву ледника, что дает возможность отбирать и изучать образцы (керны) конжеляционного (озерного) льда, представляющего собой одну из трех основных сред (лед–вода–донные осадки) подледникового водоема. Самым глубоким ответвлением скважины 5Г на сегодняшний день является ее ствол 5Г-1, который в 2007 г. достиг отметки 3667 м ниже поверхности ледника.

Линия тока льда VFL (Vostok flow line), проходящая через скважину, берет свое начало на Ледоразделе В в 370 км к западу от озера (за пределами карты, показанной на рис. 1 цв. вклейки). На расстоянии примерно 60 км к северо-западу от станции ледник достигает котловины подледникового озера и вступает в контакт с озерной водой. Сразу после пересечения линии налегания на холодной нижней поверхности ледникового покрова начинает нарастать конжеляционный лед. В керне скважины 5Г-1 граница между ледниковым льдом атмосферного происхождения и конжеляционным льдом, образовавшимся из озерной воды, фикси-

руется на глубине примерно 3539 м (рис. 1 цв. вклейки). Расчеты, выполненные с помощью математической модели растекания ледникового покрова, учитывающей влияния прошлых изменений климата на скорость движения льда над озером Восток [25], показали, что перемещение ледника от западного берега озера до станции Восток занимает по времени примерно 40 тыс. лет. В соответствии с этим возраст конгеляционного льда, нарастающего на основание ледникового покрова над озером Восток, уменьшается с ростом глубины его залегания от 40 тыс. лет (на контакте с атмосферным льдом) до нуля (на контакте с озерной водой).

Вскоре после выхода на озеро линия тока льда VFL пересекает небольшой «остров», отделенный от западного берега озера Восток узким (и, вероятно, мелководным) проливом [21]. Предполагается, что именно в этой части подледникового водоема, над проливом, формируется 70-метровая толща озерного льда 1, содержащего видимые невооруженным глазом минеральные включения донных осадков озера [9]. В 40–45 км от станции движущийся ледник выходит на открытую, глубоководную часть озера, над которой продолжается медленное нарастание чистого льда, не содержащего минеральных включений (озерный лед 2). Таким образом, изменение свойств ледяного керна в интервале глубин 3539–3667 м отражает пространственную (вдоль линии тока льда) и временную (за последние 40–18 тыс. лет) изменчивость условий конгеляционного льдообразования при движении ледника через озеро (см. рис. 1 цв. вклейки). К числу свойств озерного льда, которые потенциально могут являться генетическими признаками, несущими информацию об условиях его образования и гидрологическом режиме подледникового водоема, в первую очередь, относятся строение льда, его газосодержание и изотопный состав.

СТРУКТУРА И СТРОЕНИЕ ОЗЕРНОГО ЛЬДА

К настоящему времени полностью завершены непрерывные исследования структуры и строения озерного льда по всей длине колонки керна скважины 5Г-1 до глубины 3667 м. Исследования проводились в тонких пластинах льда толщиной 3–5 мм, вырезанных вдоль оси керна, и в изготовленных из этих пластин шлифах. Они включали: непрерывное картирование границ сечений кристаллических индивидов, измерение ориентировки их главных кристаллографических осей (*c*-осей), подсчет количества и определение размеров минеральных включений, а также так называемых водных карманов – замерзших включений озерной воды, являющихся центрами сосредоточения газовых, химических и биологических примесей, захваченных в ходе образования льда из воды подледникового озера Восток. Определение счетной концентрации водных карманов производилось путем подсчета количества выделений воздуха из ледяных пластин известного объема в процессе их плавления в воде при комнатной температуре.

Анализ полученных данных показал, что, вопреки ранее сложившимся представлениям, озерный лед 1 (интервал глубин 3539–3609 м), содержащий включения донных осадков озера и характеризующийся обилием замерзших водных карманов, на самом деле весьма неоднороден в отношении распределения количества и размеров указанных включений по глубине, а следовательно – и по степени своей ценности для геохимических, минералогических и биологических исследований. В частности, в пределах толщи озерного льда 1 выделяются два слоя 3548–3553 м и 3606–3608 м с повышенной концентрацией наиболее крупных включений донных осадков озера Восток (рис. 2). Уникальным по обилию и крупности минеральных включений для всего разреза ледникового льда 1 является тонкий 20-сантиметровый слой, соответствующий в керне скважины 5Г-1 интервалу глубин 3606,30–3606,50 м. В этом слое обнаружено сразу 5 минеральных агрегатов размером 4–5,5 мм, каждый из которых содержит включения, по внешнему виду напоминающие газовые гидраты.

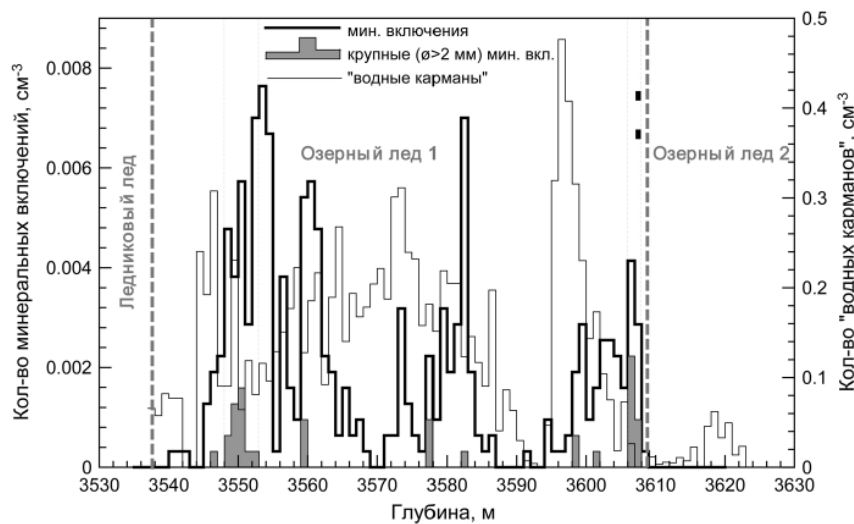


Рис. 2. Количество минеральных включений и «водных карманов» в керне озерного льда 1. Затусованные зоны показывают интервалы керна (3548–3553 м, 3606–3608 м) с повышенной концентрацией наиболее крупных включений донных осадков озера Восток

Отсутствие корреляции между концентрацией водных карманов и включений донных осадков озера (рис. 2) свидетельствует о слабой зависимости процесса захвата минеральных частиц от условий образования озерного льда 1. В дальнейшем, при интерпретации представленных на рис. 2 данных, мы будем исходить из того, что количество и размер минеральных включений во льду увеличиваются по мере приближения нижней поверхности ледника ко дну озера, в то время как количество и размер замерзших водных включений являются индикаторами скорости нарастания конжеляционного льда: чем больше крупных водных карманов в керне, тем выше была скорость роста льда. Таким образом, слои с повышенным содержанием крупных минеральных включений (3548–3553 м, 3606–3608 м), которые в целом характеризуются пониженной концентрацией водных карманов, должны соответствовать слоям льда, сформировавшимся вблизи линии налегания или непосредственно на контакте ледника с подстилающими горными породами. Более того, наличие крупных обломков горных пород (до 4 мм в поперечнике) в минеральных включениях в слое 3606–3608 м [20] указывает на то, что они были захвачены льдом в процессе экзарации ледником поверхности подледникового «острова», лежащего в 40 км вверх по линии тока льда от скважины. Следовательно, первоначальная структура нижних слоев конжеляционного льда, образовавшихся до пересечения ледником острова, могла претерпеть существенные изменения в результате взаимодействия движущегося ледника с ложем.

Анализ результатов петрографических исследований керна показывает, что в пределах слоев озерного льда 1 и 2 наблюдаются увеличение среднего размера зерен и развитие субгоризонтальной ориентировки их *c*-осей по мере увеличения глубины залегания (уменьшения возраста) льда (рис. 3). Указанные тенденции отчетливо прослеживаются на протяжении каждого из слоев, но нарушаются (прерываются) в пограничной зоне между ними, которая соответствует интервалу глубин 3606–3608 м с повышенным содержанием крупных минеральных включений.

Таким образом, как в слое озерного льда 1, так и в слое озерного льда 2 эволюция строения ледяной породы по глубине отвечает классическому закону геоме-

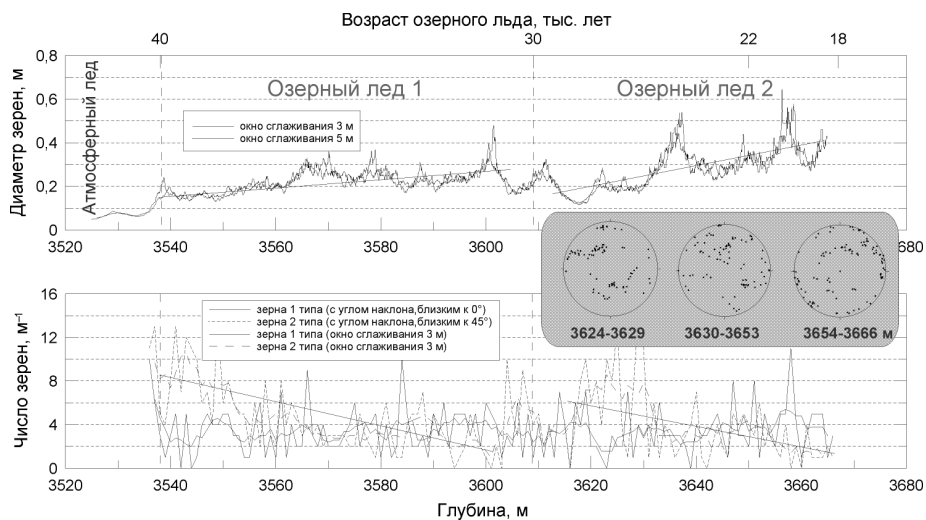


Рис. 3. Изменение размера (верхний график) и ориентировки *c*-осей (нижний график) ледяных зерен в керне озерного льда по глубине

Прямыми линиями показаны тренды, характеризующие развитие закономерного строения конгеляционного льда (рост зерен и появление субгоризонтальной ориентировки их *c*-осей) в пределах толщ озерного льда 1 и 2. В центре рисунка представлены типичные диаграммы ориентировки *c*-осей кристаллических индивидов озерного льда 2 в пределах указанных интервалов глубин

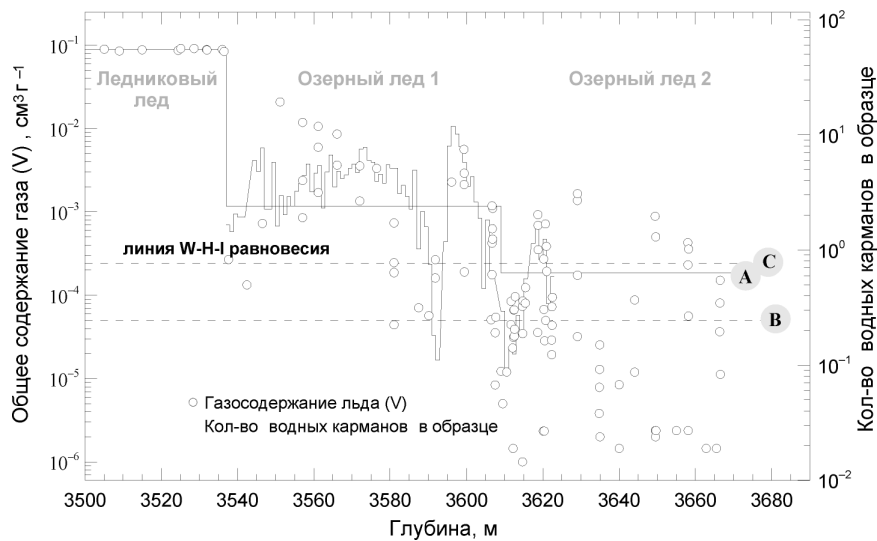


Рис. 4. Газосодержание озерного льда (*V*) и оценочное количество водных карманов в измеренных образцах

Количество водных карманов в образцах, использовавшихся для измерения *V*, рассчитывалось по данным об объеме образцов и результатам измерений счетной концентрации карманов в озерном льду (см. рис. 2). Линия А показывает средние уровни газосодержания в толщах ледникового льда, озерного льда 1 и озерного льда 2; В – уровень чувствительности прибора; С – расчетное значение газосодержания льда в равновесии с озерной водой, насыщенной атмосферными газами в присутствии гидрата воздуха (линия равновесия W-H-I)

трического отбора, в соответствии с которым преимущественное развитие в процессе стесненного (ортотропного) роста получают кристаллические индивиды, ориентированные своими a -осями (т.е. направлениями максимальной скорости роста) перпендикулярно фронту кристаллизации. Представленные на рис. 3 структурные данные подтверждают высказанное выше предположение о том, что между образованием слоев озерного льда 1 и 2 существовал перерыв, связанный с прохождением ледника через остров. Над островом нарастания водного льда не происходило, а закономерное строение нижних слоев озерного льда, сформировавшихся выше по течению ледника (в проливе), существенно нарушилось в результате деформации этих слоев при взаимодействии ледника с подстилающей горной породой. Ниже по течению льда от острова процесс геометрического отбора растущих из воды озера ледяных кристаллов возобновился, но уже на ледяном основании с видоизмененной структурой.

Развитие субгоризонтальной ориентировки c -осей кристаллов конжеляционного льда на стадии их ортотропного роста из пресной воды может реализовываться только в случае наличия переохлажденной воды у фронта кристаллизации [1, 7, 8]. Таким образом, установленные тенденции эволюции строения льда, нарастающего на подошву ледника вдоль линии тока VFL (рис. 1 цв. вклейки), свидетельствуют о возможности поступления переохлажденной воды из северных районов озера Восток в места образования озерного льда 1 (пролив между островом и западным берегом озера) и озерного льда 2 (глубоководная часть озера между островом и станцией Восток).

КОЛИЧЕСТВО ВОДНЫХ КАРМАНОВ И ОБЩЕЕ ГАЗСОДЕРЖАНИЕ ОЗЕРНОГО ЛЬДА

Образование и последующее замерзание жидких включений в конжеляционном льду является фактором, способствующим захвату примесей, содержащихся в озерной воде [6]. В частности, счетная концентрация замерзших жидких включений во многом определяет газосодержание (V) озерного льда 1, о чем свидетельствует сопоставление результатов измерения V с количеством водных карманов в образцах льда, использованных для газовых анализов (рис. 4). В озерном льду 2 счетная концентрация карманов на порядок ниже, чем в вышележащем слое, и, следовательно, значения V должны быть близки к уровню растворимости газов во льду в равновесии с озерной водой [6]. Уровень W-H-I (линия С на рис. 4), соответствующий газосодержанию льда в равновесии с озерной водой, насыщенной атмосферными газами в присутствии гидрата воздуха, был рассчитан по данным работы [16]. Заметим, что этот уровень соответствует нижней границе газосодержания озерного льда при максимальной концентрации растворенных газов в озере (в равновесии с гидратом) и отвечает случаю бесконечно малой скорости роста кристаллов льда, исключаяющей образование жидких включений и захват растворенного в воде газа. Как видно из рис. 4, средняя концентрация газов в озерном льду 2 ниже уровня W-H-I, что может свидетельствовать о неполном насыщении озерной воды атмосферными газами, поступающими в озеро через ледник. Последнее, в свою очередь, говорит либо о плохом перемешивании талой воды, поступающей в область образования озерного льда из северных районов озера, либо о нестационарном состоянии системы ледник–озеро в целом.

КОЛИЧЕСТВЕННАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА СОСТАВЛЯЮЩИХ МАССОВОГО И ИЗОТОПНОГО БАЛАНСА ПОДЛЕДНИКОВОГО ОЗЕРА ВОСТОК

Для интерпретации результатов измерения изотопного состава озерного льда до глубины 3650 м [3, 12] нами использовалась усовершенствованная изотопная модель озера Восток, разработанная в ААНИИ [2]. Коррекция коснулась, главным образом, схемы расчета вклада гидротермального источника в изотопный баланс озера. В предыдущем варианте модели гидротермальные воды рассматрива-

лись как независимый источник, хотя более реалистичной является ситуация, при которой гидротермы питаются инфильтрационной водой, поступающей из самого озера Восток. При такой схеме подземные воды не оказывают влияния на баланс массы озера, но меняют его изотопный состав. С учетом этой поправки изотопная модель озера выглядит следующим образом (рис. 5 [12]):

$$\frac{dM_l}{dt} = M_{melt} (1 - q) \quad (1)$$

и

$$\frac{d(M_l R_l)}{dt} = M_{melt} (R_{melt} - q\alpha [R_{melt} (1 - \sigma) + R_l \sigma] + q_{ht} [R_{ht} - R_l]). \quad (2)$$

Здесь M_l – масса воды в озере, M_{melt} – масса талой воды, ежегодно поступающей в озеро; q – отношение расходной части водного баланса (массы конжеляционного льда, ежегодно образующегося в южной части озера) к его приходной части (потоку талой воды M_{melt} в северной части озера); α – эффективный коэффициент изотопного фракционирования при образовании конжеляционного льда; R – изотопный состав, соответственно, талой озерной воды (индекс *melt*), резидентной озерной воды (индекс *l*) и гидротермальных источников (индекс *ht*); σ – коэффициент смешивания (от 0 до 1) талой ледниковой и резидентной воды; q_{ht} – отношение ежегодного прихода гидротермальных вод, M_{ht} , к приходу талой воды, M_{melt} . Отметим, что модель, описываемая уравнениями (1) и (2), допускает возможность как нестационарного состояния озера, так и неполного смешивания талой ледниковой и гидротермальных вод с резидентной водой озера по пути к месту замерзания.

Усовершенствованная изотопная модель была использована для корректировки оценок изотопного состава компонентов водного баланса озера. Прежде всего, был уточнен изотопный состав основной приходной части – талых ледниковых вод (R_{melt}). В качестве оценки R_{melt} использовался изотопный состав ледяных отложений в районе Купола «В», откуда поступает лед, тающий в северной части

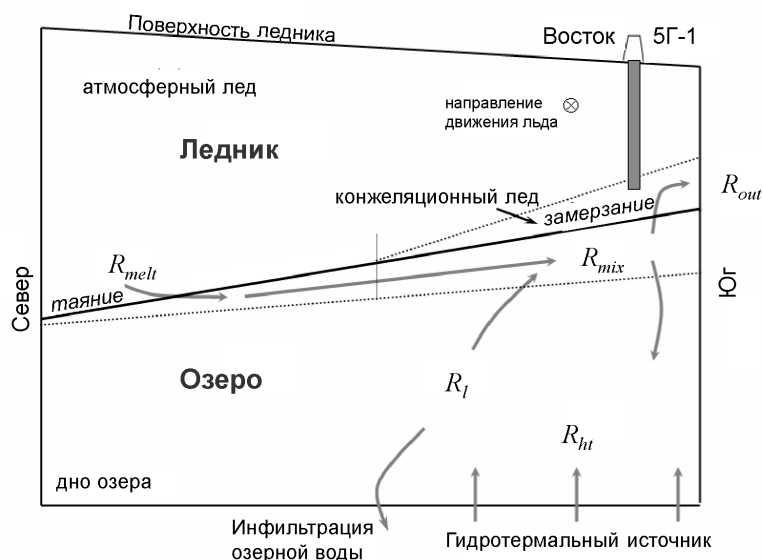


Рис. 5. «1,5-слойная» схема циркуляции воды и изотопного баланса озера Восток, предложенная в работе [12] (см. пояснения в тексте)

озера Восток, возраст которого, по имеющимся оценкам [24], составляет 700–800 тыс. лет. Неопределенность величины R_{melt} оценивалась по среднему квадратическому отклонению 100-тысячелетних средних значений изотопного состава льда за последние 800 тыс. лет по данным керна Купола «С» [18]. При этом мы исходили из предположения, что тающий придонный лед хорошо перемешан в масштабе 100-тысячелетнего климатического цикла. Итоговое значение R_{melt} по нашим оценкам составило $-445,2 \pm 2,9$ ‰ для δD и $-57,25 \pm 0,36$ ‰ для $\delta^{18}O$ [12] (см. рис. 6а). Изотопный состав талой ледниковой воды существенно отличается (примерно на 1 ‰ легче) от изотопного состава озерного льда по содержанию кислорода-18, при статистически незначимом различии в содержании дейтерия (2,6 ‰). Именно эта особенность позволила нам предположить [2] наличие в озере дополнительного, гидротермального источника воды. Позднее, на основе анализа короткопериодных колебаний изотопного состава льда, было сделано предположение о неполном перемешивании талой ледниковой и гидротермальных вод с резидентной водой озера [12].

На рис. 6б показаны оценки изотопного состава резидентной озерной воды для различных сценариев образования озерного льда [12]. Наиболее вероятной следует считать ситуацию, при которой озерный лед на 50 % образован кристаллами внутриводного льда и на 50 % – резидентной водой, замерзшей в изотопном равновесии со льдом. В этом случае, согласно нашей модели, изотопный состав замерзающей воды соответствует сценарию 2 на рис. 6б. При этом если талая ледниковая вода не полностью перемешивается с резидентной озерной водой, то, как следует из приведенной схемы, изотопный состав резидентной воды не равен изотопному составу замерзающей воды. В качестве примера на рисунке показан сценарий 4, при котором замерзающая вода (2) состоит на 80 % из резидентной воды (4) и на 20 % из талой ледниковой воды.

Изотопный состав гидротермальных вод не имеет однозначной связи с изотопным составом питающего эти воды источника [15], поскольку изотопное фракционирование кислорода и водорода в гидротермальных системах определяется сочетанием многих факторов, таких как температура и давление, минеральный состав горных пород и т.д. Принято считать, что на диаграмме $\delta D - \delta^{18}O$ изотопный состав гидротермальных вод связан с составом воды питающего их источника линейной регрессией с наклоном в пределах от 0 до 4; при этом гидротермальные воды обогащены кислородом-18 на 10–15 ‰ (в среднем около 7 ‰) [15]. Область возможных значений изотопного состава гидротермальных источников озера Восток выделена на рис. 6г серым треугольником. В случае, если озеро находится в изотопном равновесии, в соответствии с нашей изотопной моделью (уравнения 1 и 2) R_{ht} равно:

$$R_{ht} = \frac{R_{ice} - R_{melt}}{q_{ht}} + R_l. \quad (3)$$

Определить точное значение R_{ht} по уравнению (3) не представляется возможным, поскольку остается неизвестным q_{ht} . Вероятные значения R_{ht} располагаются на пунктирной линии, которая показана на рис. 6г справа от изотопного состава резидентной воды (R_l), на расстоянии, обратно пропорциональном неизвестному значению q_{ht} .

Если допустить, что изотопный состав гидротермальных вод обогащен на 7 ‰ (для кислорода-18) по отношению к резидентной озерной воде, то R_{ht} окажется равным $-430,5$ и $-50,9$ ‰ для δD и $\delta^{18}O$ (за пределами рис. 6г), а параметр $q_{ht} = 0,14$.

Согласно данным работы [25], осредненная по линии тока льда VFL скорость нарастания конжеляционного льда в южной части озера Восток составляет 5,5 мм/год. Поскольку линия тока, проходящая через станцию Восток, располагается вблизи южного и юго-западного края озера, указанная величина скорости намерзания должна быть близка к максимальной для всего озера, так как очевидно, что ско-

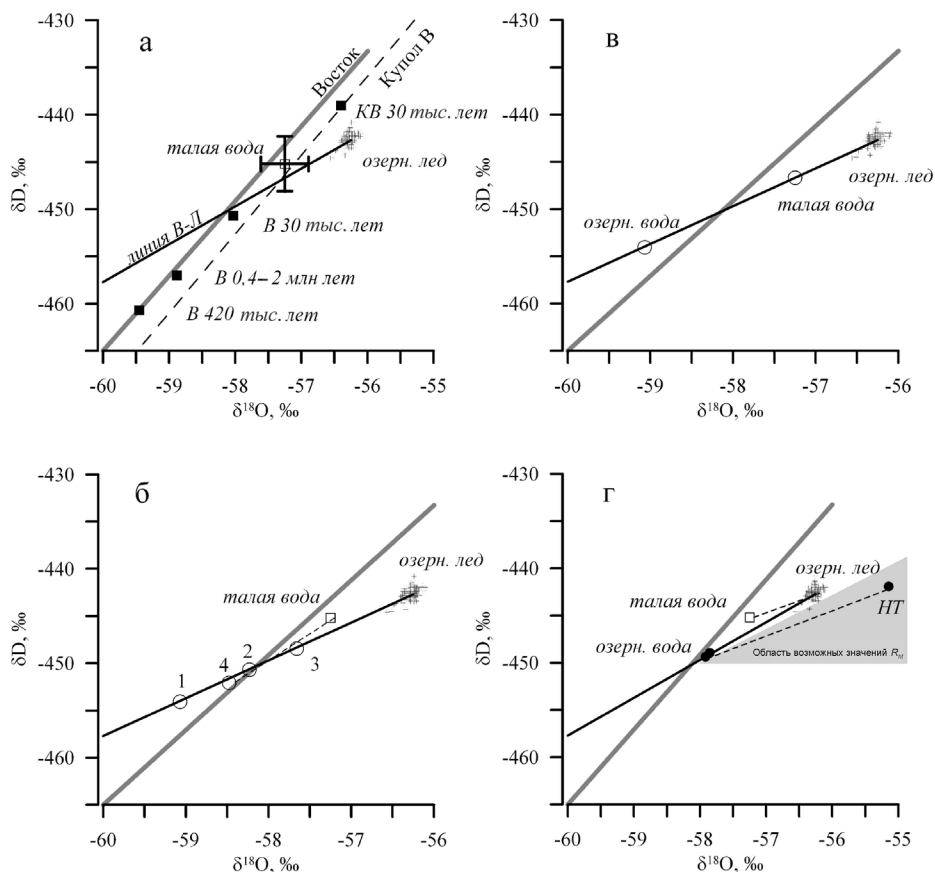


Рис. 6. Компоненты изотопного баланса подледникового озера Восток [по данным 12]:

a – оценка изотопного состава талой ледниковой воды, поступающей в озеро: линии «Восток» и «Купол В» – линии атмосферных осадков для соответствующих станций с наклоном (коэффициентом регрессии) около 8; черными квадратами показаны средние значения изотопного состава ледяного ядра ст. Восток за последние 30 и 420 тыс. лет, за период времени 0,4–2 млн лет, а также ядра ст. «Купол В» за последние 30 тыс. лет; «пустой» квадрат – оценка изотопного состава талой ледниковой воды (с пределами погрешности) по изотопному составу льда на «Куполе В» возрастом 700–800 тыс. лет назад; «линия В–Л» – линия с коэффициентом наклона около 4, соединяющая изотопный состав озерного льда с изотопным составом озерной воды;

б – изотопный состав воды, из которой образуется озерный лед, изучаемый по ядру ст. Восток, для различных сценариев льдообразования: 1 – лед замерзает в равновесии с водой; 2 и 3 – сценарии, при которых лед на 50 % сложен кристаллами внутриводного льда, образовавшимися при минимальной (2) и максимальной (3) скорости их роста; 4 – сценарий, предполагающий неполное перемешивание талой ледниковой и озерной воды, таким образом, что смесь 80 % резидентной воды (4) и 20 % талой ледниковой воды («пустой» квадрат) дает изотопный состав замерзающей воды, совпадающий со сценарием 2;

в – изотопный состав озерной и талой ледниковой воды, а также озерного льда в случае, если озеро находится в неравновесном состоянии с точки зрения баланса массы (сценарий без гидротермального источника воды);

г – наиболее вероятные оценки составляющих изотопного баланса озера Восток. В качестве изотопного состава замерзающей озерной воды взято среднее значение по сценариям 2 и 3 на рис. 6 б; замерзающая вода состоит из 10 % талой воды и 90 % резидентной озерной воды; изотопный состав гидротермальной воды (HT) рассчитан исходя из $q_m = 0,35$ в уравнении 3; серый треугольник ограничивает область возможных значений изотопного состава гидротермальных вод; коэффициент наклона линии, связывающей изотопный состав этих вод с изотопным составом резидентной озерной воды, лежит в пределах от 0 до 4 [15]

рость роста озерного льда уменьшается при движении с юга на север, в область донного таяния ледника. Можно предположить, что значение средней скорости роста льда для всей области намерзания (южной части озера Восток) лежит в пределах от 2,75 до 5,5 мм/год. Площадь озера составляет около 15,5 тыс. км². Предположим далее, что область, в пределах которой образуется озерный лед, занимает половину всей площади озера (7,75 тыс. км²). Таким образом, объем ежегодно образующегося озерного льда равен $2,13-4,26 \times 10^7$ м³, что соответствует $2,0-3,9 \times 10^7$ т воды. Если озеро находится в массовом равновесии, то такая же масса воды должна ежегодно поступать в озеро за счет таяния ледника в северной части подледникового водоема (гидротермы, как указано выше, питаются инфильтрационной водой, поступающей из озера, и, следовательно, не имеют самостоятельного вклада в водный баланс озера).

Используя полученную ранее оценку $q_{hr} = 0,14$, можно рассчитать ежегодную массу воды, возвращающейся в озеро из гидротермальных источников, которая должна составлять от 0,28 до $0,55 \times 10^7$ т в год.

СТЕПЕНЬ СТАБИЛЬНОСТИ ГИДРОЛОГИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ЛЕДНИК–ОЗЕРО

На основе имеющихся в нашем распоряжении данных попытаемся дать оценку степени устойчивости системы ледник–подледниковое озеро Восток. Актуальность проведения такого исследования связана с недавно зарегистрированными быстрыми изменениями высоты поверхности ледника в различных районах Антарктиды, предположительно вызванными перераспределением значительных масс воды между подледниковыми водоемами [13, 28]. Эти наблюдения породили представление о существовании под ледниковым покровом Антарктиды обширной гидрологической сети, образованной системой «озер» и «болот», соединяющихся между собой «реками» и «каналами» [26]. В том случае, если озеро Восток является активным элементом подобной гидрологической сети, многие из сложившихся к настоящему времени представлений о массовом, изотопном, химическом и газовом балансе озера и его экологической системе могут не соответствовать реальности и нуждаться в пересмотре.

Представленные на рис. 6а и 6б диаграммы, отражают изотопный состав озерного льда, талой ледниковой и резидентной озерной воды. На рис. 6в показана аналогичная диаграмма для сценария, при котором озеро не находится в изотопном равновесии, т.е. изотопный состав талой воды (приходной части водного баланса) не равен составу озерного льда (расходной части баланса) и лежит точно на линии «вода–лед» между озерным льдом и озерной водой. Заметим, что реальная изотопная диаграмма (рис. 6а) статистически не отличается от неравновесного сценария, поскольку вследствие относительно большой погрешности оценки изотопного состава талой воды, R_{melt} («пустой» квадрат на рис. 6а), можно допустить, что его значение действительно попадает на линию «вода–лед». Как было показано ранее, различие между изотопным составом талой воды и озерного льда (около 1 ‰ по содержанию кислорода-18) может быть удовлетворительно объяснено наличием дополнительного (гидротермального) источника воды, существование которого подтверждается целым рядом независимых биологических [10, 19], минералогических [5], геохимических [11], изотопных [17] и сейсмологических [4] данных (см. обзор в [12]).

В случае выхода системы из стационарного состояния изотопный состав озерного льда будет стремиться, с течением времени, сравняться с изотопным составом талой воды, чтобы восстановить равновесие. При этом во временном ряду изотопного состава озерного льда должен наблюдаться отрицательный тренд с коэффициентом регрессии $\delta D-\delta^{18}O$, равным 4. Исследованный нами интервал керна охватывает примерно 20-тысячелетний период формирования озерного льда (рис. 1 цв. вклейки), что по порядку величины сопоставимо со временем оборота воды в озе-

ре (порядка 100 тыс. лет). Таким образом, в интервале глубин 3538–3650 м средний изотопный состав озерного льда за счет указанного тренда должен был измениться не менее чем на 0,1 ‰ для $\delta^{18}\text{O}$ и на ~0,4 ‰ для δD . Отсутствие подобного тренда в экспериментальных рядах $\delta^{18}\text{O}$ и $\delta^{18}\text{O}$ [12], казалось бы, не подтверждает сценарий нестационарного состояния озера. И все же имеющиеся данные по изотопному составу озерного льда не позволяют полностью исключить возможность неравновесного состояния озера Восток.

В работе [22] описана теоретически допустимая ситуация, при которой озеро находится в нестационарном (с точки зрения баланса массы) состоянии, но при этом изотопный состав озерного льда не имеет указанного выше тренда. Необходимым условием для этого является устойчивое, поддерживаемое в течение долгого времени превышение приходной части баланса массы над расходной приблизительно на 20 %. Можно показать, что изотопное равновесие в этом случае должно установиться приблизительно через 200 тыс. лет после начала процесса увеличения объема воды в озере. При выполнении этого условия приведенная на рис. 6а схема вполне может соответствовать следующему сценарию развития событий: 1) не менее 240 тыс. лет назад произошло резкое уменьшение объема озера за счет катастрофического сброса воды («йокульлаупа») в подледниковую гидрологическую систему (на возможность такого события с точки зрения гидродинамики указывает целый ряд исследователей, см. обзор в [12]); 2) сразу после этого объем озера начал восстанавливаться (увеличиваться); 3) не менее 40 тыс. лет назад изотопный (но не массовый) баланс озера пришел в равновесие, в результате чего наблюдаемый изотопный профиль озерного льда (датируемый возрастом 40–20 тыс. л.н.) не обнаруживает тренда.

Против этого сценария можно привести ряд существенных возражений. Во-первых, трудно представить, что объем озера мог равномерно увеличиваться на протяжении столь продолжительного времени, поскольку сразу после «йокульлаупа» приток талой воды должен существенно (гораздо больше, чем на 20 %) превышать ее расход на образование конгеляционного льда. Во-вторых, быстрые и существенные по амплитуде изменения в прошлом высоты поверхности ледника должны были привести к значительным пертурбациям в динамике ледникового покрова в районе озера Восток. Игнорирование этих изменений не позволило бы согласовать существующие модели растекания ледникового покрова, не учитывая «йокульлауп», с имеющимися для района озера гляцио-климатическими данными, что не соответствует реальному положению дел [25].

Определим характерный масштаб вертикальных движений поверхности ледника в том случае, если объем озера увеличивается в настоящее время по описанному выше сценарию. Если расходная часть баланса массы составляет $2,0\text{--}3,9 \times 10^7$ т, а приходная часть на 20 % больше, то масса воды в озере ежегодно должна увеличиваться на $4,0\text{--}7,8 \times 10^6$ т, или $4,0\text{--}7,8 \times 10^6$ м³. При площади 15,5 тыс. км² это соответствует скорости утолщения водного слоя озера порядка 0,3–0,5 мм/год. Указанная величина существенно меньше ошибки измерения вертикальных составляющих скорости движения ледника с помощью GPS [23]. Необходимо как минимум 20-летний период наблюдений, чтобы статистически надежно установить наличие или отсутствие вертикальных движений ледника, связанных с подобными долговременными изменениями объема озера. Отметим, что пятилетние геодезические наблюдения в районе станции Восток свидетельствуют о равновесном (в пределах ошибки измерения) состоянии системы ледник–озеро в настоящее время [23].

Таким образом, анализ имеющихся данных приводит к выводу о том, что с большой долей вероятности озеро Восток в течение последних 40 тыс. лет находится в состоянии массового и изотопного равновесия.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные нами комплексные исследования керн конжеляционного льда, нарощенного на основании антарктического ледникового покрова над озером Восток, позволили установить некоторые особенности гидрологического режима этого подледникового водоема. К ним относятся:

1) недостаточно интенсивное перемешивание талой воды и воды, поступающей из гидротермальных источников, с резидентной водой озера;

2) поступление переохлажденной талой воды из северных районов озера Восток ко всем участкам линии тока ледника VFL, на которых происходит нарастание озерного льда;

3) значительную роль в гидрологическом режиме озера играет гидротермальная активность, которая связана с циркуляцией инфильтрационной озерной воды по глубоким разломам в земной коре. Инфильтрационные воды, мигрирующие по разломам и трещинам на глубину несколько километров, могут затем подниматься ко дну озера, в частности, благодаря наблюдаемой в данном районе слабой сейсмотектонической активности [27].

За счет донного таяния ледника в северной части озера в подледниковый водоем ежегодно поступает 20–39 млн т воды, а расход гидротермальных источников на дне озера оценивается в 2,8–5,5 млн т воды в год. Последняя оценка в пересчете на единицу площади озера соответствует интенсивности поступления воды порядка 10^{-1} кг м⁻² год⁻¹, что близко к осредненным по площади данным о расходе гидротермальных источников в Японии [14].

Указанные выше особенности гидрологического режима свидетельствуют о том, что свойства воды, из которой образуется озерный лед, могут существенно отличаться от свойств резидентной воды озера.

Приведенные выводы и оценки основаны на предположении о стационарном состоянии озера Восток, при котором различие в изотопном составе талой ледниковой воды и озерного льда (1 ‰ по $\delta^{18}\text{O}$) рассматривается как результат влияния гидротермальных процессов [2, 12]. Альтернативная интерпретация имеющихся изотопных данных приводит к выводу о нестационарном (с точки зрения баланса массы) состоянии озера. Несмотря на то, что рассмотренный выше сценарий, предполагающий катастрофический сброс воды из озера сотни тысяч лет назад, представляется нам сегодня маловероятным, окончательные ответы на многие вопросы, касающиеся изотопного, газового и гидрологического режимов этого уникального водоема можно будет дать только после проведения прямых измерений соответствующих свойств подледниковой воды в ходе планируемого проникновения в озеро.

Работа выполнена в рамках Проекта 2 подпрограммы «Антарктика» ФЦП «Мировой океан» при финансовой поддержке РФФИ, грант 10-05-01049.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Голубев В.Н. Закономерности ортотропного роста льда из пресной и минерализованной воды // Криосфера Земли. 2003. Вып. 7. № 2. С. 48–56.
2. Екайкин А.А., Липенков В.Я., Йонсен С., Прилепский Э.Б., Шibaев Ю.А. Изотопный состав воды подледникового озера Восток // Материалы гляциологических исследований. 2005. Вып. 98. С. 92–99.
3. Екайкин А.А., Липенков В.Я., Полякова Е.В., Саватюгин Л.М., Шibaев Ю.А., Преображенская А.В., Сократова И.Н. Новые данные о составе, строении и механизме образования конжеляционного льда над подледниковым озером Восток // Проблемы Арктики и Антарктики. 2009. № 3 (83). С. 37–48.
4. Исанина Э.В., Крупнова Н.А., Попов С.В., Масолов В.Н., Лукин В.В. О глубинном строении котловины Восток (Восточная Антарктида) по материалам сейсмологических наблюдений // Геотектоника. 2009. № 3. С. 45–50.

5. Лейченко Г.Л., Беляцкий Б.В., Попков А.М., Попов С.В. Геологическая природа подледникового озера Восток в Восточной Антарктиде // Материалы гляциологических исследований. 2005. Вып. 98. С. 81–91.
6. 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.
7. Черепанов Н.В. Роль термического режима водоема в формировании кристаллической структуры льда // Проблемы Арктики и Антарктики. 1968. Вып. 29. С. 55–63.
8. Шумский П.А. Основы структурного ледоведения. М.: Изд-во АН СССР, 1955. 492 с.
9. Bell R.E., Studinger M., Tikku A.A., Clarke G.K.C., Gutner M.M., Meertens C. Origin and fate of Lake Vostok water frozen to the base of the East Antarctic ice sheet // Nature. 2002. Vol. 416. P. 307–310.
10. Bulat S.A., Alekhina I.A., Blot M., Petit J.R., de Angelis M., Wagenbach D., Lipenkov V.Ya., Vasilyeva L.P., Wloch D.M., Raynaud D., Lukin V.V. DNA signature of thermophilic bacteria from the aged accretion ice of Lake Vostok, Antarctica: implications for searching life in extreme icy environments // International J. Astrobiology. 2004. Vol. 3 (1). P. 1–12. doi: 10.1017/S1473550404001879.
11. 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 Planet. Sci. Lett. 2004. Vol. 222. P. 751–765.
12. Ekaykin A.A., Lipenkov V.Ya., 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 // J. Geophys. Res. 2010. Vol. 115. C05003, doi:10.1029/2009JC005329.
13. Fricker H.A., Scambos T., Bindshadler R., Padman L. An active subglacial water system in West Antarctica mapped from space // Science. 2007. Vol. 315. № 5818. P. 1544–1548.
14. Fujio A. Change and present condition of hot spring resources of Hokkaido on the basis of the data from used hot springs in each prefecture of Japan // Report of the Geological Survey of Hokkaido. 1999. Vol. 70. P. 27–43.
15. Hoefs J. Stable Isotope Geochemistry. Berlin: Springer, 2004. 244 p.
16. Ikeda T., Salamatin A.N., Lipenkov V.Ya., Hondoh T. Diffusion of air molecules in polar ice sheets // Physics of ice core records. Sapporo: Hokkaido University Press. 2000. P. 393–421.
17. Jean-Baptiste P., Petit J.R., Lipenkov V.Ya., Raynaud D., Barkov N.I. Constraints on hydrothermal processes and water exchange in Lake Vostok from helium isotopes // Nature. 2001. Vol. 411. P. 460–462.
18. Jouzel J. and 31 others. Orbital and millennial Antarctic climate variability over the past 800,000 years // Science. 2007. Vol. 317. P. 793–796.
19. Lavire C., Normand P., Alekhina I., Bulat S., Prieur D., Birrien J.L., Fournier P., Hnni C., Petit J.R. Presence of Hydrogenophylus thermoluteolus DNA in accretion ice in the subglacial Lake Vostok // Antarctica, assessed using rrs, cbb and hox, Environmental Microbiology. 2006. Vol. 8 (12). P. 2106–2114.
20. Leitchenkov G.L., Belyatsky B.V., Rodionov N.V., Sergeev S.A. Insight into the geology of the East Antarctic hinterland: study of sediment inclusions from ice cores of the Lake Vostok borehole // Antarctica: A Keystone in a Changing World. USGS Open-File Report. 2007. Vol. 1047. Short Research Paper 014. doi:10.3133/of2007-1047.srp014.
21. Masolov V.N., Popov S.V., Lukin V.V., Sheremet'ev A.N., Popkov A.M. Russian geophysical studies of Lake Vostok, Central East Antarctica // Antarctica – Contributions to Global Earth Sciences Springer Berlin Heidelberg. New York, 2006. P. 135–140.
22. Petit J.R., Ekaykin A.A., Lipenkov V.Y. Has water volume of the Vostok subglacial lake doubled since the last 0.5 millions years? A hint from balance of stable isotope // SCAR Open Science Conference (St.Petersburg, Russia). 2008. Vol. S3.1. Abstr. № O14.
23. Richter A., Popov S.V., Dietrich R., Lukin V.V., Fritsche M., Lipenkov V.Ya., Matveev A.Y., Wendt J., Yuskevich A.V., Masolov V.N. Observational evidence on the stability of the hydro-glaciological regime of subglacial Lake Vostok // Geophysical Research Letters. 2008. Vol. 35. L11502. doi:10.1029/2008GL033397.
24. Salamatin A.N., Petit J.R., Lipenkov V.Ya. An estimate of LV isolation time from a sensitivity experiments for the melting area // EGS-AGU-EUG Joint Assembly. 2003. (Nice, France: European Geophysical Society). Abstr. N 08277.

25. *Salamatin A.N., Tsyganova E.A., Popov S.V., Lipenkov V.Ya.* Ice flow line modeling in ice core data interpretation: Vostok Station (East Antarctica) // *Physics of Ice Core. Records 2.* Sapporo: Hokkaido University Press, 2009. P. 167–194.
26. *Siegert M.J., Le Brocq A., Payne A.J.* Hydrological connections between Antarctic subglacial lakes, the flow of water beneath the East Antarctic Ice Sheet and implications for sedimentary processes // *Glacial Processes and Products: International Association of Sedimentologists.* Blackwell Publishing, 2007. P. 120–135.
27. *Studinger M., et al.* Ice cover, landscape setting, and geological framework of 912 Lake Vostok, East Antarctica // *Earth Planet Sci. Lett.* 2003. Vol. 205. P. 195–210.
28. *Wingham D.J., Siegert M.J., Shepherd A., Muir A.S.* Rapid discharge connects Antarctic subglacial lakes // *Nature.* 2006. Vol. 440. P. 1033–1036.

*V.YA.LIPENKOV, A.A.EKAYKIN, YU.A.SHIBAEV,
E.V.POLYAKOVA, A.V.PREOBRAZHENSKAYA*

HYDROLOGICAL REGIME OF SUBGLACIAL LAKE VOSTOK, AS REVEALED FROM ACCRETED ICE STUDIES

Based on the data of ice core analyses, we have determined the components of mass and water isotopic budgets of Lake Vostok and evaluated contributions of the two main water sources (the bottom ice melting and the hydrothermal waters) to the hydrological regime of the subglacial lake. It is shown that the annual hydrothermal water discharge (2.8-5.5 mt of water per year) is one order of magnitude smaller than the rate of melt water inflow in the northern part of the lake.

Key words: Antarctica, Lake Vostok, ice core, hydrological regime, water, balance, isotope composition, air content hydrothermal waters.