ГЛЯЦИОЛОГИЯ И КРИОЛОГИЯ
GLACIOLOGY AND CRYOLOGY OF THE EARTH

https://doi.org/10.30758/0555-2648-2021-67-4-348-367
УДК 551.324.412

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ ORIGINAL ARTICLE

ТЕМПЕРАТУРА ПЛАВЛЕНИЯ ЛЬДА И ГАЗОСОДЕРЖАНИЕ ВОДЫ НА КОНТАКТЕ ЛЕДНИКА С ПОДЛЕДНИКОВЫМ ОЗЕРОМ ВОСТОК

В.Я. ЛИПЕНКОВ[1], А.В. ТУРКЕЕВ[1], Н.И. ВАСИЛЬЕВ[2], А.А. ЕКАЙКИН[1,3], Е.В. ПОЛЯКОВА[1]*

[1] — *ГНЦ РФ Арктический и антарктический научно-исследовательский институт, Санкт-Петербург, Россия*

[2] — *Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия*

[3] — *Санкт-Петербургский государственный университет, Институт наук о Земле, Санкт-Петербург, Россия*

[*]*lipenkov@aari.ru*

Резюме

На основе зависимости температуры плавления льда при высоких давлениях от концентрации растворенных в воде газов предпринята попытка оценить содержание воздуха в подледниковой воде под станцией Восток. По данным скважинной термометрии, выполненной до глубины 3753 м, а также по результатам прямых измерений температуры озерной воды, поступившей в скважину после второго вскрытия озера Восток, определены наиболее вероятные значения температуры плавления льда (–2,72 °С) и концентрации растворенного в воде воздуха (2,23 г·л$^{-1}$) на контакте ледника с подледниковым водоемом (глубина 3758,6 м, давление 33,78 МПа). Наша оценка концентрации воздуха в озерной воде в 19 раз превышает газосодержание ледникового льда — основного источника газов в озере, но в 1,6 раза меньше предельной растворимости воздуха в воде в равновесии с гидратной фазой. Расчетное значение концентрации растворенного кислорода (0,53 г·л$^{-1}$) существенно превышает содержание O_2 в любых других известных водоемах планеты.

Ключевые слова: Антарктида, газосодержание воды, гидраты воздуха, концентрация кислорода, подледниковое озеро, температура плавления льда, термометрия.

Для цитированя: *Липенков В.Я., Туркеев А.В., Васильев Н.И., Екайкин А.А., Полякова Е.В.* Температура плавления льда и газосодержание воды на контакте ледника с подледниковым озером Восток // Проблемы Арктики и Антарктики. 2021. Т. 67. № 4. С. 348–367. https://doi.org/10.30758/0555-2648-2021-67-4-348-367.

Поступила 14.10.2021 **После переработки 12.11.2021** **Принята 15.11.2021**

MELTING TEMPERATURE OF ICE AND TOTAL GAS CONTENT OF WATER AT THE ICE-WATER INTERFACE ABOVE SUBGLACIAL LAKE VOSTOK

VLADIMIR YA. LIPENKOV[1], ALEXEY V. TURKEEV[1], NIKOLAI I. VASILEV[2], ALEXEY A. EKAYKIN[1,2], EKATERINA V. POLIAKOVA[1]

[1] — *State Scientific Center of the Russian Federation Arctic and Antarctic Research Institute, St. Petersburg, Russia*

[2] — *St. Petersburg Mining University, St. Petersburg, Russia*

[3] — *St. Petersburg State University, Institute of Earth Sciences, St. Petersburg, Russia*

**lipenkov@aari.ru*

Summary

It is generally assumed that the gas composition and the total gas content of Lake Vostok's water are, to a large extent, governed by the budget of atmospheric gases entering the lake together with glacier ice melt, mostly in its northern part. Since the ice accretion that prevails in the south of the lake leads to the exclusion of gases during the freezing process, these gases can build up in the lake water. Earlier theoretical works [2, 3] have demonstrated that about 30 water residence times are required to attain equilibrium between gases in solution and those in a hydrate phase, which sets the upper bounds of concentrations of nitrogen and oxygen dissolved in sub-ice water (~2.7 g N_2 L^{-1} and ~0.8 g O_2 L^{-1}). Here we attempt to estimate the real gas content of the lake water based on the link between the pressure melting temperature of ice and the concentration of gases dissolved in the liquid phase [2]. We use the stacked borehole temperature profile extended to 3753 m depth and the measurements of temperature of sub-ice water that entered the borehole after the second unsealing of Lake Vostok to estimate the melting temperature of ice (–2.72 ± 0.1 °C) at the ice sheet-lake interface (depth 3758.6 ± 3 m, pressure 33.78 ± 0.05 MPa). The gas content of the near-surface layer of lake that corresponds to this melting temperature is calculated to be 2.23 g·L^{-1}, meaning that the concentration of dissolved oxygen must be as high as 0.53 g·L^{-1}, i. e. one-two orders of magnitude higher than in any other known water bodies on our planet. The inferred gas content of sub-ice water is, by a factor of 1.6, lower than the maximal solubility of air in water in equilibrium with air hydrate, though it is still higher, by a factor of 19, than the total air content of melting glacier ice. The relatively low concentration of dissolved air in the near-surface layer of the lake revealed in this study provides a new experimental constraint for understanding the gas distribution in Lake Vostok as affected by the circulation and mixing of water beneath the ice sheet.

Keywords: air hydrate, Antarctica, borehole temperature measurements, dissolved oxygen concentration, gas content of water, melting temperature of ice, subglacial lake.

For Citation: *Lipenkov V.Ya., Turkeev A.V., Vasilev N.I., Ekaykin A.A., Poliakova E.V.* Melting temperature of ice and total gas content of water at the ice-water interface above subglacial Lake Vostok. *Problemy Arktiki i Antarktiki.* Arctic and Antarctic Research. 2021, 67 (4): 348–367. [In Russian]. https://doi.org/10.30758/0555-2648-2021-67-4-348-367.

Received 14.10.2021 **Revised 12.11.2021** **Accepted 15.112021**

ВВЕДЕНИЕ

Центральными вопросами изучения подледникового озера Восток, порождающими больше всего споров среди специалистов и вызывающими наибольший интерес у широкой публики, являются: 1) возможность существовании жизни в озере и способы ее адаптации к экстремальным условиям этого уникального водоема и 2) оценка концентрации газов, в том числе кислорода, в подледниковой воде. Эти вопросы тесно связаны между собой, так как газовый состав озерной воды является тем параметром изучаемой водной экосистемы, который определяет и одновременно отражает видовое разнообразие подледниковой микробиоты, создает условия, способствующие или препятствующие развитию жизни подо льдом. Кроме того, сведения,

которые мы получаем о содержании газов в озере, должны согласовываться с общими представлениями о гидрологическом режиме подледникового водоема, которые постепенно формируются на основе независимых данных об изотопном, газовом, химическом и биологическом составах озерного льда и результатов геофизических исследований скважины. Таким образом, точная оценка содержания газов в озерной воде имеет ключевое значение для реконструкции многих важнейших характеристик озера Восток до начала прямых исследований его водной толщи.

В настоящее время считается общепринятым, что газовый состав воды озера Восток в основном определяется бюджетом атмосферных газов — кислорода и азота, которые поступают в озеро с талой водой преимущественно в северной части подледникового водоема. Поскольку газосодержание конжеляционного (озерного) льда, нарастающего на нижнюю поверхность ледника в южной части озера, где расположена станция Восток, на два-три порядка ниже газосодержания тающего ледникового льда (~0,1 г·л$^{-1}$), атмосферный воздух постепенно накапливается в озере. Объем воздуха, ежегодно «закачиваемого» в озеро из атмосферы, оценивается в (1,8–3,5)·10^6 м^3 (н. у.) [1].

Начало изучению газового режима подледникового озера Восток было положено в работе [2]. В ней впервые было показано, что если насыщение озера газами в результате интенсивного массообмена между ним и ледниковым покровом продолжалось в течение достаточно долгого времени (0,2–1,6 млн лет), то после примерно 30 циклов полного обновления воды в озере концентрации N_2 и O_2, растворенных в воде, должны достигнуть своих пределов, определяемых равновесной растворимостью этих газов в присутствии гидрата воздуха. Чуть позднее исследование роли смешанных гидратов атмосферных газов в газовом режиме озера было продолжено в работе [3] с привлечением данных и расчетов по двуокиси углерода и инертным газам. Опубликованные в этих статьях оценки максимально возможной концентрации в озерной воде растворенных газов (3,2–3,5 г·л$^{-1}$), и в том числе кислорода (0,7–1,0 г·л$^{-1}$), стали предметом широкого обсуждения, которое развернулось в научной литературе в контексте двух актуальных проблем: 1) риска неуправляемой дегазации перенасыщенной газами подледниковой воды в ходе планируемого вскрытия озера Восток [4] и 2) возможности существования в озере микробного сообщества, изолированного от атмосферы в течение миллионов лет (см., например, [5]). Отмечалось, в частности, что высокое парциальное давление кислорода может оказывать серьезное сдерживающее влияние на развитие жизни в подледниковом водоеме и потребует специальной адаптации обитающих здесь микроорганизмов [6].

В настоящей работе впервые предпринята попытка оценить фактическое содержание газов в озерной воде под станцией Восток по данным термометрии нижних участков буровых скважин 5Г-2 и 5Г-3, достигших поверхности озера. В основу расчетов положена зависимость температуры плавления льда при высоких давлениях от концентрации растворенных в воде газов [2]. Температура льда на контакте лед–вода (глубина 3758,6 м) оценивалась по результатам анализа восьми термограмм, две из которых были получены до глубины 3753 м, а также по данным прямых измерений температуры и давления озерной воды, поступившей в скважину после второго вскрытия озера.

МЕТОДИКА И РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ

Измерения температуры ледниковой толщи в скважине 5Г и ее боковых стволах 5Г-1, 5Г-2 и 5Г-3 осуществлялись скважинными манометрами-термометрами КМТ различных модификаций, которые были изготовлены и откалиброваны в НПП

«Грант» (г. Уфа). Приборы КМТ (геофизические снаряды) имеют цилиндрический металлический корпус длиной 1470 мм, диаметром 42 мм и массой 8 кг. Измерение температуры осуществляется с дискретностью 1 с выносным малоинерционным термометром, расположенным в нижней части снаряда. Результаты измерений преобразуются в цифровые коды, которые без искажения передаются по кабелю на поверхность. В соответствии с паспортными характеристиками разрешающая способность датчиков температуры КМТ составляет 0,002 °С, а систематическая погрешность измерений не превышает ±0,1 °С.

Помимо погрешности измерительного прибора существенный вклад в суммарную ошибку результатов термометрии скважины вносят дополнительные источники ошибок, присущие данному виду геофизических исследований. К ним относятся: несоответствие температуры скважинной жидкости температуре льда, недостаточное время выдержки прибора на горизонте измерения, ошибки определения глубины скважины по кабельному счетчику, флуктуации показаний прибора, связанные с его конструктивными особенностями, и т. д. [7].

Определение глубины скважины

При бурении ледников буровыми снарядами на грузонесущем кабеле применяются разные методы глубинной привязки результатов исследований ледяного керна и скважины. Официальной глубиной, которая используется во всех публикациях, является глубина скважины по керну l, т. е. длина скважины, определяемая как суммарная длина всех кусков извлеченного из нее керна. Глубина (длина) скважины по кабелю, l^*, устанавливается по показаниям кабельного счетчика глубины. Эта глубина используется для первичной глубинной привязки буровой информации и результатов геофизических измерений в скважине. Вследствие проскальзывания кабеля на ролике счетчика, результаты измерения длины кабеля, спускаемого в скважину, менее точны и хуже воспроизводятся, чем результаты измерения длины скважины по керну. Наконец, вертикальная глубина скважины, h, которая необходима для построения вертикальных профилей температуры ледника и расчета давления льда и скважинной жидкости, рассчитывается по l^* (или l) с учетом данных инклинометрии скважины и результатов контрольных промеров кабеля. На вертикальном участке скважины 5Г, до глубины 2400 м, действует эмпирически установленное соотношение: $h \approx 1{,}0042 \cdot l^*$. Глубже 2400 м средний угол наклона скважин 5Г-1, 5Г-2 и 5Г-3 близок к 6°, а глубины h, l и l^*, выраженные в метрах, связаны между собой соотношением: $h - 13{,}70 \approx 0{,}9935 \cdot l \approx 0{,}99852 \cdot l^*$. Как следует из последнего соотношения, вертикальная глубина контакта ледника с озером (мощность ледника в районе скважины), который по кабельному счетчику фиксируется на отметке 3750,4 м, а по керну — на отметке 3769,3 м (официальная глубина скважины 5Г-2 в момент вскрытия озера Восток), составляет 3758,6 м. Погрешность этого значения, по нашим оценкам, не превышает ±3 м. Вертикальная глубина скважины использовалась в дальнейшем в качестве основной при анализе термограмм.

Характеристика использованных термограмм

Для построения сводного осредненного профиля температуры ледника глубже 1700 м нами использовались данные восьми термограмм, снятых авторами в период подготовки и проведения первого и повторного вскрытий подледникового озера Восток и в последующие годы (2011–2017 гг.). Измерения выполнялись тремя геофизическими приборами КМТ (один прибор старой модификации, КМТ05, и два

Таблица 1

Характеристики серий измерений, выполненных в 2011–2017 гг. с помощью геофизических приборов КМТ05, КМТ02-9 и КМТ02-10

Table 1

Characteristics of the temperature logging runs that were performed in the deep boreholes at Vostok in 2011–2017 with the КМТ05, КМТ02-9 and КМТ02-10 temperature loggers

№	Дата	Скважина	Прибор	Диапазон глубин (по кабельному счетчику), м	Шаг измерений, $м^{-1}$	Время выдержки, мин	Примечание
1	6.12.2011	5Г, 5Г-1, 5Г-2	КМТ05	1000–3690	1000–3400: 1/200; 3400–3690: 1/20	10	10 месяцев после остановки буровых работ
2	23.12.2011	5Г-2	КМТ05	3610–3680	1/10	10	Повторные измерения, выполненные сразу после отбора проб скважинной жидкости
3	12–17.10.2014	5Г, 5Г-1, 5Г-3	КМТ02-10	1700–3700	1/20	60	8,5 месяцев после остановки буровых работ
4	9–13.11.2014	5Г, 5Г-1, 5Г-3	КМТ02-09	1700–3620	1/20	60	23 дня после завершения предыдущей серии измерений
5	17.01.2015	5Г-3	КМТ02-10	3500–3745	3500–3700: 1/20; 3700–3745: 1/5	10	Контрольные измерения между буровыми рейсами перед вскрытием озера
6	22.01.2015	5Г-3	КМТ02-10	3500–3745	3500–3700: 1/40; 3700–3745: 1/5	10	То же
7	31.03–18.04. 2017	5Г, 5Г-1, 5Г-3	КМТ02-10	200–3700	1/200	1440	2 месяца после остановки буровых работ
8	16.10–17.11. 2017	5Г, 5Г-1, 5Г-3	КМТ02-10	200–3700	200–3400: 1/200; 3500–3600: 1/20; 3600–3700: 1/10	1440	9 месяцев после остановки буровых работ

прибора новой модификации, КМТ02, с заводскими номерами 9 и 10), каждый из которых в разные годы прошел независимую калибровку в НПП «Грант». Основные характеристики всех серий измерений приведены в табл. 1.

Точность датчиков КМТ не отвечает лучшим стандартам прецизионных измерений температуры в скважинах [7]; они нечувствительны к малым изменениям температуры порядка 10^{-4}–10^{-3} °С, вызванным такими явлениями, как самонагрев датчиков, естественная конвекция заливочной жидкости и др. Вместе с тем собранные нами данные дают возможность в первом приближении оценить: 1) влияние продолжительности остановки прибора на горизонте измерения на полученное в итоге значение температуры, 2) влияние продолжительности выстойки скважины (времени, прошедшего с момента окончания буровых операций в скважине до начала ее геофизических исследований) на результаты термометрии, 3) воспроизводимость результатов измерений, выполненных одним и тем же прибором, и 4) воспроизводимость результатов измерений, выполненных приборами КМТ разных модификаций.

Измерения температуры во всех случаях производились на спуске геофизического снаряда дискретно. Скорость подачи снаряда существенно замедлялась за 10 м до его постановки на заданный горизонт с целью минимизировать эффект принудительной конвекции скважинной жидкости. Продолжительность стоянки прибора на горизонтах в разных сериях измерений составляла 10 мин, 60 мин и 24 ч (см. табл. 1). Анализ данных, полученных в сериях 7 и 8, в которых снаряд выстаивался на каждом горизонте в течение 24 ч, показал, что время, необходимое для стабилизации температуры скважинной жидкости в пределах ±0,01 °С после полной остановки снаряда, варьирует от 5 до 10 ч. На рис. 1 приведен пример записи показаний прибора КМТ02-10 во время его стоянки на горизонте 3700 м в 7-й и 8-й сериях измерений. На основании аналогичных записей, сделанных на всех горизонтах измерений в этих сериях, было установлено, что замеры температуры, выполненные спустя 10 и 60 мин после остановки снаряда, систематически занижают температуру в скважине на 0,10 ± 0,04 °С и 0,04 ± 0,02 °С соответственно по сравнению со средним значением температуры, измеренной в промежуток времени с 10 до 24 ч, считая от момента постановки снаряда на точку измерений. Указанные значения систематических ошибок были использованы для коррекции термограмм, полученных с 10- и 60-минутной выстойкой геофизического снаряда на точке. Чтобы обеспечить возможность сравнения термограмм, измеренных с разным шагом по глубине, полученные в каждой серии данные интерполировались с помощью полиномов высоких степеней, описывающих экспериментальные значения температуры с точностью не хуже ±0,02 °С.

На рис. 2 показано отклонение полученных нами восьми термограмм от синтетического профиля, который был построен в работе [8] на основе результатов более ранних измерений и использовался для реконструкции прошлых изменений температуры на поверхности ледника [8, 9]. Для построения этого синтетического профиля использовались: 1) результаты дискретных измерений температуры в скважине 3Г до глубины 1920 м, выполненных Ю. Рыдваном в зимовочный период 33-й САЭ, 1988 г. [10]; 2) термограмма скважин 5Г и 5Г-1, полученная французским специалистом К. Радо в 1997 г. в режиме непрерывных измерений (без остановки снаряда) до глубины 3420 м; 3) результаты непрерывных измерений температуры, выполненных геофизиком Санкт-Петербургского горного института Р.Н. Вострецовым в январе 2000 г. в скважинах 5Г и 5Г-1 до глубины 3620 м [11].

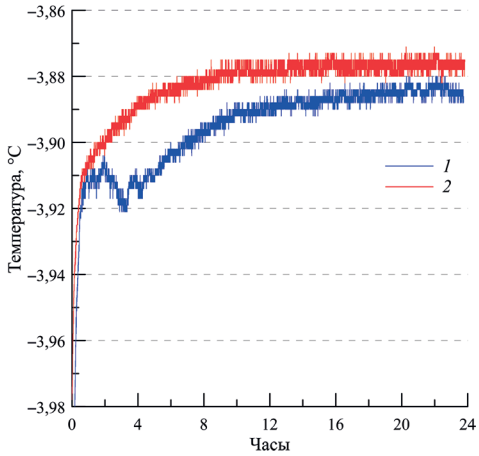

Рис. 1. Изменения температуры, зарегистрированные геофизическим снарядом КМТ02-10 во время его 24-часовых остановок на горизонте 3700 м в сериях измерений 7 и 8:

1 — апрель 2017 г., серия 7 (2 месяца после завершения буровых работ в скважине 5Г-3); *2* — ноябрь 2017 г., серия 8 (9 месяцев после завершения буровых работ). Флуктуации температуры в начале записи, которые видны на кривой *1*, вызваны нарушением принятого регламента работ: слишком большая скорость подачи снаряда и его резкая остановка на горизонте измерений

Fig. 1. Evolution of the drilling fluid temperature as recorded by borehole logger KMT02-10 while it was stopped for 24 h at a depth of 3700 m, during the 7th and 8th logging runs:

1 — April 2017, run 7 (two months after completion of drilling operations in borehole 5G-3); *2* — November 2017, run 8 (eight months after completion of drilling). Fluctuations in temperature at the beginning of the record shown by curve *1* are attributed to an accidental deviation from a standard operating procedure: lowering the logging tool too quickly into the borehole followed by stopping it abruptly at the depth of measurements

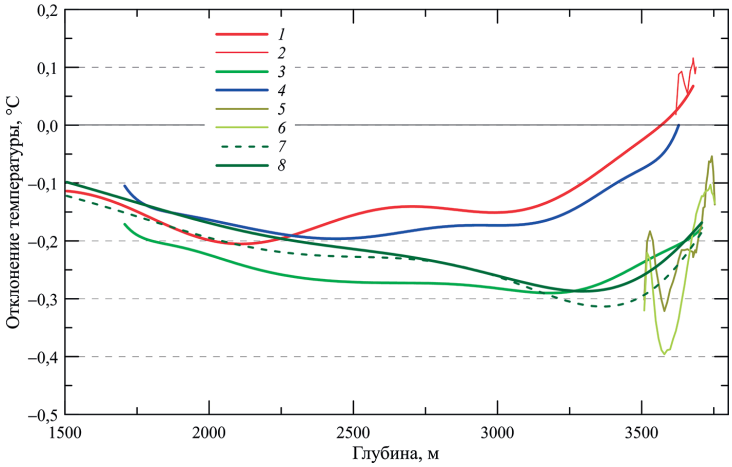

Рис. 2. Отклонение экспериментальных профилей температуры, полученных в данной работе, от синтетического профиля температуры ледника в районе станции Восток [8]:

1–8 — номера серий измерений как в табл. 1

Fig. 2. Deviation of experimental temperature profiles obtained in this work from a synthetic temperature profile of the ice sheet in the vicinity of Vostok Station [8]:

1–8 — the numbers of logging runs as in table 1

При построении синтетического профиля [8] особое внимание уделялось его соответствию модельному распределению температуры во всей толще ледника (включая его придонную часть, не охваченную измерениями), а также сохранению воспроизводимых аномалий температуры, которые использовались в цитируемых выше работах для палеоклиматических реконструкций. Возможно, отчасти поэтому синтетический профиль показывает глубже 1000 м завышенные на 0,05–0,60 °С значения температуры по сравнению с экспериментальными профилями, использованными для его построения, и, следовательно, может неверно отражать абсолютную температуру льда, которая является предметом исследования в нашей работе. Как видно из рис. 2, новые экспериментальные данные о распределении температуры глубже 1500 м также свидетельствуют о возможном завышении абсолютных значений температуры синтетическим профилем, хотя в большинстве случаев наблюдаемое расхождение не превышает 0,3 °С и имеет тенденцию к значительному уменьшению в нижней части скважины.

Анализ графиков отклонения экспериментальных профилей 1–8 от синтетического профиля температуры позволяет сделать ряд важных выводов.

1. Полученные нами данные можно разбить на две группы: в первую входят серии измерений 1, 3, 4, 7, 8, которые выполнялись спустя 2–10 месяцев после остановки буровых операций в скважине, во вторую — серии 2, 5, 6, которые выполнялись во время кратковременных перерывов между буровыми рейсами. Профили второй группы показывают значительные возмущения температуры, вызванные перемешиванием заливочной жидкости в скважине в ходе спуска-подъема буровых снарядов и пробоотборников. Вместе с тем значения температуры по этим профилям в призабойной зоне скважины, где перемешивание жидкости происходит не так интенсивно, с точностью до 0,05 °С совпадают с температурой, измеренной тем же геофизическим снарядом после продолжительной выстойки скважины в сериях измерений первой группы.

2. Сравнение профилей 7 и 8, полученных прибором КМТ02-10, показывает, что измерения, выполненные спустя 2 месяца после остановки буровых работ (серия 7), в среднем на 0,02 °С занижают температуру в скважине по сравнению с измерениями, сделанными в серии 8 спустя 9 месяцев после остановки работ (см. рис. 1, 2). Вместе с тем примерно такое же систематическое расхождение (в среднем на 0,03 °С) наблюдается между профилем 8 и профилем 3, который был измерен тем же прибором тремя годами ранее, после 8,5-месячной выстойки скважины (рис. 2). Следовательно, воспроизводимость результатов измерений прибором КМТ02-10, по-видимому, недостаточна для исследования влияния увеличения времени выстойки скважины с 2 до 8,5–9 месяцев на полученные термограммы. Стандартное отклонение значений температуры, зафиксированных этим прибором на одних и тех же горизонтах в разных сериях измерений, составляет ±0,02 °С.

3. Расхождение между температурными профилями первой группы 1, 3, 4, 7 и 8, измеренными тремя независимо откалиброванными приборами КМТ, в большинстве случаев соответствует допустимой систематической погрешности их датчиков температуры (±0,1 °С). Лишь глубже 3300 м расхождение между профилями 1 и 4, измеренными приборами КМТ05 и КМТ02-09, и профилями 3, 7, 8 (КМТ02-10) превышает 0,20 °С, достигая 0,27 °С в самой нижней части скважины. К возможным причинам значительного расхождения температурных профилей, измеренных в разные годы

тремя разными приборами КМТ, относятся временной дрейф калибровочных характеристик датчиков температуры и погрешность определения глубины приборов в скважине.

Построение сводного профиля температуры

Наиболее вероятным профилем температуры ледника в интервале глубин 1707,2–3628,4 м следует считать сводный профиль, построенный путем осреднения данных, полученных в сериях измерений 1, 3, 4, 7 и 8 (см. табл. 2 и рис. 3). Важным следствием осреднения результатов измерений, выполненных разными приборами КМТ, является рандомизация присущих им индивидуальных систематических погрешностей, в том числе тех, которые связаны с дрейфом калибровочных характеристик датчиков. Расчетная стандартная ошибка s_T сводного профиля температуры, приведенная в табл. 2, увеличивается от ±0,01 °С в верхней части профиля до ±0,12 °С на глубине 3628 м, что можно объяснить ростом с глубиной погрешности глубинной привязки измерений: на больших глубинах весьма вероятная здесь ошибка определения глубины положения прибора в ±1 м соответствует ошибке ±0,02 °С в определении температуры заливочной жидкости.

Таблица 2

Сводный профиль температуры ледниковой толщи в интервале глубин 1707–3753 м по данным термометрии скважин 5Г, 5Г-1, 5Г-2 и 5Г-3 на станции Восток

Table 2

Stacked temperature profile of the ice sheet between 1707 and 1753 m depths based on temperature measurements in boreholes 5G, 5G-1, 5G-2 and 5G-3 at Vostok Station

l^* (м)	h (м)	T (ºС)	s_T (ºС)	l^* (м)	h (м)	T (ºС)	s_T (ºС)
1700	1707,2	–40,57	0,02	2800	2809,6	–21,91	0,05
1720	1727,3	–40,32	0,01	2820	2829,5	–21,52	0,05
1740	1747,4	–40,04	0,01	2840	2849,5	–21,14	0,05
1760	1767,5	–39,75	0,01	2860	2869,5	–20,76	0,05
1780	1787,6	–39,44	0,01	2880	2889,4	–20,36	0,05
1800	1807,7	–39,16	0,01	2900	2909,4	–19,97	0,05
1820	1827,7	–38,86	0,01	2920	2929,4	–19,60	0,06
1840	1847,8	–38,57	0,01	2940	2949,4	–19,19	0,06
1860	1867,9	–38,27	0,01	2960	2969,3	–18,81	0,06
1880	1888,0	–37,96	0,01	2980	2989,3	–18,40	0,06
1900	1908,1	–37,65	0,01	3000	3009,3	–18,00	0,06
1920	1928,2	–37,35	0,01	3020	3029,2	–17,61	0,06
1940	1948,3	–37,03	0,01	3040	3049,2	–17,25	0,06
1960	1968,3	–36,73	0,02	3060	3069,2	–16,83	0,06
1980	1988,4	–36,42	0,02	3080	3089,1	–16,44	0,06
2000	2008,5	–36,10	0,02	3100	3109,1	–16,03	0,07
2020	2028,6	–35,78	0,02	3120	3129,1	–15,63	0,07
2040	2048,7	–35,47	0,02	3140	3149,1	–15,23	0,07
2060	2068,8	–35,15	0,02	3160	3169,0	–14,83	0,07
2080	2088,9	–34,82	0,02	3180	3189,0	–14,43	0,07
2100	2108,9	–34,50	0,02	3200	3209,0	–14,02	0,08
2120	2129,0	–34,17	0,02	3220	3228,9	–13,63	0,08
2140	2149,1	–33,84	0,02	3240	3248,9	–13,22	0,08
2160	2169,2	–33,51	0,02	3260	3268,9	–12,80	0,08
2180	2189,3	–33,16	0,02	3280	3288,9	–12,39	0,09
2200	2209,4	–32,84	0,02	3300	3308,8	–11,97	0,09

Окончание табл. 2
The end of the table 2

l^* (м)	h (м)	T (ºC)	s_T (ºC)	l^* (м)	h (м)	T (ºC)	s_T (ºC)
2220	2229,4	–32,50	0,02	3320	3328,8	–11,58	0,09
2240	2249,5	–32,15	0,02	3340	3348,8	–11,17	0,09
2260	2269,6	–31,79	0,02	3360	3368,7	–10,77	0,09
2280	2289,7	–31,45	0,02	3380	3388,7	–10,35	0,10
2300	2309,8	–31,11	0,02	3400	3408,7	–9,95	0,10
2320	2329,9	–30,77	0,03	3420	3428,6	–9,54	0,10
2340	2350,0	–30,42	0,03	3440	3448,6	–9,11	0,10
2360	2370,0	–30,07	0,03	3460	3468,6	–8,70	0,10
2380	2390,1	–29,72	0,03	3480	3488,6	–8,30	0,10
2400	2410,2	–29,34	0,03	3500	3508,5	–7,88	0,10
2420	2430,1	–28,99	0,03	3520	3528,5	–7,47	0,10
2440	2450,1	–28,63	0,04	3540	3548,5	–7,05	0,11
2460	2470,1	–28,28	0,04	3560	3568,4	–6,63	0,11
2480	2490,0	–27,92	0,04	3580	3588,4	–6,23	0,11
2500	2510,0	–27,56	0,04	3600	3608,4	–5,82	0,11
2520	2530,0	–27,19	0,04	3620	3628,4	–5,40	0,12
2540	2549,9	–26,82	0,05	3640	3648,3	–4,98	–
2560	2569,9	–26,44	0,05	3660	3668,3	–4,56	–
2580	2589,9	–26,10	0,05	3680	3688,3	–4,17	–
2600	2609,9	–25,70	0,05	3700	3708,2	–3,75	–
2620	2629,8	–25,35	0,05	3705	3713,2	*–3,58*	–
2640	2649,8	–24,96	0,05	3710	3718,2	*–3,47*	–
2660	2669,8	–24,57	0,05	3715	3723,2	*–3,35*	–
2680	2689,7	–24,22	0,05	3720	3728,2	*–3,24*	–
2700	2709,7	–23,83	0,05	3725	3733,2	*–3,13*	–
2720	2729,7	–23,46	0,05	3730	3738,2	*–3,03*	–
2740	2749,7	–23,07	0,05	3735	3743,2	*–2,93*	–
2760	2769,6	–22,68	0,05	3740	3748,2	*–2,84*	–
2780	2789,6	–22,30	0,05	3745	3753,2	*–2,77*	–

Примечание. l^* — глубина скважины по кабельному счетчику; h — вертикальная глубина; T — среднее значение температуры по результатам измерений приборами КМТ трех различных модификаций; s_T — стандартная ошибка средней температуры. Значения, показанные курсивом, получены без надлежащей выстойки скважины.

Note. l^* — depth of the borehole as measured by depth meter; h — vertical depth; T — mean temperature based on measurements performed by the KMT loggers of three different modifications; s_T — estimated standard error of the mean temperature. The values shown in italics were obtained in between the routine drilling runs and thus considered to be less reliable.

Расчет средних значений температуры и их стандартной погрешности производился для глубин, на которых делались остановки снаряда в 3-й серии измерений. Это позволило «откалибровать» результаты измерений, выполненных прибором КМТ02-10, по более точному, с нашей точки зрения, осредненному профилю температуры. Было получено линейное уравнение, которое позволяет воспроизводить с точностью не хуже ±0,01 °С значения осредненного профиля (T) по температурам $T_{meas.}$, измеренным прибором КМТ02-10:

$$T = 1{,}0042T_{meas.} + 0{,}16. \quad (1)$$

Повторная калибровка датчика температуры геофизического снаряда КМТ02-10 в диапазоне температур от –21 до 3 °С была проведена летом 2021 г. в Лаборатории изменений климата и окружающей среды (ЛИКОС) ААНИИ. В результате

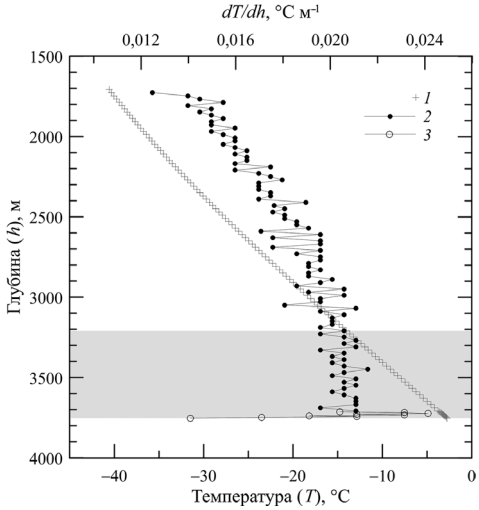

Рис. 3. Сводный профиль температуры ледниковой толщи в районе станции Восток по данным измерений в глубоких скважинах 5Г, 5Г-1, 5Г-2 и 5Г-3:

1 — сводный профиль температуры; *2* — градиент температуры (*dT/dh*) в интервале глубин 1707,2–3708,2 м по данным серий измерений 1, 3, 4, 7 и 8; *3* — градиент температуры в интервале глубин 3713,2–3753,2 м по данным серий измерений 5 и 6. Затушеванная зона — интервал глубин 3209,0–3753,2 м, характеризующийся постоянным градиентом температуры. Данные, полученные в этом интервале, использовались для оценки температуры плавления льда на контакте ледник–озеро

Fig. 3. Stacked temperature profile of the ice sheet in the vicinity of Vostok Station based on temperature measurements in boreholes 5G, 5G-1, 5G-2 and 5G-3:

1 — stacked temperature profile; *2* — vertical temperature gradient (*dT/dh*) in the 1707.2–3708.2 m depth interval based on the data from logging runs 1, 3, 4, 7 and 8; *3* — temperature gradient in the 3713.2–3753.2 m depth interval (runs 5 and 6). Shaded band — ice stratum with a uniform mean temperature gradient between 3209.0 and 3753.2 m; the data from this depth interval were used to define the melting temperature of ice at the ice-water interface

измерений, подробное описание которых выходит за рамки настоящей статьи, было получено калибровочное уравнение, обеспечивающее остаточное отклонение откорректированных температур от показаний эталонного термометра 3-го разряда в пределах ±0,02 °C:

$$T = 1{,}0038T_{meas.} + 0{,}12. \qquad (2)$$

В интересующем нас диапазоне температур ледника (–40…–2 °C) откорректированные с помощью этих двух уравнений температуры совпадают в пределах погрешностей калибровок, при этом уравнение (2) систематически занижает значения *T* на 0,031 ± 0,004 °C по сравнению с уравнением (1). Поскольку за 3,5 года, прошедших с момента завершения исследований в скважине до повторной калибровки прибора в ЛИКОС, калибровочные коэффициенты датчика температуры могли заметно измениться, в дальнейшем для коррекции результатов измерений, выполненных геофизическим снарядом КМТ02-10, было решено использовать уравнение (1).

Для интервала глубин 3713,2–3753,2 м имеются только результаты двух контрольных серий измерений 5 и 6, которые выполнялись во время кратковременных остановок буровых работ в период подготовки второго вскрытия озера Восток. Обе серии измерений выполнялись снарядом КМТ02-10. После коррекции результатов с помощью уравнения (1) средние по двум указанным сериям значения температу-

ры были взяты для продления сводного экспериментального профиля до глубины 3753,2 м. При использовании данных из этого интервала глубин необходимо помнить, что они были получены без необходимой выстойки скважины и поэтому характеризуются значительным разбросом.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Определение наиболее вероятного значения температуры плавления льда на контакте ледника с подледниковым озером

Экстраполяция профилей температуры на ледяную толщу, залегающую глубже интервала, охваченного измерениями, часто производится путем согласования результатов моделирования с данными термометрии [8–11, 13]. При этом температура возможного фазового перехода лед–вода на нижней поверхности ледника задается как функция только давления (мощности ледника). В нашем случае температура плавления льда является искомой величиной, несущей в себе информацию о концентрации растворенных в подледниковой воде газов, которую мы попытаемся оценить на основании имеющихся в нашем распоряжении экспериментальных данных.

Профиль температуры ледниковой толщи в районе станции Восток (рис. 3) характеризуется постепенным увеличением температурного градиента с глубиной от 0,014 °C·м$^{-1}$ на 1700 м до примерно 0,020 °C·м$^{-1}$ в придонной части ледника. Такое изменение градиента отражает уменьшение с глубиной вертикальной скорости движения льда, изменение его теплофизических свойств и — в более широком смысле — историю термогидродинамических процессов в ледниковой толще. Анализ профиля градиента температуры (рис. 2, кривые 2, 3) показывает, что глубже примерно 3200 м его среднее значение становится статистически постоянным. Последнее согласуется с результатами моделирования, которые свидетельствуют о линейности температурного профиля в придонной части ледника в районе станции Восток [9]. По нашим данным, градиент температуры, dT/dh, в интервале глубин 3209,0–3708,2 м (надежные данные) равен 0,0206 ± 0,0005 (1σ) °C·м$^{-1}$, а в интервале 3713,2–3753,2 м (данные получены в перерывах между буровыми рейсами) dT/dh = 0,0204 ± 0,0032 °C·м$^{-1}$.

Предполагая постоянство температурного градиента глубже 3209,9 м и вплоть до нижней границы ледника на глубине 3758,6 м, температуру плавления льда T_f на контакте лед–вода можно получить с помощью линейной экстраполяции сводного профиля температуры. По выборке надежных данных, полученных интервале 3209,0–3708,2 м, зависимость температуры от глубины залегания льда описывается линейным уравнением

$$T(°C) = 0{,}020605h\ (м) - 80{,}166. \qquad (3)$$

Разброс экспериментальных данных вокруг линии регрессии характеризуется стандартным отклонением ±0,012 °C. На глубине 3758,6 м уравнение (3) предсказывает температуру T_f = –2,72 °C; стандартная ошибка экстраполяции, определенная по расчетным стандартным ошибкам значений параметров этого уравнения, равна ±0,10 °C.

Надежность полученных оценок была подтверждена серией проверочных расчетов, в которых для аппроксимации зависимости $T(h)$ использовались полиномы различных степеней, а в качестве выборочных данных — пары значений T–h из других интервалов скважины, лежащих глубже 3200 м: 3209,0–3753,2 м, 3388,7–

3708,2 м, 3713,2–3753,2 м и др. Было установлено, что во всех случаях экстраполированные значения T_f укладываются в диапазон –2,72 ± 0,10 °С, который и был принят в качестве наиболее вероятного для температуры льда на контакте с озерной водой.

Независимую оценку искомой величины T_f удалось получить в ходе повторного вскрытия озера Восток в январе 2015 г. Спустя несколько дней после запуска озерной воды в скважину 5Г-3, когда на контакте воды и заливочной жидкости уже должна была образоваться гидратная пробка [12], в скважину был спущен геофизический снаряд КМТ02-10. Во время этой операции на глубине 3669 м по кабельному счетчику сработал датчик забоя. Как следует из обработанных нами записей температуры и давления скважинной жидкости, измеренных датчиками снаряда (рис. 4), в этот момент было зафиксировано скачкообразное повышение температуры с –4,4 °С (температура заливочной жидкости на этой глубине) до значения –2,67 °С. Начавшийся после этого аварийный подъем снаряда — сначала до отметки 3650 м, а затем после короткой остановки до отметки 3600 м — первоначально вызвал незначительное падение температуры, которое вскоре сменилось ее возвратом на уровень –2,65 ± 0,02 °С. Такой ход изменения температуры свидетельствует о том, что вода стала подниматься по стволу скважины вслед за поднимающимся снарядом. Чтобы избежать

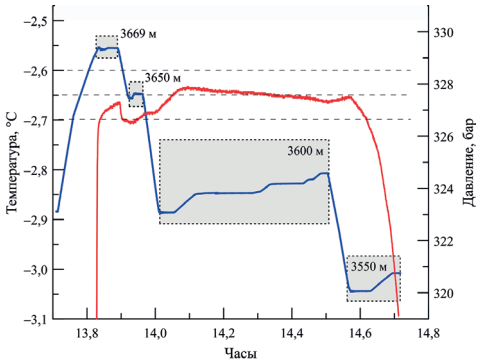

Рис. 4. Записи давления (синяя кривая) и температуры (красная кривая), сделанные геофизическим снаряд КМТ02-10 в рейсе 6 февраля 2015 г., во время которого снаряд вступил в контакт с озерной водой, поступившей в скважину 5Г-3 после второго вскрытия подледникового озера Восток.

Прямоугольники ограничивают отрезки времени, в течение которых производилась остановка снаряда на указанных на графике глубинах: 3669 м — сработал датчик забоя, термометр снаряда вступил в контакт с водой; 3650 м — кратковременная остановка снаряда для наблюдения за показаниями термометра; 3600 м — продолжительная остановка снаряда для заливки в скважину керосина (отражается в повышении давления скважинной жидкости); 3550 м — вторая остановка для заливки керосина. Глубины даны по кабельному счетчику. Измеренные температуры откорректированы с помощью уравнения (1)

Fig. 4. Fluid pressure (blue curve) and temperature (red curve) recorded by borehole logger KMT02-10 on 6 February 2015, during a run when the logger became submerged in subglacial water that entered borehole 5G-3 after the second unsealing of Lake Vostok.

The rectangles delineate time intervals within which the logger was stopped at depths indicated in the figure: 3669 m — the lowering of the logger is stopped after the weight-on-bit sensor signaled an increase in the buoyancy force; the temperature probe comes into contact with subglacial water; 3650 m — short pause in the hoisting of the logger to monitor temperature; 3600 m — the hoisting of the logger is stopped to allow the borehole to be topped up with kerosene in order to prevent a further rise of subglacial water (the addition of kerosene through the hole mouth is reflected in the step-like increase of the fluid pressure); 3550 m — second stop for the topping up of the borehole. Depths are from the drill depth meter. Measured temperatures are corrected using equation 1

дальнейшего подъема воды и понизить ее уровень в скважине, во время остановки снаряда на отметке 3600 м была произведена заливка керосина через устье скважины, которая нашла отражение в поэтапном росте регистрируемого давления заливочной жидкости при неизменном положении геофизического снаряда в скважине (рис. 4). В ходе дальнейшего подъема с отметки 3600 м до отметки 3550 м снаряд пересек границу воды и заливочной жидкости в скважине, что привело к быстрому падению регистрируемой им температуры.

По нашему мнению, наиболее надежной оценкой равновесной температуры жидкой воды в скважине является значение –2,67 °С, измеренное спустя 5 мин после первого контакта датчика снаряда с водой на отметке 3669 м, соответствующей вертикальной глубине 3677 м. Измеренное на этой глубине давление заливочной жидкости в пределах погрешности датчика снаряда КМТ02-10 совпало с расчетным давлением льда. Разница давлений на глубине 3677 м и на контакте ледника с озером (3758,6 м) составила 0,74 МПа, что, принимая во внимание зависимость температуры фазового равновесия воды и льда от давления (см. ниже), соответствует разнице температур в 0,055 °С, и, следовательно, температура озерной воды у нижней поверхности ледника равна –2,73 °С. Оценить погрешность этого значения, которое практически совпало с результатом анализа скважинных термограмм, не представляется возможным, так как неизвестно, насколько близко измеренная температура соответствует равновесным условиям.

Оценка газосодержания верхнего слоя воды подледникового озера Восток

Вертикальный профиль давления льда в районе станции Восток глубже 120 м с точностью до 0,01 МПа описывается линейной зависимостью, которая была получена по данным измерения плотности ледяного керна, приведенным к условиям залегания [14]:

$$P_{ice}\,(\text{МПа}) = 9{,}049\cdot 10^{-3}\,[h(\text{м}) - 32]. \qquad (4)$$

В соответствии с этим уравнением давление льда на контакте ледника с озером (глубина 3758,6 ± 3 м) с учетом атмосферного давления равно 33,78 ± 0,05 МПа. Температура плавления льда T_f на контакте с водой, не содержащей растворенных газов, определяется уравнением [15]:

$$T_f(S, P) = T_f(\text{S}, 0) - 7{,}42\cdot 10^{-2}\,P(\text{МПа}), \qquad (5)$$

в котором P — давление, а S — соленость воды. Общая минерализация воды озера Восток не превышает 0,4–1,2 ‰ [16], что соответствует понижению $T_f\,(S, 0)$ в среднем не более чем на 0,05 ºС. В дальнейшем будем рассматривать озерную воду как пресную, полагая, что $T_f\,(S, 0) = 273{,}16$ К (температура тройной точки воды) и основной причиной понижения температуры плавления льда относительно значения T_f, рассчитанного по уравнению (5), является высокая концентрация в воде растворенных газов.

В работе [2] было показано, что при заданной температуре плавления T_f разница между давлением $P_f(0)$, при котором происходит кристаллизация пресной дегазированной воды, и давлением $P_f(x_{air})$, при котором замерзает вода, содержащая растворенный воздух, определяется уравнением

$$\Delta P_f = P_f(0) - P_f(x_{air}) = -\frac{RT_f \ln(1 - x_{air})}{\Delta V_w} \approx \frac{RT_f x_{air}}{\Delta V_w}, \qquad (6)$$

где x_{air} — мольная концентрация растворенного в воде воздуха (сумма концентраций азота и кислорода $x_{air} = x_{N_2} + x_{O_2}$); R = 8,314 Дж·моль$^{-1}$·К$^{-1}$ — газовая постоянная; ΔV_w — разница между молярными объемами молекул воды во льду и в жидкой фазе (для наших P, T условий $\Delta V_w \approx 1{,}64$ см^3·моль$^{-1}$). Давление P_f ($x_{air} = 0$) для данного значения T_f определяется из уравнения (5). В случае предельного насыщения озерной воды атмосферными газами, соответствующего равновесию растворенных газов с гидратной фазой $x_{air} = X_{air}$, где X_{air} — растворимость воздуха в воде в области стабильности смешанных гидратов воздуха. В этих условиях зависимость $T_f(P)$ совпадает с линией трехфазного равновесия LHI (насыщенная газами вода — гидрат воздуха — лед), положение которой может быть рассчитано теоретически на основании уравнений (5) и (6) и значения X_{air} = 2,74 см^3·г$^{-1}$ (здесь и далее объем газа соответствует н. у.), установленного для условий озера Восток в районе бурения скважины [2]. Поскольку расчетное положение линии трехфазного равновесия несколько отличается от имеющихся экспериментальных данных для систем с чистым кислородом и чистым азотом, в работе [2] было предложено использовать среднее — между теоретическим и экспериментальным — положение линии равновесия LHI, которое описывается линейным уравнением

$$T_f(\text{K}) = 272{,}85 - 7{,}55 \cdot 10^{-2} P(\text{МПа}). \qquad (7)$$

В переходном состоянии, когда $x_{air} < X_{air}$ и озеро еще не достигло предельного насыщения атмосферными газами [17], концентрация растворенных в воде газов, x_{air}, может быть оценена по экспериментальным данным о давлении и температуре плавления льда на контакте ледник–озеро, полученным в результате бурения скважины, по формуле

$$x_{air} = \frac{\Delta P_{meas.}}{\Delta P_f(X_{air})} X_{air}, \qquad (8)$$

в которой $\Delta P_{meas.}$ — разница между значением $P_f(0)$ для данной температуры плавления льда и фактическим давлением на границе ледник–озеро; $\Delta P_f = P_f(0) - P_f(X_{air})$, где $P_f(X_{air})$ определяется для данного значения T_f из уравнения (7).

На рис. 5 показано нормальное распределение плотности вероятностей значений T_f на контакте лед–вода, построенное с учетом случайной погрешности экстраполяции сводного экспериментального профиля температуры до глубины 3758,6 м. Наиболее вероятное значение температуры плавления льда на контакте ледника с озером равно –2,72 °С, среднее квадратичное отклонение σ = ±0,10 °С. Теоретически возможный диапазон значений концентрации газа в воде и соответствующих им значений температуры плавления льда ограничен газосодержанием тающего ледникового льда (x_{air} = 0,09 см^3·г$^{-1}$; T_f = –2,52 °С) и растворимостью воздуха в воде в равновесии с гидратной фазой ($x_{air} = X_{air}$ = 2,74 см^3·г$^{-1}$, T_f = –2,85 °С).

В соответствии с уравнениями (7) и (8) наиболее вероятному значению T_f отвечает наиболее вероятное значение концентрации газа в воде x_{air} = 1,73 см^3·г$^{-1}$, (2,23 г·л$^{-1}$). Полученная нами оценка газосодержания приповерхностного слоя воды подледникового водоема в 19 раз превышает концентрацию воздуха в тающем ледниковом льду, но в 1,6 раза меньше предельной растворимости воздуха в воде в равновесии с гидратной фазой. Заметим, что для слабо минерализованной озерной воды расчетное вероятное значение x_{air} будет несколько меньше, а видимое недосыщение воды растворенными газами больше предсказанных выше.

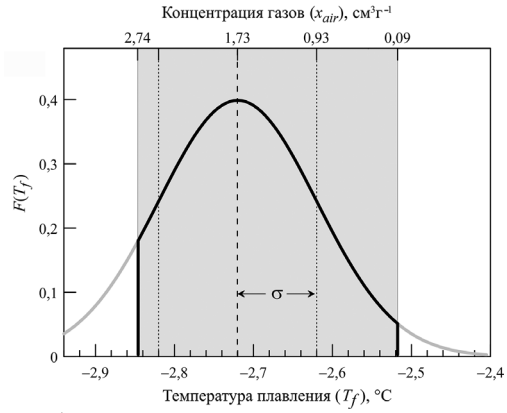

Рис. 5. К определению наиболее вероятных значений температуры плавления льда (T_f) и концентрации газов в подледниковой воде (x_{air}) на контакте ледник–озеро.

Серая кривая — плотность нормального распределения вероятностей значений T_f, полученных на основе анализа скважинных термограмм; черная кривая — усеченное распределение вероятностей T_f, ограниченное диапазоном теоретически возможных значений концентрации газов в воде (x_{air} = 0,09…2,74 см³·г⁻¹) и соответствующих им значений температуры плавления (T_f = –2,52…–2,85 °C). Вертикальный пунктир — наиболее вероятные значения: T_f = –2,72 °C и x_{air} = 1,73 см³·г⁻¹. Расчет x_{air} для заданных значений T_f производился по уравнению (8)

Fig. 5. Determining the most probable values for the melting temperature of ice (T_f) and concentration of gases in subglacial water (x_{air}) at the ice sheet-lake interface.

Grey curve — Gaussian distribution of the T_f values which were estimated using borehole temperature data; black curve — truncated distribution of T_f delimited by the theoretically possible range of concentrations of gases in the subglacial water x_{air} = 0.09…2.74 cm³·g⁻¹, corresponding to the temperature range T_f = –2.52…–2.85 °C. The vertical dotted line marks the most probable values: T_f = –2.72 °C and x_{air} = 1.73 cm³·g⁻¹. Equation 8 was used to calculate x_{air} which corresponds to a given value of T_f

Поскольку до момента начала гидратообразования в озере должно сохраняться атмосферное соотношение концентраций азота и кислорода x_{N_2}/x_{O_2} ≈3,7 [3, 17], приведенному выше наиболее вероятному значению газосодержания озерной воды соответствует концентрация растворенного кислорода x_{O_2} = 0,37 см³·г⁻¹ (0,53 г·л⁻¹). Таким образом, даже в самом верхнем слое озера вблизи его ледяного потолка содержание кислорода на 1–2 порядка превышает содержание этого газа в обычных водоемах нашей планеты.

Новые данные о концентрации атмосферных газов в озерной воде, полученные в результате анализа скважинных термограмм, качественно согласуются с данными об общем содержании газов в керне конжеляционного (озерного) льда, поднятого из скважины с глубины более 3700 м. Исследование этого льда, формирование которого происходило в условиях газового и изотопного равновесия с озерной водой, показало, что содержание в нем газов существенно ниже растворимости азота и кислорода во льду в условиях трехфазного равновесия LHI, и, следовательно, содержание газов в верхнем слое озера, из которого образовался этот лед, по-видимому, не достигло предельного уровня, соответствующего равновесию с гидратной фазой [18].

Недосыщение приповерхностной воды озера атмосферными газами, подтвержденное в ходе настоящего исследования, необходимо учитывать при формировании согласованного с экспериментальными данными представления о влиянии циркуляции и перемешивания воды на распределение растворенных газов (и гидратов

воздуха?) в подледниковом озере Восток. По нашему мнению, одним из наиболее правдоподобных объяснений указанного недосыщения является слабое перемешивание талой ледниковой воды, питающей подледниковый водоем и поступающей в район станции Восток, с резидентной водой озера [18, 19].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе восьми термограмм, снятых авторами в нижней части глубокой скважины 5Г и ее боковых стволах 5Г-1, 5Г-2 и 5Г-3, построен сводный температурный профиль ледника в интервале глубин 1707–3753 м. Экстраполяция этого профиля до подошвы ледниковой толщи (глубина 3758,6±3 м, давление 33,78±0,05 МПа) позволила получить наиболее точную на сегодняшний день оценку температуры плавления льда на контакте ледника с озером: –2,72 ± 0,10 °С. Это значение подтверждается результатами прямых измерений температуры и давления озерной воды, поступившей в скважину после второго вскрытия озера Восток.

Используя зависимость температуры плавления льда при высоких давлениях от концентрации растворенных в воде газов, мы оценили общее газосодержание верхнего слоя озерной воды под станцией Восток. Было установлено, что наиболее вероятное значение концентрации воздуха в подледниковой воде равно 2,23 г·л$^{-1}$, что в 19 раз превышает его концентрацию в тающем ледниковом льду — основном источнике газов в озере, но в 1,6 раза меньше предельной растворимости воздуха в воде в равновесии с гидратной фазой. Полученной оценке газосодержания воды соответствует концентрация растворенного кислорода, равная 0,53 г·л$^{-1}$. Последнее значение существенно превышает содержание O_2 в любых других известных водоемах на нашей планете.

Новые данные о концентрации растворенных газов в подледниковой воде качественно согласуются с результатами измерений газосодержания керна озерного льда, которые свидетельствуют о том, что концентрация газов в верхнем слое озера, из которого образовался этот лед, существенно меньше предельного уровня, соответствующего равновесию растворенных газов с гидратной фазой. По нашему мнению, наиболее вероятной причиной этого является слабое перемешивание талой ледниковой воды, питающей подледниковый водоем и поступающей в район станции Восток, с резидентной водой озера. Таким образом, результаты нашего исследования подтверждают ранее сделанный вывод о том, что верхний слой озерной воды в районе скважины и, следовательно, та вода, которая поступила в скважину в результате вскрытия озера, не являются достаточно репрезентативными для изучения основных характеристик подледникового водоема [18, 19].

В дальнейшем для уточнения газосодержания воды озера Восток мы планируем использовать зависимость концентрации растворенных в озерном льду газов от концентрации этих газов в озерной воде, из которой образовывался лед [18]. Для измерения сверхнизких концентраций газа в озерном льду вблизи контакта ледника с озером будет использована специально модернизированная для этой цели газоаналитическая установка STAN [20], способная измерять общее газосодержание льда в диапазоне 10^{-5}–10^{-4} см^3·г$^{-1}$.

Конфликт интересов. Конфликт интересов отсутствует.

Финансирование. Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-05-00792.

Благодарности. Российская антарктическая экспедиция обеспечивала логистическую поддержку работ на станции Восток. Авторы благодарят А.Н. Саламатина за полезные обсуждения и советы при подготовке статьи.

Competing interests. The authors have no competing interests.

Funding. The reported study was funded by RFBR, project number 20-05-00792.

Acknowledgements. The Russian Antarctic Expedition provided logistic support to work at Vostok Station. The authors thank Andrey Salamatin for useful discussions and advice during the preparation of the manuscript.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Липенков В.Я., Лукин В.В., Булат С.А., Васильев Н.И., Екайкин А.А., Лейченков Г.Л., Масолов В.Н., Попов С.В., Саватюгин Л.М., Саламатин А.Н., Шибаев Ю.А.* Итоги исследования подледникового озера Восток в период МПГ // Вклад России в Международный полярный год 2007/08. Полярная криосфера и воды суши. М.: Paulsen, 2011. С. 17–47.

2. *Lipenkov V.Ya., Istomin V.A.* On the stability of air clathrate-hydrate crystals in subglacial lake Vostok, Antarctica // Материалы гляциологических исследований. 2001. № 91. С. 138–149.

3. *McKay C.P., Hand K.P., Doran P.T, Andersen D.T., Priscu J.C.* Clathrate formation and the fate of noble and biologically useful gases in Lake Vostok, Antarctica // Geophysical Res. Letters. 2003. V. 30. № 13. P. 1702–1705.

4. Committee on Principles of Environmental Stewardship for the Exploration and Study of Subglacial Environments. Exploration of Antarctic Subglacial Aquatic Environments: Environmental and Scientific Stewardship. National Research Council, 2007. 162 p. http://www.nap.edu/catalog/11886.html.

5. *Siegert M.J., Ellis-Evans J.C., Tranter M., Mayer C., Petit J.R., Salamatin A.N., Priscu J.C.* Physical, chemical and biological processes in Lake Vostok and other Antarctic subglacial lakes // Nature. 2001. V. 414. № 6864. P. 603–609.

6. *Bulat S.A., Alekhina I.A., Blot M., Petit J.R., de Angelis M., Wagenbach D., Lipenkov V.Y., 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 for life in extreme icy environments // International Journal of Astrobiology. 2004. V. 3. № 1. P. 1–12.

7. *Clow G.D.* USGS polar temperature logging system, description and measurement Uncertainties. US Geological Survey Techniques and Methods 2–E3. US Geological Survey, Reston, VA, 2008. 24 p.

8. *Tsyganova E.A., Salamatin A.N.* Non-stationary temperature field simulations along the ice flow line “Ridge B — Vostok Station”, East Antarctica // Материалы гляциологических исследований. 2004. № 97. С. 57–70.

9. *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. Sapporo: Hokkaido University Press, 2009. V. 2. P. 167–194.

10. *Salamatin A.N., Lipenkov V.Ya., Blinov K.V.* Vostok (Antarctica) climate record time-scale deduced from the analysis of the borehole-temperature profile // Ann. of Glaciol. 1994. V. 20. P. 207–214.

11. *Барков Н.И., Вострецов Р.Н., Липенков В.Я., Саламатин А.Н.* Колебания температуры воздуха и осадков в районе станции Восток на протяжении четырех климатических циклов за последние 420 тыс. лет // Арктика и Антарктика. М.: Наука, 2002. Вып. 1 (35). С. 82–89.

12. *Манаков А.Ю., Ильдяков А.В., Липенков В.Я., Екайкин А.А., Ходжер Т.В.* Образование клатратного гидрата фреона HCFC-141b в глубокой скважине на станции Восток (Антарктида) в процессе вскрытия подледникового озера Восток // Криосфера Земли. 2017. Т. 21. № 3. С. 32–40. http://dx.doi.org/10.21782/KZ1560-7496-2017-3(32-40).

13. *Talalay P., Li Ya., Augustin L., Clow G.D., Hong J., Lefebvre E., Markov A., Motoyama H., Ritz C.* Geothermal heat flux from measured temperature profiles in deep ice boreholes in Antarctica // The Cryosphere. 2020. V. 14. P. 4021–4037. https://doi.org/10.5194/tc-14-4021-2020.

14. *Lipenkov V.Ya., Salamatin A.N., Duval P.* Bubbly-ice densification in ice sheets: II. Application // J. Glaciol. 1997. V. 43. № 145. P. 397–407.

15. *Архипкин В.С., Добролюбов С.А.* Основы термодинамики морской воды. М.: МГУ, 1998. 153 с.

16. *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.

17. *Липенков В.Я., Истомин В.А., Преображенская А.В.* Опыт исследования газового режима подледникового озера Восток // Проблемы Арктики и Антарктики. 2003. № 74. С. 66–87.

18. *Lipenkov V.Y., Ekaykin A.A., Polyakova E.V., Raynaud D.* Characterization of subglacial Lake Vostok as seen from physical and isotope properties of accreted ice // Phil. Trans. R. Soc. 2016. V. A 374. P. 20140303. http://dx.doi.org/10.1098/rsta.2014.0303.

19. *Ekaykin A.A., Lipenkov V.Ya., Kozachek A.V., Vladimirova D.O.* Stable water isotopic composition of the Antarctic Subglacial Lake Vostok: implications for understanding the Lake's hydrology // Isotopes in Environmental & Health Studies. 2016. V. 52. № 4–5. P. 468–476. http://dx.doi.org/10.1080/10256016.2015.1129327.

20. *Lipenkov V.Y., Candaudap F., Ravoir J., Dulac E., Raynaud D.* A new device for air content measurements in polar ice // J. Glaciol. 1995. V. 41. № 138. P. 423–429.

REFERENCES

1. *Lipenkov V.Ya., Lukin V.V., Bulat S.A., Vasiliev N.I., Ekaykin A.A., Leitchenkov G.L., Masolov V.N., Popov S.V., Savatyugin L.M., Salamatin A.N., Shibaev Yu.A.* Scientific outcomes of subglacial Lake Vostok studies in the IPY. Contribution of Russia to International Polar Year 2007/08. *Poliarnaia kriosfera* i *vody sushi.* Polar Cryosphere and Continental Waters. Moscow: Paulsen, 2011: 17–47. [In Russian].

2. *Lipenkov V.Ya., Istomin V.A.* On the stability of air clathrate-hydrate crystals in subglacial lake Vostok, Antarctica. *Materialy gliatsiologicheskikh issledovanii*. Data of Glaciological Studies. 2001, 91: 138–149.

3. *McKay C.P., Hand K.P., Doran P.T, Andersen D.T., Priscu J.C.* Clathrate formation and the fate of noble and biologically useful gases in Lake Vostok, Antarctica. Geophysical Res. Letters. 2003, 30 (13): 1702–1705.

4. Committee on Principles of Environmental Stewardship for the Exploration and Study of Subglacial Environments. Exploration of Antarctic Subglacial Aquatic Environments: Environmental and Scientific Stewardship. National Research Council, 2007: 162. http://www.nap.edu/catalog/11886.html.

5. *Siegert M.J., Ellis-Evans J.C., Tranter M., Mayer C., Petit J.R., Salamatin A.N., Priscu J.C.* Physical, chemical and biological processes in Lake Vostok and other Antarctic subglacial lakes. Nature. 2001, 414 (6864): 603–609.

6. *Bulat S.A., Alekhina I.A., Blot M., Petit J.R., de Angelis M., Wagenbach D., Lipenkov V.Y., 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 for life in extreme icy environments. International Journal of Astrobiology. 2004, 3 (1): 1–12.

7. *Clow G.D.* USGS polar temperature logging system, description and measurement Uncertainties. US Geological Survey Techniques and Methods 2–E3. US Geological Survey, Reston, VA, 2008: 24.

8. *Tsyganova E.A., Salamatin A.N.* Non-stationary temperature field simulations along the ice flow line "Ridge B — Vostok Station", East Antarctica. *Materialy gliatsiologicheskikh issledovanii.* Data of Glaciological Studies. 2004, 97: 57–70.

9. *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. 2009, 2: 167–194.

10. *Salamatin A.N., Lipenkov V.Ya., Blinov K.V.* Vostok (Antarctica) climate record time-scale deduced from the analysis of the borehole-temperature profile. Ann. of Glaciol. 1994, 20: 207–214.

11. *Barkov N.I., Vostretsov R.N., Lipenkov V.Ya., Salamatin A.N.* Variations of temperature and precipitation in the Vostok Station area over the four climatic cycles of the past 420 kyr. *Arktika i Antarktika.* The Arctic and Antarctic. Moscow: Nauka, 2002: 82–89. [In Russian].

12. *Manakov A.Yu., Ildyakov A.V., Lipenkov V.Ya, Ekaykin A.A., Khodzher T.V.* Formation of clathrate hydrates of hydrochlorofluorocarbon 141b in the deep borehole at Vostok Station (Antarctica) in the course of the unsealing of subglacial Lake Vostok. *Kriosfera Zemli.* The Earth's Cryosphere. 2017, 21 (3): 32–40. [In Russian.] http://dx.doi.org/10.21782/KZ1560-7496-2017-3(32-40).

13. *Talalay P., Li Ya., Augustin L., Clow G.D., Hong J., Lefebvre E., Markov A., Motoyama H., Ritz C.* Geothermal heat flux from measured temperature profiles in deep ice boreholes in Antarctica. The Cryosphere. 2020, 14: 4021–4037. https://doi.org/10.5194/tc-14-4021-2020.

14. *Lipenkov V.Ya., Salamatin A.N., Duval P.* Bubbly-ice densification in ice sheets: II. Application. J. Glaciol. 1997, 43 (145): 397–407.

15. *Arkhipkin V.C., Dobrolyubov C.A. Osnovy termodinamiki morskoi vody.* Fundamentals of thermodynamics of seawater. Moscow: Moscow State University, 1998: 153 p. [In Russian].

16. *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, 181: 529–538.

17. *Lipenkov V.Y., Istomin V.A., Preobrazhenskaya A.V.* Towards establishing the gas budget of subglacial Lake Vostok. *Problemy Arktiki i Antarktiki.* Problems of Arctic and Antarctic. 2003, 74: 66–87. [In Russian].

18. *Lipenkov V.Y., Ekaykin A.A., Polyakova E.V., Raynaud D.* Characterization of subglacial Lake Vostok as seen from physical and isotope properties of accreted ice. Phil. Trans. R. Soc. 2016, A 374: 20140303. http://dx.doi.org/10.1098/rsta.2014.0303.

19. *Ekaykin A.A., Lipenkov V.Ya., Kozachek A.V., Vladimirova D.O.* Stable water isotopic composition of the Antarctic Subglacial Lake Vostok: implications for understanding the Lake's hydrology. Isotopes in Environmental & Health Studies. 2016, 52 (4–5): 468–476. http://dx.doi.org/10.1080/10256016.2015.1129327.

20. *Lipenkov V.Y., Candaudap F., Ravoir J., Dulac E., Raynaud D.* A new device for air content measurements in polar ice. J. Glaciol. 1995, 41 (138): 423–429.