

Ледники и ледниковые покровы

УДК 551.89

doi: 10.31857/S2076673421010067

Сохранность климатического сигнала в слоях древнего льда в районе Купола В (Антарктида)

© 2021 г. А.А. Екайкин^{1,2*}, В.Я. Липенков¹, К.Б. Чихачев¹

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

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

*ekaykin@aari.ru

Preservation of the climatic signal in the old ice layers at Dome B area (Antarctica)

A.A. Ekaykin^{1,2*}, V.Ya. Lipenkov¹, K.B. Tchikhatchev¹

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

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

*ekaykin@aari.ru

Received December 2, 2020 / Revised December 11, 2020 / Accepted December 22, 2020

Keywords: Antarctica, Dome B, old ice, paleoclimate, modeling, ice dynamics, stable water isotopes, diffusion.

Summary

In this work we have presented the results of numerical modeling of the age and temperature distribution in ice layers at Dome B site ($79,02^{\circ}$ S, $93,69^{\circ}$ E, altitude 3807 m a.s.l., ice thickness about 2.5 km), located 300 km to the west from Russian Antarctic station Vostok. Dome B is situated on the onset of the ice flow line passing through deep borehole 5G, and is considered as one of the most promising places to search for and to study the Earth's oldest ice with the age of up to 1.5 Ma. According to our calculations, all realistic scenarios show the ice age at 60 m above the ice base to be considerably older than 1 Ma, and the glacier base temperature is well below the pressure melting point (-1.8°C for pressure = 23 MPa). For the most likely scenario (accumulation rate $1.8 \text{ g}/(\text{cm}^2 \text{ year})$, effective ice surface temperature -64°C and geothermal heat flux 60 mW/m^2) the ice age is 1.4 Ma and the basal temperature is about -13°C that is close to the earlier predictions from a 2D-model. Maximum estimate of the «diffusion length» in the old ice (for the scenario in which the basal temperature reaches the melting point, and in which 30% of «excess diffusion» is taken into account) is 5.2 cm. In 1.4 Ma-old ice a 40-ka climatic cycle is squeezed into a 290-cm thick ice layer. For this ratio of wave length and diffusion length the climatic signal attenuation (ratio between the signal amplitude after and before the diffusive smoothing) is 0.6%. Thus, due to the relatively low ice temperature here we may expect a nearly undisturbed climatic curve in the old ice core that will be drilled one day at Dome B. At the same time shorter oscillations with the wavelengths of < 1500 years will be totally erased by diffusion.

Citation: Ekaykin A.A., Lipenkov V.Ya., Tchikhatchev K.B. Preservation of the climatic signal in the old ice layers at Dome B area (Antarctica). *Led i Sneg. Ice and Snow.* 2021. 61 (1): 5–13. [In Russian]. doi: 10.31857/S2076673421010067.

Поступила 2 декабря 2020 г. / После доработки 11 декабря 2020 г. / Принята к печати 22 декабря 2020 г.

Ключевые слова: Антарктида, Купол В, древний лёд, палеоклимат, моделирование, динамика льда, стабильные изотопы воды, диффузия.

Представлены результаты моделирования возраста и температуры льда для Купола В ($79,02^{\circ}$ ю.ш., $93,69^{\circ}$ в.д. высота 3807 м над ур. моря, толщина льда около 2,5 км) в Антарктиде. Для всех сценариев возраст льда на отметке 60 м выше ложа ледника составляет более 1 млн лет, а для наиболее вероятного сценария – 1,4 млн лет. Температура ложа для всего диапазона реалистичных оценок геотермального потока тепла находится ниже точки плавления и для наиболее вероятного сценария равна около -13°C . Расчётное ослабление амплитуды 40-тысячелетнего климатического цикла в древнем льду за счёт молекулярной диффузии составляет около 0,6%. Результаты исследования позволяют сделать вывод, что Купол В – перспективное место для извлечения нового глубокого керна, с помощью которого можно будет получить ненарушенный климатический сигнал за последние 1,4 млн лет.

Введение

Поиск древнейшего на планете льда возрастом до 1,5 млн лет и изучение последовательности климатических событий на протяжении этого периода, включая изменение концентрации парниковых газов в атмосфере, – важнейшие задачи гляциологии и палеогеографии первой половины XXI в. [1, 2]. Их актуальность прежде всего связана с выяснением причин так называемого «среднеплейстоценового климатического перехода» (Mid-Pleistocene Transition – MPT) 0,8–1,2 млн лет назад [3]. Понимание причин МПТ даст возможность спрогнозировать облик нашей планеты в грядущие столетия, если человечество не справится с глобальным вызовом по резкому снижению антропогенных выбросов CO_2 . Согласно результатам моделирования, древний лёд (возраст более 1 млн лет) может залегать в основании Восточно-Антарктического ледникового щита вблизи главного ледораздела, проходящего через Купола Фуджи, А, В и С [4]. Недавняя находка льда возрастом 1,2 млн лет в нижней части ледяного керна станции Восток на глубине 3537 м [5] впервые подтвердила, что такой лёд действительно сохранился до настоящего времени. В интервале 3310–3537 м (возраст 0,42–1,2 млн лет) в керне

со станции Восток наблюдаются несогласное залегание и перемешивание ледяных слоёв, что вызвало искажение заключённого в этом керне климатического сигнала [6]. Однако сам факт сохранности древнего льда в основании Восточно-Антарктического ледникового щита говорит о том, что где-то здесь эти древние слои льда могут залегать и в ненарушенном виде.

Одним из наиболее перспективных мест для поиска древнего льда считается Ледораздел В (произносится «Би»), расположенный примерно в 300 км к западу от станции Восток (рис. 1), вверх по линии тока льда VFL (Vostok Flow Line), проходящей через буровую скважину 5Г на станции Восток. До недавнего времени район Ледораздела В оставался обширным белым пятном с очень скучным набором доступной информации. Данные немногочисленных дистанционных исследований [7] показывают, что подлёдный рельеф в районе этого ледораздела представляет собой холмистую или гористую местность с высотами порядка 500–1000 м над ур. моря, покрытую ледниковым щитом, мощность которого здесь достигает 2,5 км (см. рис. 1). Результатов прямых измерений геотермального потока тепла (Geothermal Heat Flux – GHF) для этого района нет, однако косвенные оценки указывают, что такой поток находится в пределах 50–60 mWt/m^2 [8].

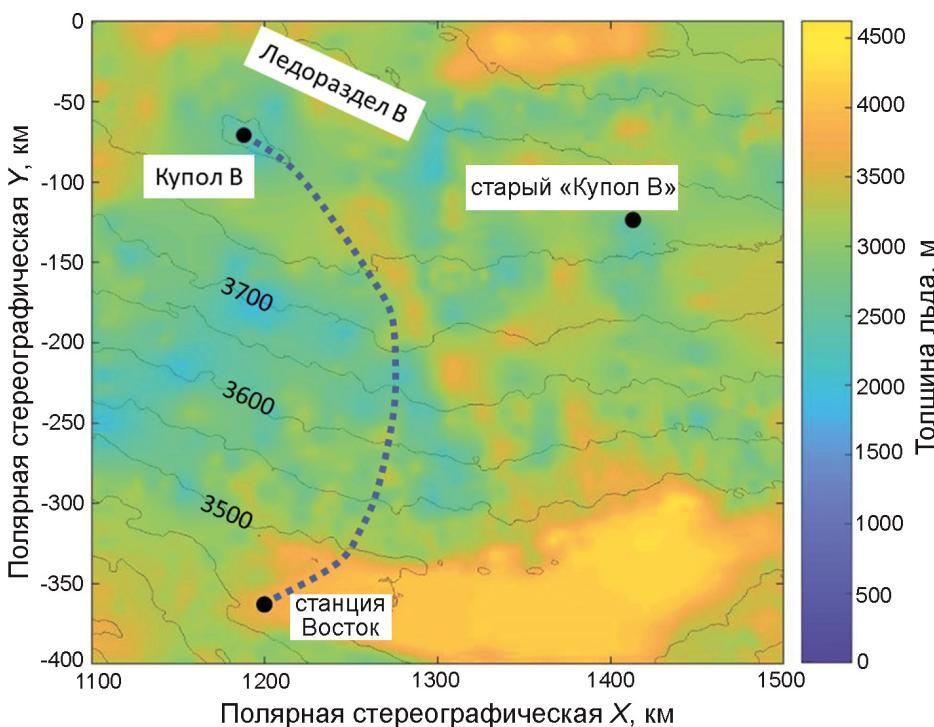


Рис. 1. Карта толщины льда в районе между Ледоразделом В и подледниковым озером Восток.

Тонкие линии – изогипсы высоты поверхности через 50 м. Показано положение истинного Купола В, старого полевого лагеря «Купол В», станции Восток, а также линии тока VFL

Fig. 1. Map of ice thickness in the area between Ridge B and the subglacial lake Vostok.

Thin lines are elevation contours spaced by 50 m. The location of topographic (true) Dome B, old drilling camp «Dome B» and Vostok station is shown, as well as of VFL ice flow line

В январе 2020 г. при логистической поддержке Российской антарктической экспедиции нами был выполнен первый научный поход на Купол В ($79,02^{\circ}$ ю.ш., $93,69^{\circ}$ в.д., 3807 м над ур. моря, см. рис. 1). Купол В – топографический купол на Ледоразделе В, с которого берёт начало линия тока льда VFL. Топографический (или истинный) Купол В не следует путать с расположенным в 220 км к северу от него старым полевым лагерем «Купол В», который был организован Советской антарктической экспедицией в 1980-х годах для осуществления проекта глубокого бурения ледника [9]. В 2020 г. по маршруту похода были проведены комплексные гляциологические, геодезические, геохимические и радиолокационные исследования, а на самом куполе выполнено бурение скважины глубиной 20,5 м с последующим исследованием поднятого фирнового керна [10]. В результате удалось получить первые натурные гляциоклиматические данные о Куполе В (в первую очередь температуру фирна на глубине затухания сезонных колебаний и скорость снегонакопления), необходимые для оценки возраста ледяных отложений.

Настоящая работа посвящена моделированию возраста льда в базальных слоях ледника в районе Купола В на основании вновь полученных оценок современных значений скорости снегонакопления, температуры фирна и изотопного состава поверхностного снега. Отметим, что возможность реконструкции климатических событий далёкого прошлого по образцам ледяного керна определяется не только возрастом слагающего его льда, но и степенью сохранности климатического сигнала, который подвергается существенному диффузионному сглаживанию в придонных, наиболее древних слоях ледника. Поэтому в этой работе особое внимание уделено моделированию процесса диффузии молекул воды во льду и оценке степени ослабления климатического сигнала в изотопном профиле ледяного керна, который может быть получен при осуществлении здесь проекта глубокого бурения ледника.

Методы

Моделирование возраста и температуры льда. Для моделирования распределения возраста и температуры льда в ледяной толще в районе Купо-

ла В использован упрощённый вариант одномерной стационарной модели ледника [4]. Важное допущение модели – отсутствие донного таяния. Как будет показано далее, в диапазоне реалистичных значений граничных условий возможность достижения температурой льда точки плавления здесь действительно невелика. Кроме того, согласно теоретическим расчётам [11], вероятность того, что базальный лёд за последние 1,5 млн лет достигал в районе купола точки плавления, не превышает 15%. Распределение возраста льда t в толще ледника рассчитывается по формуле

$$t(z) = \int_H^z -\frac{1}{a} \frac{z^{m+1}}{H} dz, \quad (1)$$

где a – скорость аккумуляции в метрах ледяного эквивалента в год (м л.э./год); H – толщина ледника, м л.э.; z – вертикальная координата, меняющаяся от нуля на ложе ледника до H на поверхности ледника; m – настраиваемый параметр, значение которого принимается равным 0,5 [4].

Значения H и a могут меняться во времени, но в наших расчётах они принимались постоянными и равными среднему значению за расчётный период. Во всех численных экспериментах $H = 2500$ м л.э., а величину a использовали как дополнительный настроочный параметр (см. далее). Расчёт возраста останавливается на расстоянии 60 м от ложа ледника, так как глубже этой отметки ошибка расчёта возраста по простой модели слишком велика. Даже в условиях ледяного купола, когда горизонтальные движения льда близки к нулю, можно ожидать, что в нижних 60 м льда будет наблюдаться несогласное залегание ледяных слоёв и климатический сигнал будет искажён [12]. Температура льда рассчитывается следующим образом:

$$T(z) = T_s - C \left(\int_0^z e^{-\frac{az^{m+2}}{kH^{m+1}(m+2)} dz} - \int_0^H e^{-\frac{az^{m+2}}{kH^{m+1}(m+2)} dz} \right), \quad (2)$$

где T_s – температура поверхности ледника, $^{\circ}\text{C}$; C – вертикальный температурный градиент на ложе ледника ($^{\circ}\text{C}/\text{м}$), равный GHF/K , здесь K – теплопроводность льда, $\text{Вт}/(\text{м } ^{\circ}\text{C})$; k – температуропроводность ($\text{м}^2/\text{год}$), равная $K/\rho c$, где ρ – плотность льда ($920 \text{ кг}/\text{м}^3$), а c – теплоёмкость льда, $\text{Дж}/(\text{кг } ^{\circ}\text{C})$.

Теплопроводность и теплоёмкость льда, в свою очередь, зависят от температуры: $K = 2,55(1 - 0,0039(T + 30))$; $c = 1,89(1 + 0,0037 \times (T + 30))$ [13, 14]. Отметим, что в типичном для ледникового щита Антарктиды температурном диапазоне они могут меняться в широких пределах: при $T = -60^{\circ}\text{C}$ значение $K = 2,85 \text{ Вт}/(\text{м}^{\circ}\text{C})$ и $c = 1680 \text{ Дж}/(\text{кг}^{\circ}\text{C})$, а при $T = -10^{\circ}\text{C}$ значение $K = 2,35 \text{ Вт}/(\text{м}^{\circ}\text{C})$ и $c = 2030 \text{ Дж}/(\text{кг}^{\circ}\text{C})$. В нашей модели мы берём значения этих величин, рассчитанные по среднему значению температуры в леднике, которая немного меняется при изменении K и c , поэтому для получения окончательного результата требуются 2–3 итерации расчётов.

Моделирование молекулярной диффузии в льду. Расчёт распределения возраста и температуры льда по уравнениям (1) и (2) позволяет легко вычислить температурную историю каждого слоя в леднике, которая определяет итоговую величину диффузионного сглаживания изотопного сигнала. Для оценки степени диффузионного сглаживания удобно пользоваться так называемой «длиной диффузии» l , которая представляет собой среднее квадратическое вертикальное смещение молекул воды за время, прошедшее с момента отложения данного слоя на поверхности ледника и численно равное стандартному отклонению в «гауссовском» сглаживающем фильтре, имеющем форму нормального распределения. Модель для расчёта l детально описана в работе [6].

Результаты

Возраст льда в районе Купола В. В нашей одномерной модели при условии отсутствия донного таяния возраст льда на исследуемой глубине определяется исключительно скоростью аккумуляции a . По данным [10], современная скорость снегонакопления на Куполе В ($2,28 \text{ г}/(\text{см}^2 \text{ год})$) на 10% выше, чем в районе станции Восток. Средняя за 400 тыс. лет скорость аккумуляции на станции Восток составляет $0,0177 \text{ м л.э./год}$ [15]. Исходя из предположения, что 10-процентная разница в скорости аккумуляции на Куполе В и станции Восток осталась неизменной в прошлом, среднее многолетнее значение a для наших расчётов принималось равным $0,0196 \text{ м л.э./год}$, что соответствует

$1,8 \text{ г}/(\text{см}^2 \text{ год})$. Вместе с тем в соответствии с новыми данными, полученными по фирновым кернам в районе станции Восток [16], средняя за последние 2000 лет скорость аккумуляции в этом районе составила $1,8 \text{ г}/(\text{см}^2 \text{ год})$, что на 7% меньше средней скорости аккумуляции за этот же интервал времени по данным хроностратиграфической шкалы AICC2012 [15]. С учётом этого величина a для расчётов возраста льда на Куполе В также должна быть снижена на 7% – до $0,0183 \text{ м л.э./год}$ ($1,68 \text{ г}/(\text{см}^2 \text{ год})$).

В наших расчётах мы использовали три значения a , чтобы проверить чувствительность модели к изменению этого параметра: $0,0183$ и $0,0196 \text{ м л.э./год}$, а также одно более высокое значение a , равное $0,0228 \text{ м л.э./год}$ (эти значения в более привычных единицах соответствуют $1,68$, $1,8$ и $2,1 \text{ г}/(\text{см}^2 \text{ год})$ соответственно). Результаты расчёта изменения возраста льда по глубине в районе Купола В показаны на рис. 2, *a*. Как видно из графиков, при максимальном значении a возраст льда на отметке 60 м над ложем достигает 1,2 млн лет, тогда как при минимальном a он составляет почти 1,5 млн лет.

Распределение температуры в леднике. Профиль температуры льда на ледяном куполе определяется тремя основными факторами: а) величиной GHF; б) температурой поверхности T_s ; в) скоростью аккумуляции a . Согласно [8], величина GHF в районе Купола В находится в пределах $50\text{--}60 \text{ мВт}/\text{м}^2$, поэтому для наших расчётов мы принимаем два крайних значения этого параметра – 50 и $60 \text{ мВт}/\text{м}^2$, а для проверки чувствительности модели к GHF и значение $70 \text{ мВт}/\text{м}^2$. Очевидно, что средняя эффективная температура поверхности ледника T_s , которую необходимо использовать в расчётах для получения наблюдаемого распределения температуры льда с глубиной, отличается от современной температуры фирна на глубине затухания сезонных колебаний. Поскольку экспериментальный температурный профиль для Купола В пока не доступен, для оценки T_s использованы данные, имеющиеся для других куполов Антарктиды. Так, значение T_s на Куполе С составляет -60°C [4], тогда как современная температура на глубине затухания сезонных колебаний равна там -54°C . На Куполе В современная температура фирна на глубине 20 м составляет $-58,1^{\circ}\text{C}$ [10], исходя из чего можно предположить, что T_s должна быть

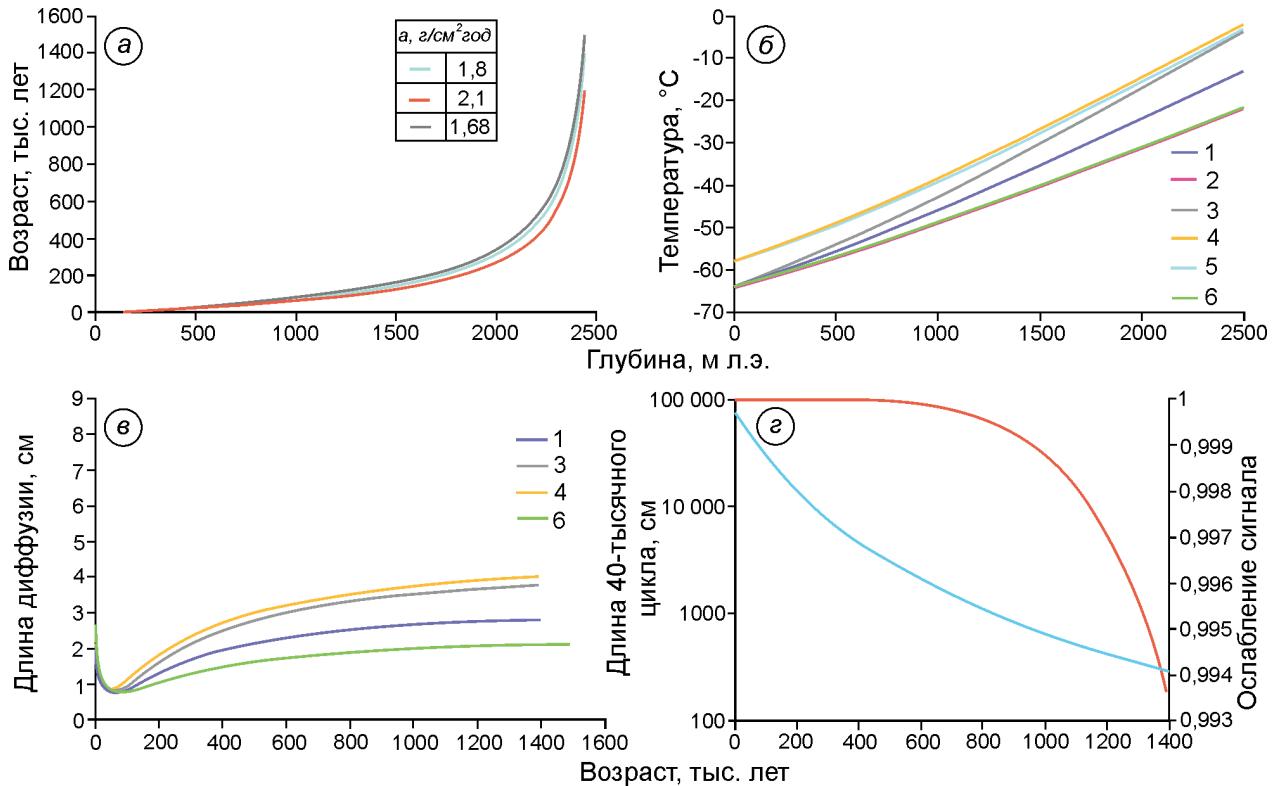


Рис. 2. Результаты модельных расчётов для Купола В.

а – зависимости возраста льда от глубины, рассчитанные для скорости накопления льда 1,68, 1,8 и 2,1 г/(см² год); *б* – распределение температуры в леднике для разных сценариев: в сценариях 1–3 температура поверхности ледника T_s и a равны -64 °С и 1,8 г/(см² год), а геотермальный поток тепла GHF составляет 60, 50 и 70 мВт/м² соответственно; сценарий 4: T_s и a равны -58 °С и 1,8 г/(см² год), а GHF – 64,3 мВт/м², при этом температура на ложе достигает точки плавления ($-1,8$ °С); сценарий 5 – то же, что для сценария 4, но для $a = 2,1$ г/(см² год); сценарий 6 – то же, что для сценария 2, но для $a = 1,68$ г/(см² год) (на рис. 2, *б* сценарии 2 и 6 практически слились в одну линию); *в* – распределение длины диффузии в зависимости от возраста льда для некоторых выбранных сценариев (номера соответствуют сценариям на рис. 2, *б*); *г* – толщина слоя льда, содержащего временной интервал 40 тыс. лет (синяя кривая) для $a = 1,8$ г/(см² год), а также ослабление амплитуды (отношение конечной амплитуды к начальной) периодического колебания с длиной волны 40 тыс. лет для длины диффузии в древнем льду 5,2 см (оранжевая кривая)

Fig. 2. The results of model simulations for Dome B.

а – dependence of ice age on depth, calculated for accumulation rate (*a*) = 1.68, 1.8 and 2.1 g/(cm² year); *б* – temperature distribution in glacier for different scenarios: in scenarios 1–3 ice surface temperature T_s and *a* are equal -64 °C and 1.8 g/(cm² year), and geothermal heat flux GHF = 60, 50 and 70 mW/m², correspondingly; scenario 4: T_s and *a* are -58 °C and 1.8 g/(cm² year), while GHF = 64.3 mW/m², the basal temperature in this scenario reaches pressure melting point (-1.8 °C); scenario 5 is the same as 4, but for *a* = 2.1 g/(cm² year); scenario 6 is the same as 2, but for *a* = 1.68 g/(cm² year) (in Fig. 2, *б* scenarios 2 and 6 are almost merged into one line); *в* – the distribution of diffusion length as a function of ice age for selected scenarios (the numbers correspond to scenarios in Fig. 2, *б*); *г* – the thickness of an ice layer that contains the time interval of 40 ka (blue curve) for *a* = 1.8 g/(cm² year), as well as the attenuation (ratio of final amplitude to the initial one) of the amplitude of a periodic oscillation with the wavelength of 40 ka for the diffusion length equal to 5.2 cm (orange curve)

равна -64 °С. Для проверки чувствительности модели к этому параметру мы также используем значение $T_s = -58$ °С.

Результаты расчётов температурного профиля показаны на рис. 2, *б*. Наибольшее влияние на температуру оказывает значение GHF. При $T_s = -64$ °С и $a = 1,8$ г/(см² год) температура на ложе растёт от $-22,1$ до $-3,9$ °С при увеличении GHF от 50 до 70 мВт/м² (сценарии 1, 2 и 3 на рис. 2, *б*). Отметим, что даже при макси-

мальном потоке геотермального тепла температура на ложе находится ниже точки плавления, которая для толщины льда 2500 м л.э. (давление 23 МПа) составляет $-1,8$ °С. При заданных значениях температуры и скорости снегонакопления точка плавления будет достигнута при GHF = 72 мВт/м².

Изменение температуры поверхности, как следует из уравнения (2), сдвигает весь температурный профиль в сторону больших или меньших

значений. При $T_s = -58$ °C, GHF = 60 мВт/м² и $a = 1,8$ г/(см² год) температура на ложе составляет −6,2 °C. При таких значениях T_s и a точка плавления на ложе будет достигнута при GHF = 64 мВт/м² (сценарий 4 на рис. 2, б), что по-прежнему превышает оценки, приведённые в работе [8].

Наконец, скорость аккумуляции относительно слабо влияет на температурный профиль: при росте a увеличивается адвекция холода сверху вниз, что незначительно уменьшает температуру на ложе. В данной работе в качестве основного сценария принят следующий: GHF = 60 мВт/м², $a = 1,8$ г/(см² год), $T_s = -64$ °C. При этом температура льда на ложе составляет −13,1 °C, что близко к оценкам, полученным ранее с использованием двухмерной модели линии тока VFL [17].

Длина диффузии. На рис. 2, в показано распределение длины диффузии для различных сценариев распределения возраста и температуры в леднике. В качестве начальной длины диффузии l_0 на границе превращения фирна в лёд выбрано значение 8 см. Однако, как показано в работе [6], значение l_0 практически не влияет на итоговую длину диффузии в древнем льду. Для всех сценариев длина диффузии быстро убывает при увеличении возраста льда до 100 тыс. лет за счёт утончения слоёв. Затем начинается рост этого параметра по мере дальнейшего увеличения возраста и температуры льда, совокупное влияние которых перевешивает уменьшение l , связанное с утончением слоёв. Поскольку l тесно связано с температурой, на величину этого параметра первостепенное влияние оказывает GHF. Для основного сценария (линии 1 на рис. 2, б и в) длина диффузии достигает 3 см при возрасте льда 1,4 млн лет. Максимальная длина диффузии, которая может быть достигнута при сценарии 4, когда температура льда на ложе достигает точки плавления, составляет 4 см.

Обсуждение

Наиболее вероятные значения заложенных в модель граничных условий предполагают, что возраст льда на отметке 60 м от ложа существенно превышает 1 млн лет (самое вероятное значение 1,4 млн лет), причём температура этого льда по наиболее вероятному сценарию со-

ставляет −14,4 °C. Чтобы нижняя часть ледника достигла температуры плавления, необходим очень большой (> 70 мВт/м²) геотермальный поток тепла, что не подтверждают имеющиеся оценки [8], или нереалистично высокое значение температуры поверхности ледника. Низкие температуры льда также способствуют хорошей сохранности изотопного сигнала после его частичного сглаживания молекулярной диффузией. Длина диффузии во льду возрастом 1,4 млн лет составляет 3 см по наиболее вероятному сценарию и 4 см по максимальной оценке (при которой температура на ложе достигает точки плавления). При $l = 4$ см все квазипериодические волны изотопного состава льда с длиной волнами менее 10 см будут полностью уничтожены, с длиной 10–100 см – в той или иной степени ослаблены, а с длиной более 100 см – практически не затронуты. Для льда возрастом 1,4 млн лет слой льда в 10 см соответствует интервалу времени 1,4 тыс. лет, а 1 м льда – интервалу времени 13,7 тыс. лет. Таким образом, диффузионное сглаживание полностью сотрёт все климатические колебания с периодом меньше порядка 1400 лет, тогда как более длинные колебания или не будут затронуты, или могут быть частично восстановлены с помощью методики «обратной диффузии» [18].

В работе [19] показано, что для керна, пробуренного на Куполе С, характерна «дополнительная диффузия», при которой наблюдаемое диффузионное сглаживание за счёт неустановленных пока причин сильнее того, которое предполагается моделью диффузии. Для керна скважины 5Г было показано [6], что в условиях станции Восток это дополнительное сглаживание невелико и составляет не более 30% расчётной величины l . С учётом этого фактора максимально возможная оценка длины диффузии в древнем льду Купола В будет равна 5,2 см. В эпоху до МРТ длина основного климатического цикла составляла около 40 тыс. лет [3]. Во льду возрастом 1,4 млн лет на глубине 2440 м в районе Купола В временной интервал длиной 40 тыс. лет заключён в слое льда толщиной около 290 см (см. рис. 2, г). При длине волны 290 см и длине диффузии 5,2 см ослабление амплитуды сигнала составляет около 0,6% (см. рис. 2, г). Таким образом, можно сделать вывод, что при отсутствии складчатости и перемешива-

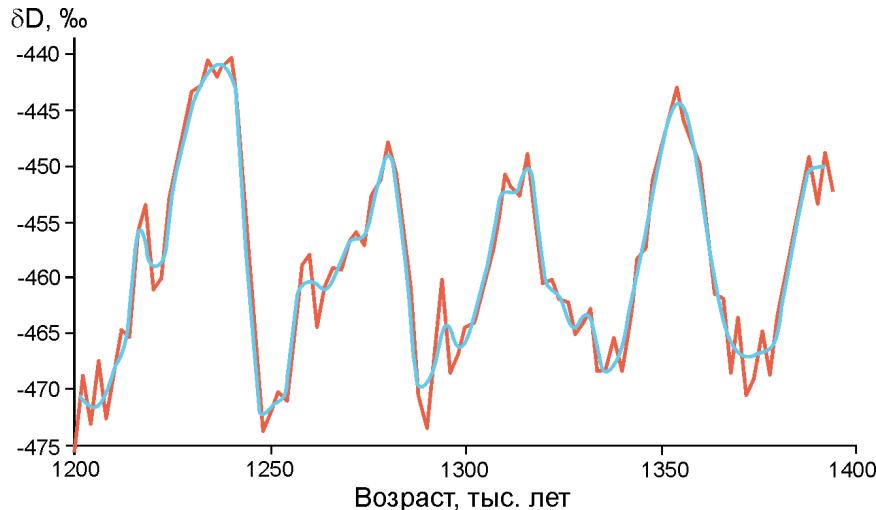


Рис. 3. Исходный (оранжевая линия) и сглаженный (синяя линия) климатический сигнал в интервале 1,2–1,4 млн лет, который можно ожидать в гипотетическом керне Купола В.

Для расчёта сглаженного сигнала использована длина диффузии 5,2 см

Fig. 3. The initial (orange curve) and smoothed (blue curve) climatic signal in the time interval 1.2–1.4 Ma BP that could be expected in a hypothetical core Ridge B.

To calculate the smoothed signal, we used the diffusion length equal to 5.2 cm

ния слоёв в ледяном керне, который предполагается получить в районе Купола В, должен сохраняться ненарушенный климатический сигнал возрастом до 1,4 млн лет.

На рис. 3 мы смоделировали вероятную климатическую кривую, которая может быть получена по такому керну древнего льда. В качестве суррогатного климатического сигнала взят изотопный ряд по морским донным осадкам [20], приведённый по амплитуде и среднему значению сигнала к климатической кривой станции Восток [21] с учётом разницы изотопного состава поверхностного слоя снега в пунктах станции Восток и Купол В [10]. Согласно рис. 3, в процессе диффузационного сглаживания форма и амплитуда климатического сигнала в рамках 40-тысячелетнего цикла сохраняются, но более короткие колебания с периодом порядка нескольких тысяч лет полностью либо частично сглаживаются. Ожидается, что сохранность сигнала в вертикальном профиле концентрации парниковых газов, который будет получен по этому льду, будет существенно лучше, чем для изотопного состава благодаря меньшей скорости диффузии молекул газа во льду по сравнению с самодиффузией молекул воды [22].

Заключение

Выполненные исследования подтверждают предположение, что район Купола В ($79,02^{\circ}$ ю.ш., $93,69^{\circ}$ в.д., 3807 м над ур. моря), расположенный в 300 км к западу от станции Восток и являющий-

ся началом линии тока льда, которая проходит через скважину 5Г, следует рассматривать в качестве одного из наиболее перспективных мест для поиска и исследования древнейшего на Земле льда возрастом до 1,5 млн лет. Для наиболее вероятного сценария, при котором средняя скорость аккумуляции равна $1,8 \text{ г}/(\text{см}^2 \text{ год})$, возраст льда на отметке 60 м над ложем составит 1,4 млн лет. При нереалистично высокой скорости снегонакопления, равной $2,1 \text{ г}/(\text{см}^2 \text{ год})$, этот возраст будет равен 1,2 млн лет.

Температура на ложе при всех сценариях, предполагающих реалистичные значения температуры поверхности ледника и величины геотермального потока тепла, не достигает точки плавления. Для наиболее вероятного сценария (скорость аккумуляции $1,8 \text{ г}/(\text{см}^2 \text{ год})$; температура поверхности -64°C ; геотермальный поток тепла $60 \text{ мВт}/\text{м}^2$) температура на ложе равна около -13°C , что близко к оценке, полученной по двухмерной модели динамики ледника [17].

Максимальная оценка «длины диффузии» в древнем льду (для сценария, при котором температура на ложе достигает точки плавления и который учитывает 30% дополнительной диффузии) составляет 5,2 см. При возрасте 1,4 млн лет толщина слоя льда, содержащего в себе интервал времени 40 тыс. лет, равняется 290 см. При таком соотношении длины волны и длины диффузии ослабление сигнала 40-тысячелетнего климатического цикла (т.е. отношение амплитуды сигнала после сглаживания к амплитуде до сглаживания) составит 0,6%. Иными словами: благодаря относительно низкой температуре

ре льда, мы можем ожидать практически ненарушенную климатическую кривую для древнего льда в ледяном керне, который когда-нибудь учёные извлекут на Куполе В. При этом высокочастотные колебания с длиной волны менее 1,5 тыс. лет будут полностью стёрты диффузией.

Дальнейшее исследование Купола В предполагает продолжение рекогносцировочных походов, направленных на изучение гляциоклиматических условий этого региона и выбор точки будущего бурения. В настоящий момент к наиболее приоритетным относятся две задачи: 1) изучение подлёдного рельефа в ближайших окрестностях (в радиусе нескольких десятков километров)

Купола В с помощью ледового локатора; 2) измерение потока геотермального тепла в этом районе; при условии достаточно точной измерительной аппаратуры надёжное определение величины этого потока можно выполнить в скважине глубиной порядка 20% толщины ледника, что для Купола В составляет около 500 м.

Благодарности. Данное исследование было поддержано Российским научным фондом, грант № 18-17-0010.

Acknowledgements. This study was supported by Russian Science Foundation, grant № 18-17-0010.

References

1. Lipenkov V.Ya., Ekaykin A.A. Searching for Antarctica's oldest ice. *Led i Sneg. Ice and Snow.* 2018, 58 (2): 255–260. doi: 10.15356/2076-6734-2018-2-255-260. [In Russian].
2. Kennicutt M.C. II, Chown S.L., Cassano J.J., Liggett D., Peck L.S., Massom R., Rintoul S.R., Storey J., Vaughan D.G., Wilson T.J., Allison I., Ayton J., Badhe R., Baeseman J., Barrett P.J., Bell R.E., Bertler N., Bo S., Brandt A., Bromwich D., Cary S.C., Clark M.S., Convey P., Costa E.S., Cowan D., Deconto R., Dunbar R., Elfring C., Escutia C., Francis J., Fricker H.A., Fukuchi M., Gilbert N., Gutt J., Havermans C., Hik D., Hosie G., Jones C., Kim Y.D., Le Maho Y., Lee S.H., Leppe M., Leitchenkov G., Li X., Lipenkov V., Lochte K., López-Martínez J., Lüdecke C., Lyons W., Marenssi S., Miller H., Morozova P., Naish T., Nayak S., Ravindra R., Retamales J., Ricci C.A., Rogan-Finnemore M., Ropert-Coudert Y., Samah A.A., Sanson L., Scambos T., Schloss I.R., Shiraishi K., Siegert M.J., Simões J.C., Storey B., Sparrow M.D., Wall D.H., Walsh J.C., Wilson G., Winther J.G., Xavier J.C., Yang H. and Sutherland W.J. A roadmap for Antarctic and Southern Ocean science for the next two decades and beyond. *Antarctic Science.* 2014: 1–16. doi:10.1017/S0954102014000674.
3. Berends C.J., de Boer B., van de Wal R.S.W. Reconstructing the Evolution of Ice Sheets, Sea Level and Atmospheric CO₂ During the Past 3.6 Million Years. *Clim. Past Disc.* 2020: 1–22. <https://doi.org/10.5194/cp-2020-52>.
4. Fischer H., Severinghaus J., Brook E., Wolff E., Albert M., Alemany O., Arthern R., Bentley C., Blankenship D., Chappellaz J., Creyts T., Dahl-Jensen D., Dinn M., Frezzotti M., Fujita S., Gallee H., Hindmarsh R., Hudspeth D., Jugie G., Kawamura K., Lipenkov V., Miller H., Mulvaney R., Parrenin F., Pattyn F., Ritz C., Schwander J., Steinhage D., van Ommen T., Wilhelms F. Where to find 1.5 million yr old ice for the IPICS «Oldest-Ice» ice core. *Climate of the Past.* 2013, 9: 2489–2505.
5. Lipenkov V.Ya., Salamatin A.N., Jiang W., Ritterbusch F., Bender M.L., Orsi A., Landais A., Uchida T., Ekaykin A.A., Raynaud D., Yang G.-M., Lu Z.-T., Chappelaz J. New ice dating tools reveal 1.2 Ma old meteoric ice near the base of the Vostok ice core. *Geophys. Research. Abstracts.* 2019, 21: EGU2019–8505.
6. Ekaykin A.A., Lipenkov V.Ya., Veres A.N., Kozachek A.V., Skakun A.A. On the possibility to restore the climatic signal in the disturbed record of stable water isotope content in the old (0.4–1.2 Ma) Vostok ice (Central Antarctica). *Led i Sneg. Ice and Snow.* 2019, 59 (4): 437–451. <https://doi.org/10.15356/2076-6734-2019-4-463>. [In Russian].
7. Fretwell L.O., Pritchard H.D., Vaughan D.G., Bamber J.L., Barrand N.E., Bell R., Bianchi C., Birmingham R.G., Blankenship D.D., Casassa G., Catania G., Callens D., Conway H., Cook A.J., Corr H.F.J., Damaske D., Damm V., Ferraccioli F., Forsberg R., Fujita S., Gogineni P., Griggs J.A., Hindmarsh R.C.A., Holmlund P., Holt J.W., Jacobel R.W., Jenkins A., Jokat W., Jordan T., King E.C., Kohler J., Krabill W., Riger-Kusk M., Langley K.A., Leitchenkov G., Leuschen C., Luyendyk B.P., Matsuoka K., Nogi Y., Nost O.A., Popov S.V., Rignot E., Rippin D.M., Riviera A., Roberts J., Ross N., Siegert M.J., Smith A.M., Steinhage D., Studinger M., Sun B., Tinto B.K., Welch B.C., Young D.A., Xiangbin C. & Zirizzotti A. Bedmap2: improved ice bed, surface and thickness datasets for Antarctica. *The Cryosphere.* 2013, 7: 375–393. doi: 10.5194/tc-7-375-2013.
8. Burton-Johnson A., Dziadek R., Martin C. Review article: Geothermal heat flow in Antarctica: current and future directions. *The Cryosphere.* 2020, 14: 3843–3873. <https://doi.org/10.5194/tc-14-3843-2020>.

9. Jouzel J., Vaikmae R., Petit J.R., Martin M., Duclos Y., Stevenard M., Lorius C., Toots M., Melieres M.A., Burckle L.H., Barkov N.I., Kotlyakov V.M. The two-step shape and timing of the last deglaciation in Antarctica. *Clim. Dynamics*. 1995, 11: 151–161.
10. Ekaykin A.A., Bolshunov A.V., Lipenkov V.Ya., Scheinert M., Eberlein L., Brovko E., Popov S.V., Turkeev A.V. The first glaciological investigations at Ridge B, central East Antarctica. *Antarctic Science*. 2020. In review.
11. Skakun A.A., Lipenkov V.Ya., Parrenin F., Ritz C., Popov S.V. On the availability of old meteoric ice in the vicinity of Dome B, East Antarctica. *Geophys. Research. Abstracts*. 2019, 21: EGU2019–11315.
12. Tison J.-L., de Angelis M., Littot G., Wolff E., Fischer H., Hansson M., Bigler M., Udisti R., Wegner A., Jouzel J., Stenni B., Johnson S., Masson-Delmotte V., Landais A., Lipenkov V., Loulergue L., Barnola J.-M., Petit J.-R., Delmonte B., Dreyfus G., Dahl-Jensen D., Durand G., Bereiter B., Schilt A., Spahni R., Pol K., Lorrain R., Souchez R., Samyn D. Retrieving the paleoclimatic signal from the deeper part of the EPICA Dome C ice core. *The Cryosphere*. 2015, 9: 1633–1648. doi: 10.5194/tc-9-1633-2015.
13. Hobbs P.V. *Ice Physics*. Oxford: Clarendon Press., 1974: 804 p.
14. Slack G.A. Thermal conductivity of ice. *Physical Review B*. 1980, 22 (6): 3065–3071.
15. Bazin L., Landais A., Lemieux-Dudon B., Toyé Mahamadou Kele H., Veres D., Parrenin F., Martinerie P., Ritz C., Capron E., Lipenkov V., Loutre M.-F., Raynaud D., Vinther B., Svensson A., Rasmussen S.O., Severi M., Blunier T., Leuenberger M., Fischer H., Masson-Delmotte V., Chappellaz J., Wolff E. An optimized multi-proxy, multisite Antarctic ice and gas orbital chronology (AICC2012): 120–800 ka. *Clim. Past*. 2013, 9: 1715–1731.
16. Veres A.N., Ekaykin A.A., Lipenkov V.Ya., Turkeev A.V., Khodzer T.V. First data on the climate variability in the vicinity of Vostok Station (central Antarctica) over the past 2,000 years based on the study of a snow-firn core. *Problemy Arktiki i Antarktiki. Arctic and Antarctic Research*. 2020, 66 (4): 482–500. <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2020-66-4-482-500>. [In Russian].
17. 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*. Ed. T. Hondoh. Sapporo, Japan: Hokkaido University Press, 2009: 167–194.
18. Johnsen S.J. Stable isotope homogenization of polar firn and ice. *Isotopes and Impurities in Snow and Ice*. 1977, 118: 210–219.
19. Pol K., Masson-Delmotte V., Johnsen S., Bigler M., Cattani O., Durand G., Falourd S., Jouzel J., Minster B., Parrenin F., Ritz C., Steen-Larsen H.C. and B. Stenni. New MIS 19 EPICA Dome C high resolution deuterium data: Hints for a problematic preservation of climate variability at sub-millennial scale in the 'oldest ice'. *Earth and Planetary Science Letters*. 2010, 298: 95–103.
20. Lisiecki L.E., Raymo M.E. A Pliocene-Pleistocene stack of 57 globally distributed benthic $\delta^{18}\text{O}$ records. *Paleoceanography*. 2005, 20 (PA1003): 1–17. doi: 10.1029/2004PA001071.
21. Petit J.R., Jouzel J., Raynaud D., Barkov N.I., Barnola J.M., Basile I., Bender M., Chappellaz J., Davis M., Delaygue G., Delmotte M., Kotlyakov V.M., Legrand M., Lipenkov V.Y., Lorius C., Pepin L., Ritz C., Saltzman E., Stevenard M. Climate and atmospheric history of the past 420,000 years from the Vostok ice core, Antarctica. *Nature*. 1999, 399: 429–436.
22. Bereiter B., Fischer H., Schwander J., Stocker T.F. Diffusive equilibration of N_2 , O_2 and CO_2 mixing ratios in a 1.5-million-years-old ice core. *The Cryosphere*. 2014, 8: 245–256.