

## Оценка термобарического состояния и изменения баланса массы подледникового озера Восток после вскрытия

© 2014 г. А.Н. Марков, П.Г. Талалай

Цилиньский университет, КНР

am100@inbox.ru

Статья принята к печати 10 августа 2013 г.

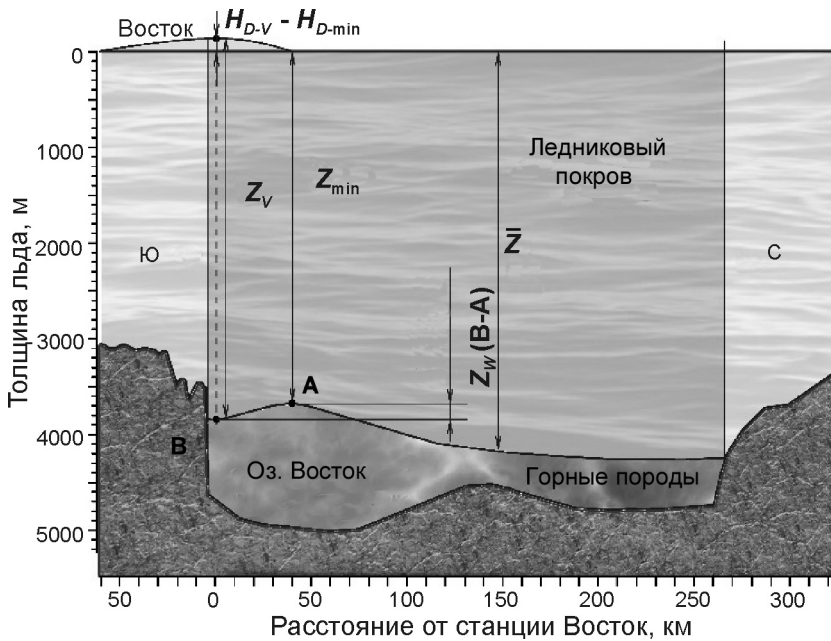
Антарктида, баланс массы льда, бурение во льду, подледниковые озера.  
Antarctica, ice drilling, ice mass balance, subglacial lakes.

Оценка термобарических условий в подледниковых водоёмах Антарктиды – одна из важнейших задач современных исследований, поскольку представляет собой инструмент для адекватного прогнозирования процесса их вскрытия. Разгерметизация замкнутого объёма изолированных субгляциальных водных систем сопровождается нарушением их термобарического равновесия, что вызывает изменение условий фазового перехода на всей поверхности контакта лёд–вода. Происходящее при этом уменьшение давления в воде озера приводит к «опусканию» границы фазового перехода лёд–вода и нарастанию дополнительного слоя конжеляционного льда на нижней поверхности контакта ледника с водой. Реализованное вскрытие оз. Восток и возможная технология повторного проникновения предусматривают подъём воды в скважину из озера как один из этапов, предотвращающих загрязнение реликтовой водной системы. При такой технологии крайне важную роль играют достоверность определения давления в воде оз. Восток и соответственно дифференциального давления на контакте скважины с озером. В статье оцениваются величины давления в замкнутом объёме водной системы оз. Восток и процессы, происходящие в нём при различных вариантах представления о первоначальном барическом состоянии системы. Кроме того, проанализированы возможные последствия некорректной оценки давления.

К настоящему времени подледниковые водные пласты замкнутого объёма в центральной части Антарктиды вскрыты уже три раза [1, 15, 17]. Во всех случаях подледниковые водоёмы вскрывались при гидростатическом давлении столба промывочной жидкости в скважине меньше давления воды в пласте. Такая технология неизбежно вызвала разгерметизацию замкнутой многие тысячелетия и имеющей стабильное состояние подледниковой водной экосистемы. Традиционно дифференциальное давление при контакте скважины с водой рассчитывается, исходя из представления, что давление в водном пласте (в том числе и в оз. Восток) равно локальному литостатическому давлению ледникового покрова в точке бурения. Однако эти представления – некорректны, так как не учитывают негоризонтальное положение водного пласта и основной закон гидростатики (закон Паскаля). И, как показала практика, рассчитанная без этих факторов величина давления в оз. Восток существенно отличается от реальной. Отметим, что нарушение изоляции водоёма не может не сказаться на изменении физического и, в частности, термобарического состояния экосистемы.

### Определение давления в изолированном объёме подледниковой водной системы на примере оз. Восток

Система «Подледниковое озеро Восток» в масштабе периода исследований имеет замкнутый объём, гидростатична и находится в состоянии термобарического равновесия [2]. Корректным описанием барических условий для такой системы и уравнением для определения давления внутри водного объёма и на его границе с внешней оболочкой (коренным ложем и ледниковым покровом) является обобщённый закон Паскаля (основной закон гидростатики). Условия применения этого закона в полной мере соответствуют условиям оз. Восток – замкнутости объёма воды озера и несжимаемости жидкости (воды), заполняющей замкнутый объём озера. Согласно этим условиям, полное давление  $P$  в любой точке внутри и на границе объёма замкнутой системы несжимаемой жидкости водного слоя оз. Восток (рисунок) в однородном поле силы тяжести в соответствии с обобщённым законом Паскаля [10] складывается из двух составляющих:  $P = P_i + P_w$ , где  $P_i$  – внешнее литостатическое давление на весь



Схематический разрез оз. Восток и вышележащей толщи ледникового покрова с юга на север (по результатам [6, 7])  
Schematic cross-section of Lake Vostok and overlying ice sheet from south to north (according to [6, 7])

замкнутый объём воды, МПа;  $P_w$  — гидростатическое давление «столба» воды над точкой внутри объёма, МПа.

Внешнее литостатическое давление  $P_i$  определяется интегральным воздействием на всю поверхность контакта лёд–вода полной составляющей силы тяжести льда всего ледникового покрова, лежащего над озером. Это давление одинаково и представляет собой минимально возможную величину для любой точки внутри и на границе замкнутого объёма воды оз. Восток:

$$P_i = \frac{\iint_{S_0} (\rho_i g V_{dS}) dS}{S_0},$$

где  $\iint_{S_0} (\rho_i g V_{dS}) dS$  — суммарная сила тяжести льда по всей поверхности контакта лёд–вода оз. Восток;  $S_0$  — горизонтальная площадь поверхности контакта лёд–вода, м<sup>2</sup>;  $\rho_i$  — плотность льда (средняя плотность льда по разрезу скважины на станции Восток может быть принята равной 923 кг/м<sup>3</sup> [9]);  $g$  — ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>;  $V_{dS}$  — «элементарный вертикальный» объём льда ледникового покрова над отдельной точкой («элементарной» поверхностью  $dS$ ), м<sup>3</sup>.

Принимая, что плотность льда и поле силы тяжести одинаковы для всего объёма ледникового покрова над оз. Восток, можно произвести упрощение и записать:

$$P_i = \rho_i g V_0 / S_0,$$

где  $V_0$  — общий объём всего ледникового покрова над поверхностью озера;  $S_0$  — общая площадь поверхности горизонтального сечения контакта лёд–вода.

Учитывая, что средняя толщина льда над всей поверхностью контакта лёд–вода оз. Восток  $\bar{Z} = V_0 / S_0$ , получим  $P_i = \rho_i g \bar{Z}$ . Гидростатическое давление  $P_w$  внутри объёма озера создаётся под действием силы тяжести столба воды, высота которого определяется разностью высоты от рассматриваемой точки до точки с максимальной абсолютной высотой на всей поверхности контакта вода–лёд. Это давление зависит от глубины расположения рассматриваемой точки в оз. Восток:

$$P_w = \rho_w g Z_w,$$

где  $\rho_w$  — плотность воды, кг/м<sup>3</sup>;  $Z_w$  — высота столба жидкости, м.

Для корректного определения высоты столба воды в оз. Восток необходимо также учитывать негоризонтальность дневной поверхности ледникового покрова. Например, в точке «В» контакта скважины 5Г-2 с водой оз. Восток (см. рисунок) высота водного столба  $Z_w(B-A)$  составляет:

$$Z_w(B-A) = (Z_V - Z_{min}) - (H_{D-V} - H_{D-min}),$$

где  $Z_V$  — толщина ледникового покрова в точке В;  $Z_{min}$  — минимальная толщина покрова над акваторией озера;  $H_{D-V}$  — превышение высоты дневной поверхности ледникового покрова в точке станции Восток относительно минимальной высоты дневной поверхности  $H_{D-min}$  ледникового покрова над всей акваторией озера.

**Определение давления воды на границе оз. Восток с ледниковым покровом по экспериментальным данным**

В сезоне 2011/12 г. был вскрыт крупнейший подледниковый водоём — оз. Восток, находящийся в центральной части Восточной Антарктиды. Подледниковая вода появилась в скважине 5Г-2 на отметке 3769,3 м [1]. Приток воды в скважину привёл к подъёму столба промывочной жидкости, которая, заполнив незалитую верхнюю часть скважины, излилась из её устья. По результатам буровых работ в сезон 2012/13 г., первые признаки наличия озёрной воды в скважине обнаружены на глубине 3194 м, на расстоянии 575 м (!) [5] от нижней поверхности ледника, а не на расстоянии 40–50 м, как это предполагалось по предварительным оценкам [16]. По нашему мнению, подъём подледниковой воды в скважине прекратился не из-за выравнивания давлений в озере и скважине, а связан с перекрытием потока в результате перемерзания малого по площади канала, по которому поступала вода. Таким каналом, в частности, могла быть «трещина» во льду, возникшая из-за гидроразрыва в призабойной части скважины в связи с большим дифференциальным давлением. Оценим давление в воде оз. Восток и дифференциальное давление на контакте скважины с озером для различных вариантов барического состояния системы «озеро Восток — ледниковый покров».

**Вариант I.** *Озёрное давление в точке выхода скважины 5Г-2 в подледниковое оз. Восток считается равным локальному литостатическому давлению ледяной толщи в точке бурения:*

$$P_1 = \rho_i g(Z_V - z_f) \approx P_i = 33,747 \text{ МПа},$$

где  $Z_V$  — мощность ледника на станции Восток, исходя из длины скважины 5Г-2 по данным бурения 3769,3 м [1] и с учётом данных [8] об отклонении скважины от вертикали,  $\cong 3761$  м;  $z_f$  — «фирновая поправка», для условий станции Восток  $z_f = 34$  м [14].

Прогнозный расчёт давления в оз. Восток для реализации технологии его вскрытия в феврале 2012 г. был осуществлён именно по этому варианту. Однако, по нашему мнению, он ошибочен. Давление в замкнутом водном пласте, имеющем при значительных размерах сложную негоризонтальную форму водной поверхности [6, 7], не может быть равно литостатическому давлению в локальной точке контакта скважины 5Г-2 с водой.

**Вариант II.** *Давление в воде оз. Восток складывается из внешнего давления всей массы льда над поверхностью озера и давления «столба» воды в оз. Восток,*

*находящейся над рассматриваемой точкой (на рисунке — высота «столба» между точками А и В).*

Внешнее литостатическое давление  $P_L$  при средней мощности покрова над оз. Восток  $\bar{Z} = V_0/S_0 = 4091$  м (по данным [6] и личному сообщению С.В. Попова) с учётом фирновой поправки  $z_f = 34$  м (которая принимается одинаковой над всем оз. Восток) составляет:

$$P_L = \rho_i g(\bar{Z} - z_f) \approx 36,736 \text{ МПа}.$$

Согласно закону Паскаля, величина внешнего литостатического давления со стороны ледникового покрова одинакова и является минимально возможной («реперной») для любой точки внутри и на границе замкнутого объёма воды оз. Восток. К этой величине добавляется давление «столба» воды в озере, находящейся над рассматриваемой точкой.

Предельные значения толщины льда над акваторией озера колеблются от  $Z_{\min} = 3600$  м в южной части до  $Z_{\max} = 4350$  м в северной [6]. На станции Восток, где в результате бурения глубокой скважины 5Г-2 достигнута граница контакта лёд–вода на истинной глубине  $Z_V = 3761$  м, абсолютная высота дневной поверхности ледникового покрова составляет  $H_{D-V} = 3488$  м ([http://www.aari.aq/stations/vostok/vostok\\_ru.html](http://www.aari.aq/stations/vostok/vostok_ru.html)), а минимальная над акваторией оз. Восток  $H_{D-\min} = 3465$  м [6]. Соответственно высота водного «столба» над точкой В контакта скважины 5Г-2 с водой до высшей точки А воды в озере будет равна:

$$Z_{w(B-A)} = (Z_V - Z_{\min}) - (H_{D-V} - H_{D-\min}) = 138 \text{ м},$$

а величина гидростатического давления «столба А–В»

$$P_{w(B-A)} = \rho_w g Z_{w(B-A)} \approx 1,354 \text{ МПа}.$$

Общее давление на границе лёд–вода в точке выхода скважины 5Г-2 в оз. Восток должно составлять (индекс I или II соответствует варианту I или II):

$$P_{II} = P_L + P_{w(B-A)} \approx 38,090 \text{ МПа}.$$

Вероятнее всего, процесс вскрытия характеризовался параметрами именно этого варианта. Обратим внимание, что, согласно радиолокационным исследованиям [7], в 30 км от станции Восток обнаружена цепочка подледниковых водных линз, абсолютная высота которых превышает уровень водной поверхности оз. Восток на 850 м. Если предположить, что эти водные линзы могут соединяться с оз. Восток, то объективное давление на границе лёд–вода в точке контакта скважины 5Г-2 с озером может значительно превысить значение  $P_{II}$ , рассчитанное выше, и составить 45,07 МПа.

Оценка давления воды в оз. Восток и изменение состояния системы «лёд–вода» в подледниковом озере после нарушения его изоляции\*

Параметры	Варианты	
	I	II
Озёрное давление в точке выхода скважины 5Г-2 $P_{I,II}$ , МПа	33,747	38,090
Дифференциальное давление в точке выхода скважины 5Г-2 в оз. Восток $\Delta P_{I,II}$ , МПа	-0,305	-4,649
Подъём воды в скважине 5Г-2 $\Delta h_{I,II}$ , м	31,12	3883

\*Расчёт  $\Delta h_{I,II}$  сделан для двух вариантов: I – для ситуации компенсации дифференциального давления за счёт подъёма воды в скважину не более чем на величину  $\Delta H = 60$  м верхней незаполненной её части, без излияния промывочной жидкости из скважины; II – для ситуации подъёма воды за счёт незалитой части скважины ( $\Delta H = 60$  м), вытеснения промывочной жидкости и замены её на воду во всей остальной части свежины, а также условного «поднятия» столба воды выше устья скважины.

#### Дифференциальное давление при вскрытии подледниковых водоёмов

Под действием дифференциального давления  $\Delta P_{I,II}$ , представляющего собой разницу между гидростатическим давлением промывочной жидкости в скважине  $P_0$  и давлением воды в озере  $P_{I,II}$ , т.е.  $\Delta P_{I,II} = P_0 - P_{I,II}$ , озёрная вода поднимется вверх по стволу скважины, если дифференциальное давление отрицательное или, наоборот, промывочная жидкость проникнет в подледниковый водоём при положительном дифференциальном давлении. Согласно имеющимся данным [4] и их экстраполяции, гидростатическое давление столба промывочной жидкости на забое скважины 5Г-2 при вскрытии оз. Восток  $P_0 = 33,516$  МПа. Дифференциальное давление на контакте лёд–вода и предполагаемый подъём воды в скважине 5Г-2 для разных вариантов оценки давления в воде оз. Восток приведены в таблице.

Вариант I, по которому на основании предварительных оценок ситуации [16] происходило вскрытие оз. Восток, предполагает незначительное поднятие воды в скважине – лишь на 31 м. Однако этот вариант не только не учитывает зарегистрированные по данным радиолокации превышение уровня поверхности озера над точкой вскрытия и большой объём льда (среднюю мощность ледникового покрова) над всей акваторией озера по сравнению с точкой вскрытия, но и игнорирует основной закон гидростатики – закон Паскаля. Варианта II принимает во внимание не ис-

пользованные в варианте I объективные данные о морфологии ледникового покрова и закономерностях гидростатики. В соответствии с этим вариантом предполагается полное заполнение скважины водой и выливание её через устье. Это означает, что избыточное давление воды в оз. Восток невозможно скомпенсировать столбом жидкости в скважине, имеющей плотность, равную плотности воды озера. В таком случае вода будет изливаться из устья скважины до тех пор, пока не перемерзнет ствол скважины. Если этого не произойдёт, то остановить поток воды оз. Восток через скважину будет сложной технической задачей. В действительности, подъём воды в скважине произошёл до 575 м и остановился, вероятнее всего, исходя из представленных оценок, в результате образования ледяной пробки.

#### Изменение термобарических условий на контакте лёд–вода со стороны оз. Восток после вскрытия

Температура фазового перехода лёд–вода  $t_m$  зависит от давления с коэффициентом пропорциональности  $k = 0,0753$  °С/МПа [3]:  $t_m = kP$ . При нарушении изоляции оз. Восток скважиной, в которой давление столба промывочной жидкости меньше, чем давление в озере на величину дифференциального давления  $\Delta P$ , во всем объёме оз. Восток, согласно закону Паскаля, давление уменьшится на эту же величину. На поверхности контакта вода–лёд давление также станет меньше на  $\Delta P$ , и в соответствии с этим температура фазового перехода изменится на величину  $\Delta t = k\Delta P$ . Это означает, что вся граница фазового перехода лёд–вода должна «опуститься» на некоторый интервал  $\Delta Z$ , пропорциональный  $\Delta t$ . Для оценки величины  $\Delta Z$  необходимы прямые данные о величине и знаке градиента температуры в области контакта льда с водой. Однако на современном этапе исследований этих наблюдений нет, поэтому рассчитывать  $\Delta Z$  на основании экстраполяции измерений температуры во льду без данных о температуре в воде некорректно. Можно лишь оценить качественные характеристики этого процесса: «сбрасывание» озёрного давления неизбежно инициирует снижение границы фазового перехода лёд–вода на подошве ледникового покрова и образование нового слоя льда. Однако «открытое» состояние системы оз. Восток и образование в результате этого конжеляционного льда – крайне многофакторные процессы, поэтому наряду с «прямыми» происходят и «обратные» явления, «тормозящие» намораживание льда на поверхности озера и обуславливающие самостабилизацию системы.

Для объективной оценки мощности намёрзшего слоя льда и его объёма на всей акватории оз. Восток необходимо знать параметры различных процессов, среди которых: скорость распространения изменения дифференциального давления в объёме воды озера; скорость намерзания слоя льда на границе контакта вода–лёд; увеличение объёма вещества в озере при фазовом переходе воды в лёд; количество тепла, выделенного при фазовом переходе воды в лёд; первоначальное сечение потока воды, поступающей в скважину; изменение вязкости воды по скважине при температуре, близкой к фазовому переходу в лёд; скорость подъёма воды по скважине; скорость замерзания воды в скважине; скорость уменьшения сечения потока воды в результате перемерзания скважины.

Количественные оценки соотношений изменений температуры, объёма, давления и температуры фазового перехода – сложные взаимосвязанные задачи. Их дальнейшее решение с правильной оценкой изменения теплового состояния системы при фазовом переходе может быть рассмотрено нами в последующей работе. На современном этапе исследований можно лишь косвенно оценить некоторые из перечисленных параметров. Так, скорость распространения изменения дифференциального давления в объёме воды оз. Восток  $V_S$  происходит со скоростью звука и её можно рассчитывать по упрощённой формуле Лероя:

$$V_S = 1492,9 + 3(T - 10) - 0,006(T - 10)^2 - 0,04(T - 18)^2 + 1,2(S - 35) - 0,01(T - 18)(S - 35) + Z_V/61,$$

где  $Z_V$  – глубина (высота столба промывочной жидкости) в точке контакта скважины 5Г-2 с озером в районе станции Восток, м;  $T$  – температура воды, °C;  $S$  – солёность, ‰.

Эта формула обеспечивает точность порядка 0,1 м/с для  $T < 20$  °C и  $Z < 8000$  м [12]. При условиях в точке выхода скважины 5Г-2 в озеро  $Z_V \cong 3761$  м,  $T = -2,5$  °C и  $S = 0$  ‰, скорость распространения звука и соответственно скорость распространения изменения давления в оз. Восток  $V_S = 1450$  м/с. Максимальное расстояние от скважины 5Г-2 до границы объёма воды, т.е. до северного берега оз. Восток, около 287 км. Волна изменения давления пройдёт по всей поверхности и по всему объёму оз. Восток в течение 198 секунд, т.е. чуть более трёх минут. Видимый излив промывочной жидкости из устья скважины (т.е. «открытое» состояние системы) при вскрытии оз. Восток наблюдался в течение четырёх минут [11], поэтому можно предположить, что после разгерметизации давление изменилось во всём объёме оз. Восток.

Вероятно, что такие процессы, как частичное понижение дифференциального давления при подъёме воды в скважину, выделение тепла при фазовом переходе воды в лёд, относительно быстрое перемерзание скважины и восстановление изоляции состояния оз. Восток, не позволили нарасти новому слою льда до предельных значений. Однако ввиду снижения давления во всём объёме воды, процесс намерзания льда происходил на всей площади контакта лёд–вода оз. Восток и его масштабы были значительны. При общей площади поверхности оз. Восток без учёта островов  $S_0 = 15790$  км<sup>2</sup> (С.В. Попов, личное сообщение) даже 1 мм (!) вновь намёрзшего льда – это 15,79 км<sup>3</sup>, что соответствует  $14,6 \cdot 10^6$  т (!) «прибавочной» массы ледникового покрова над акваторией оз. Восток. Тем не менее, многие из параметров процесса вскрытия объективно не определены. В частности, не известно первоначальное сечение потока на контакте скважины с водой, которое весьма значимо для расчётов времени замерзания скважины и времени открытого состояния системы. Но можно оценить его косвенно. Так, в точке «вскрытия» скорость воды  $V_w$ , обусловленная дифференциальным давлением  $\Delta P$  на поверхности контакта скважины и озера, вычисляется исходя из следующего уравнения гидродинамики:

$$\Delta P = \rho_w V_w^2 / 2.$$

Для варианта I эта скорость должна составлять около 25 м/с, а для варианта II – 96 м/с. Однако такой «катастрофической» скорости излияния промывочной жидкости из устья скважины не наблюдалось. Это можно объяснить, например, крайне малым сечением контакта скважины с озером. Согласно сообщённым данным о времени излияния из устья скважины [11] и объёме воды, поступившей из озера в скважину [1], по рассчитанной скорости потока можно оценить сечение потока в области контакта скважины 5Г-2 с озером. Оно составляет 666 мм<sup>2</sup> для варианта I и 177 мм<sup>2</sup> для варианта II. Таким образом, контакт скважины 5Г-2 с водой оз. Восток произошёл лишь на 0,04–0,01 части полного возможного сечения скважины. Незначительное сечение потока при высокой вероятной его скорости позволило за сравнительно короткое время состояться процессу замерзания воды озера в скважине, восстановлению изолированного состояния системы и остановке потока. Если будет ситуация контакта полного сечения скважины с озером, то параметры потока могут в 25÷100 раз превосходить характеристики произошедшего процесса. При таком потоке перемерзание скважины

будет происходить значительно дольше и остановка изливающейся промывочной жидкости и воды оз. Восток из устья скважины может стать серьёзной технологической проблемой.

#### **Релаксация подледниковой водной системы после восстановления её изоляции**

Если озёрная вода, попав в скважину, замёрзнет и перекроет её ствол, то отрицательное дифференциальное давление снимается и изоляция подледниковой водной системы восстанавливается. Под воздействием намёрзшей на поверхности оз. Восток массы льда и дополнительного давления, возникшего от увеличения объёма вещества в замкнутом пространстве при фазовом переходе воды в лёд, «новое» давление в озере будет выше. Температура фазового перехода лёд–вода при таком давлении станет ниже, чем до момента вскрытия. Возвращение водной системы в состояние изоляции приведёт к повышению границы фазового перехода лёд–вода, т.е. к таянию намёрзшего конжеляционного льда и уменьшению толщины ледникового покрова над всей поверхностью контакта лёд–вода.

#### **Выводы и рекомендации**

При вскрытии изолированной подледниковой водной системы оз. Восток скважиной с отрицательным дифференциальным давлением неизбежно нарушается термобарическое равновесие и значительно изменяется состояние системы. Это инициирует протекание в ней различных взаимосвязанных процессов, в частности: уменьшение давления во всём объёме оз. Восток; «опускание» границы фазового перехода лёд–вода и намерзание дополнительного слоя конжеляционного льда к подошве ледникового покрова на всей поверхности озера; изменение относительного объёма фаз (вода–лёд) на всей поверхности озера; увеличение массы и давления ледникового покрова над озером; выделение тепла при фазовом переходе воды в лёд на всей поверхности озера; изменение конвективных потоков воды в области, близкой к поверхности озера. После перемерзания скважины изолированное состояние оз. Восток восстанавливается и процессы происходят в обратном направлении. Таким образом, изолированная сотни тысяч лет до вскрытия система становится разбалансированной.

В связи со значительной многофакторностью процессов и отсутствием на современном этапе множества достоверных данных о первичных параметрах, для объективной оценки количества намёрзшего льда на контакте оз. Восток с ледни-

ковым покровом при значительном «одномоментном» уменьшении давления в воде озера и последующих взаимосвязанных явлениях требуются дальнейшие всесторонние исследования. Однако даже 1 мм нового слоя льда, намёрзшего над всей акваторией оз. Восток, — это  $14,6 \cdot 10^6$  т (!) «прибавочной» массы ледникового покрова.

Реализованный при вскрытии оз. Восток вариант оценки ситуации, при котором давление во всём объёме оз. Восток считается равным локальному литостатическому давлению ледяной толщи лишь в отдельной точке выхода скважины 5Г-2 в озеро, не учитывает сложную форму и полный объём (массу) ледникового покрова над всей поверхностью оз. Восток. Как показали результаты бурения, оценка дифференциального давления выполнена неправильно и отличается от расчётов на основании закона Паскаля и объективных данных радиолокации о морфологии прибрежного района и форме ледникового покрова над озером, как минимум, на 4,344 МПа (более чем в 10 раз). Для корректного научного исследования в дальнейшую работу и технологию по проникновению в оз. Восток необходимо внести существенные изменения, учитывающие аномально высокое давление в озере и многофакторность процессов, происходящих при его вскрытии.

Вероятно, одним из способов сохранения «реликтового» термобарического равновесия на завершающем этапе «вскрытия» оз. Восток может быть наличие естественной или искусственной мембраны, которая надёжно изолирует замкнутый объём подледниковой водной системы от физических условий в скважине. Естественной мембраной может быть недобуренный слой льда. Один из таких вариантов уже предлагался на стадии разработки технологии проникновения в оз. Восток [16] с помощью «термоиглы». Сохранение целостности ледяной мембраны (причём различной толщины, вплоть до полной мощности ледникового покрова) возможно также «бесскважинным» способом посредством извлекаемого полуавтономного «термозонда» [13]. Этот снаряд имеет внутреннее устройство размотки–смотки кабеля, две параболические термобуровые головки для попеременного плавления льда в нижней или верхней области в зависимости от направления движения, а также устройства для автономного экспресс-анализа окружающей среды. По мере продвижения снаряда сквозь ледяную мембрану лёд плавится перед зондом, а талая вода повторно замерзает за ним, восстанавливая целостность мембраны. В обоих вариантах («термоигла» или «термозонд») герме-

тичность замкнутого объёма оз. Восток сохраняется каждый раз при проникновении и возвращении снаряда. Искусственная мембрана может иметь различное конструктивное решение по принципу «шлюзовой камеры», через которую можно многократно повторять транзит бурового снаряда или исследовательских зондов к озеру и в его глубины.

### Литература

1. Васильев Н.И., Липенков В.Я., Дмитриев А.Н., Подоляк А.В., Зубков В.М. Результаты и особенности бурения скважины 5Г и первого вскрытия озера Восток // Лёд и Снег. 2012. № 4 (120). С. 12–20.
2. Зотиков И.А. Антарктическое подледниковое озеро Восток: Гляциология, биология, планетология. М.: Научный мир, 2010. 148 с.
3. Зотиков И.А., Николенко А.В. Исследования зависимости теплофизических характеристик льда от гидростатического давления и температуры // МГИ. 1991. Вып. 71. С. 22–27.
4. Лукин В.В. Последние шаги перед началом проникновения в озеро Восток // Пресс-релиз ААНИИ. 15 декабря 2011 г. [http://www.aari.nw.ru/docs/press\\_release/2011/Vostok\\_1412\\_add.pdf](http://www.aari.nw.ru/docs/press_release/2011/Vostok_1412_add.pdf)
5. Липенков В.Я., Екайкин А.А., Васильев Н.И., Подоляк А.В. Буровые работы на станции Восток в сезонный период 58-й РАЭ // Отчёт РАЭ. 15 марта 2013 г.
6. Попов С.В., Масолов В.Н., Лукин В.В. Озеро Восток, Восточная Антарктида: мощность ледника, глубина озера, подледный и коренной рельеф // Лёд и Снег. 2011. № 1 (113). С. 25–35.
7. Попов С.В., Черноглазов Ю.Б. Подледниковое озеро Восток, Восточная Антарктида: береговая линия и окружающие водоёмы // Лёд и Снег. 2011. № 1 (113). С. 13–24.
8. Саламатин А.Н., Вострецов Р.Н., Petit J.-R., Липенков В.Я., Барков Н.И. Геофизические и палеоклиматические приложения составного температурного профиля из глубокой скважины на станции Восток // МГИ. 1998. Вып. 85. С. 233–240.
9. Lipenkov V.Y., Salamatin A.N., Duval P. Bubbly-ice densification in ice sheets: II. Applications // Journ. of Glaciology. 1997. V. 43. № 145. P. 397–407.
10. Feynman R. F., Leighton R.B., Sands M. The Feynman Lectures on Physics. Addison-Wesley Publishing Company, INC. 1963–1964. 1400 p.
11. Lukin V., Lipenkov V., Vasiliev N. Drilling into subglacial Lake Vostok // Report on XXXII SCAR Open Science Conference, 15–19 July 2012. Portland, USA.
12. Rodert J. Urick Principles of underwater sound. McGraw-Hill, 1975. 384 p.
13. Talalay P.G., Markov A.N., Sysoev M.A. New frontiers of Antarctic subglacial lakes exploration // Geography. Environment. Sustainability. 2013. V. 6. № 1. P. 14–28.
14. Tchistyakov V.K., Kracilev A., Lipenkov V.Ya., Balestrieri J.Ph., Rado C., Petit J.R. Behavior of a deep hole drilled in ice at Vostok Station // Memoirs of National Institute of Polar Research. 1994. V. 49. P. 247–255.
15. Ueda H.T. Byrd Station drilling 1966–69 // Annals of Glaciology. 2007. V. 47. P. 24–27.

16. Verkulic S.R., Kudryashov B.B., Barkov N.I., Vasiliev N.I., Vostretsov R.N., Dmitriev A.N., Zubkov V.M., Krasilev A.V., Talalay P.G., Lipenkov V.Ya., Savatyugin L.M., Kuz'mina I.N. Proposal for penetration and exploration of sub-glacial Lake Vostok, Antarctica // Memoirs of National Institute of Polar Research: Special issue. 2002. V. 56. P. 245–252.
17. Wilhelms F. Sub-glacial penetration from an ice driller's and a biologist's perspective // Geophys. Research Abstracts. 2007. V. 9. 09619.

### Summary

Estimation of temperature and pressure conditions in the subglacial reservoirs is one of the most important tasks of modern subglacial research, since it provides an adequate tool for predicting the process of their accessing. This paper presents the estimation of pressure in the subglacial reservoirs for different baric system statuses. Opening of isolated subglacial reservoirs is attended by disturbance of their thermobaric equilibrium, thus the conditions of phase transition are changed on the entire surface of the ice-water contact. At the same time reducing the pressure in the subglacial reservoirs leads to «lowering» of the phase transition of ice-water boundary and to the growth of additional layer of congelation ice on the entire bottom surface of the ice sheet contact with water. Realized accessing of Lake Vostok and technology re-entry involves water rise into the borehole from the lake as one of the steps to prevent pollution of relict water system. With the use of this technology the reliability of estimate the pressure in Lake Vostok is extremely important and, consequently, the value of the differential pressure when the borehole accesses with lake. The paper presents analysis of the possible consequences of incorrect estimation of the pressure in isolated water system of Lake Vostok, when the borehole accesses in conditions of incomplete compensation of subglacial water pressure by hydrostatic pressure of the drilling fluid column.

**Примечание редакции.** Редакции журнала не известны методы оценки давления воды, использованные при проникновении в подледниковое озеро Восток, когда оно считалось равным 375 МПа, как это отмечено в статье В.В. Лукина «Путь к изучению вод озера Восток открыт» [Проблемы Арктики и Антарктики. 2012. № 1 (91). С. 6–19]. Поэтому варианты оценки приводятся в интерпретации авторов этой статьи.