ГЛЯЦИОЛОГИЯ И КРИОЛОГИЯ

https://doi.org/10.30758/0555-2648-2020-66-4-482-500
УДК 551.583.7

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ ORIGINAL ARTICLE

ПЕРВЫЕ ДАННЫЕ О КЛИМАТИЧЕСКОЙ ИЗМЕНЧИВОСТИ В РАЙОНЕ СТ. ВОСТОК (ЦЕНТРАЛЬНАЯ АНТАРКТИДА) ЗА ПОСЛЕДНИЕ 2000 ЛЕТ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ИЗУЧЕНИЯ СНЕЖНО-ФИРНОВОГО КЕРНА

А.Н. ВЕРЕС[1, 2], А.А. ЕКАЙКИН[1, 2], В.Я. ЛИПЕНКОВ[1], А.В. ТУРКЕЕВ[1], Т.В. ХОДЖЕР[3]*

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

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

[3] — *Лимнологический институт Сибирского отделения Российской академии наук, Иркутск, Россия*

[*]*veres@aari.ru*

Резюме

Климатическая изменчивость в Восточной Антарктиде за последние 2000 лет мало изучена. Бурение и исследование, включая измерение электропроводности и изотопного состава, снежно-фирновых кернов, необходимы для реконструкции климата прошлого. Представлены первые результаты детального исследования образцов снежно-фирновых кернов из скважины VK16 глубиной 70 м, пробуренной на станции Восток (Центральная Антарктида), которые охватывают эпоху позднего голоцена (последние 2000 лет). Обсуждаются методика построения хроностратиграфической шкалы и ее погрешность, результаты измерения изотопного состава и их интерпретация, профиль плотности снежно-фирновой толщи. Реконструированы климатические условия (температура воздуха и скорость снегонакопления) в окрестностях станции Восток. Полученные результаты сравниваются с опубликованными палеоклиматическими реконструкциями.

Ключевые слова: Антарктида, датировка, керны, летопись вулканических событий, палеоклимат, плотность фирна, поздний голоцен, скорость снегонакопления, стабильные изотопы воды, станция Восток, температура воздуха.

Для цитирования: *Верес А.Н., Екайкин А.А., Липенков В.Я., Туркеев А.В., Ходжер Т.В.* Первые данные о климатической изменчивости в районе ст. Восток (Центральная Антарктида) за последние 2000 лет по результатам изучения снежно-фирнового керна // Проблемы Арктики и Антарктики. 2020. Т. 66. № 4. С. 482–500. https://doi.org/10.30758/0555-2648-2020-66-4-482-500.

Поступила 28.08.2020 **После переработки 16.10.2020** **Принята 26.10.2020**

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

ARINA N. VERES[1, 2], ALEXEY A. EKAYKIN[1, 2], VLADIMIR YA. LIPENKOV[1], ALEXEY V. TURKEEV[1], TAMARA V. KHODZER[3]*

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

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

[3] — *Limnological Institute of Siberian Branch of the Russian Academy of Science, Irkutsk, Russia*

[*]*veres@aari.ru*

Summary

Central Antarctica is characterized by a crucial lack of information on climate variability during the late Holocene. The study of firn cores obtained from the central part of the East Antarctic Ice Sheet is essential for the reconstruction of the paleoclimatic conditions at the continental and regional scales over the past 2,000 years (the Late Holocene). Based on glaciological and isotopic data from the shallow VK16 core drilled in the vicinity of Vostok Station over the periods of the 62th (2016–2017) and 63th (2017–2018) summer seasons of RAE, climatic characteristics have been reconstructed for the period 216 BC – 2010 AD. Studies of the VK16 core were carried out in two stages: firn density and electrical conductivity measurement (ECM), as well as sampling, was performed in the glaciological laboratory of the 5G drilling complex (Vostok Station) soon after the firn recovery, while the isotopic composition of the core samples was measured by a Picarro L-2120i laser analyzer in the Climate and Environmental Research Laboratory of AARI. In the ECM profile of the core, we discovered 14 absolute age markers (layers containing the products of known volcanic eruptions). These markers have allowed us to develop a robust chronostratigraphic scale for this core. We have shown that the main feature of the Late Holocene climate in this part of Antarctica is that the near-surface air temperature remained essentially constant throughout the whole time period under consideration. At the same time, the snow accumulation rate varied significantly around a mean value of 1.83 g cm^{-2} $year^{-1}$, while the last 200 years were characterized by the highest snow accumulation rate, equal to 2.08 g cm^{-2} $year^{-1}$. In this paper, we describe methods for studying firn cores, which can be useful for further research, and present first preliminary data on the climate variability in the vicinity of Vostok Station during the late Holocene.

Keywords: Antarctica, air temperature, firn dating, firn density, firn cores, inventory of volcanic events, Late Holocene, paleoclimate, snow accumulation rate, stable water isotopes, Vostok Station.

For Citation: *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.

Received 28.08.2020 **Revised 16.10.2020** **Accepted 26.10.2020**

ВВЕДЕНИЕ

Поздний голоцен (последние 2000 лет) — период относительно стабильного климата нашей планеты, который является фоном для современных антропогенных климатических изменений, начавшихся в середине XIX в. При этом охватывающие этот период данные распределены крайне неравномерно по континентам, а центральная область Восточной Антарктиды до сих пор остается огромным «белым пятном», поскольку она характеризуется чрезвычайно малым количеством информации. Это,

в свою очередь, сказывается на качестве палеоклиматических реконструкций для этого материка как в континентальном, там и в региональном масштабах. Таким образом, бурение скважин и изучение снежно-фирновых и ледяных кернов — основного источника палеоклиматической информации на полярных ледниках — являются одной из актуальных задач палеогляциологии Антарктиды. Координация международных усилий в области изучения фирновых и ледяных кернов и реконструкции климатических условий позднего голоцена в Антарктике осуществляется в рамках проектов CLIVASH2k [1] и IPICS2k [2], которые являются частью большого кластера проектов PAGES2k [3].

Реконструкция температурной истории Антарктиды в позднем голоцене детально описана в работах [4, 5]. В последней из них использовались результаты исследований только в 10 пунктах для построения сводного изотопного ряда для территории центральной части Восточной Антарктиды. Из них всего 5 рядов охватывают весь период позднего голоцена.

Данные по скорости снегонакопления в позднем голоцене практически отсутствуют [6]. Бóльшая часть (порядка 20) рядов скорости аккумуляции снега охватывает лишь последние 200 лет, еще 3 ряда покрывают 500 лет, а рядов, охватывающих последнее тысячелетие, до сих пор не было получено. Для станции Восток пока имеется лишь один сводный ряд по скорости снегонакопления с середины XVII в. до наших дней [7]. Ледяной керн, содержащий в себе информацию об изменении климатических условий на протяжении последних 420 тыс. лет. [8], имеет слишком низкое временнóе разрешение, которое не позволяет изучать климатическую изменчивость в масштабе сотен лет.

Для устранения этого пробела в палеоклиматических данных в центральной части Восточной Антарктиды нами была разработана программа “Vos2k”, которая заключается в бурении не менее трех мелких скважин глубиной до 70 м в окрестностях станции Восток, а также в последующем изучении полученных снежно-фирновых кернов. Глубина 70 м в этом районе соответствует возрасту фирна не менее 2000 лет [9]. Необходимость параллельного бурения трех скважин обоснована тем, что данные по одному керну не являются надежным фундаментом для реконструкции климатической изменчивости в Центральной Антарктиде по причине очень малого (порядка 0,1) отношения климатического сигнала к стратиграфическому шуму [7, 10]. Более того, бурение параллельных скважин позволит в будущем лучше изучить зависимость отношения сигнала к шуму от периода изучаемых климатических колебаний во временнóм масштабе от 10 лет до нескольких сотен лет.

Программа “Vos2k”, которая является российским вкладом в международный проект CLIVASH2k, включает в себя несколько этапов: 1) бурение мелких скважин; 2) предварительное полевое изучение и обработка кернов; 3) измерения изотопного и химического составов образцов в Лаборатории изменений климата и окружающей среды (ЛИКОС ААНИИ) и Лимнологическом институте СО РАН (г. Иркутск, Россия); 4) датирование снежно-фирновой толщи, изучение локальной изотопно-температурной зависимости и отношения сигнала к шуму в рядах изотопного состава и реконструкция прошлых изменений климата за последние 2000 лет.

На сегодняшний день в окрестностях станции Восток пробурены три мелкие скважины: VK16, VK18 и VK19. Поскольку на данный момент завершены исследования лишь первого из трех полученных кернов (VK16), представленные ниже

результаты следует считать предварительными. Цель нашего исследования — отработать методику палеоклиматической интерпретации результатов изучения фирновых кернов и получить первые сведения о климатической изменчивости в районе станции Восток за последние 2000 лет.

МЕТОДИКА И РЕЗУЛЬТАТЫ

Бурение мелкой скважины в окрестностях станции Восток

Скважина VK16 была забурена 24 декабря 2016 г. в ходе сезонных работ гляцио-бурового отряда 62-й РАЭ. Она расположена в чистом секторе в 2 км к западу от станции Восток (рис. 1).

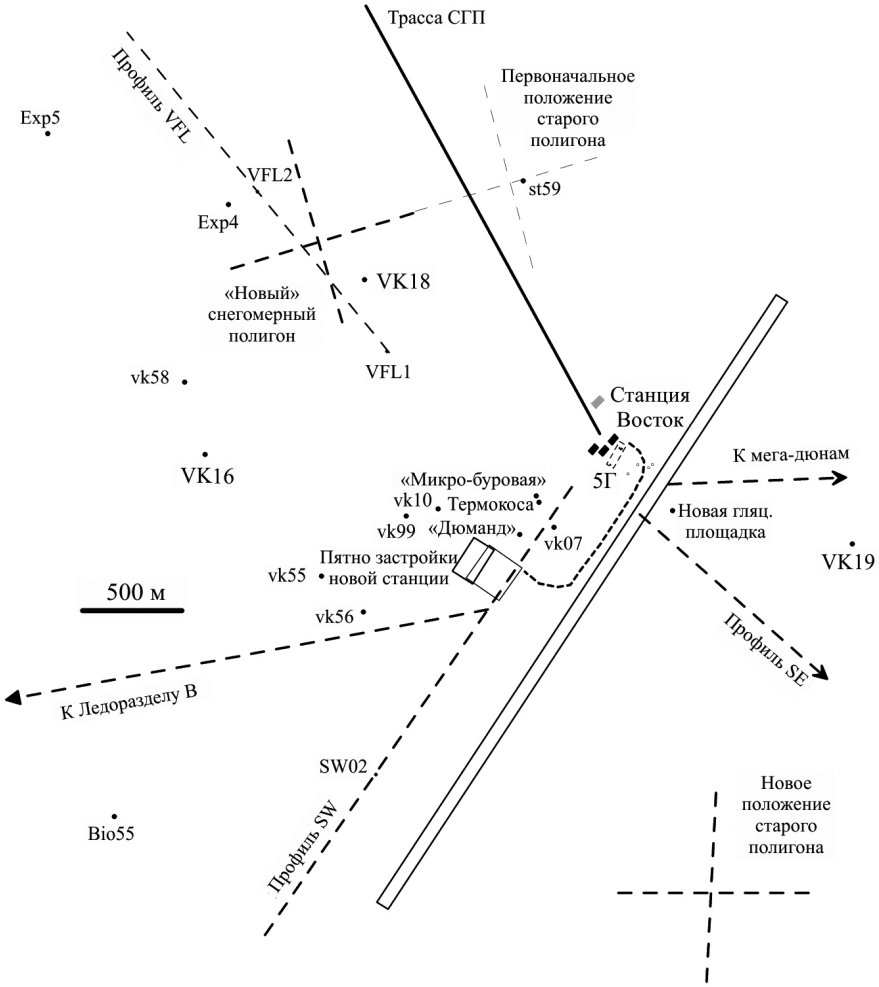

Рис. 1. Схема окрестностей станции Восток, показывающая положение основных гляциологических объектов, включая скважины VK16, VK18 и VK19

Fig. 1. A schematic map of Vostok station's vicinity showing the main glaciological objects including boreholes VK16, VK18 and VK19

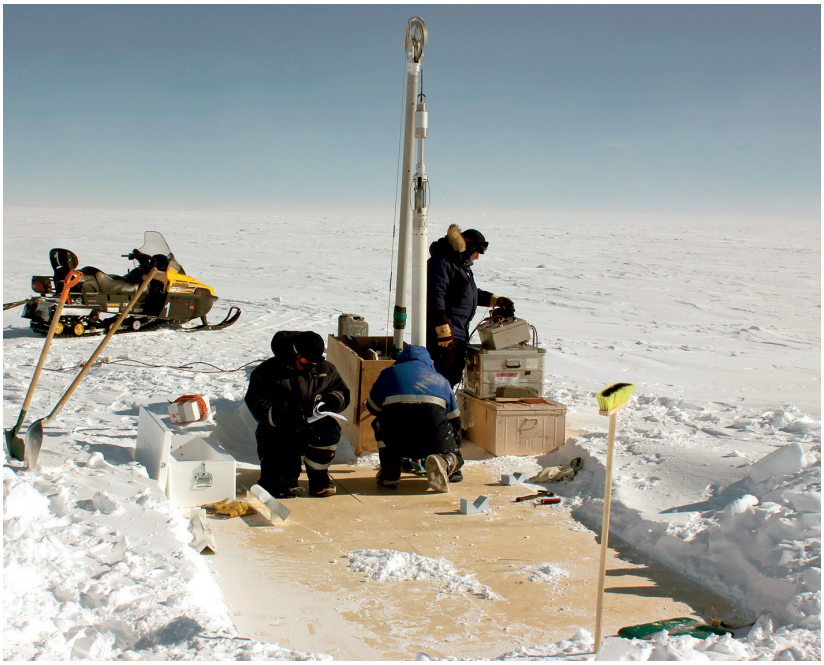

Рис. 2. Бурение скважины VK16

Fig. 2. Shallow VK16 hole drilling

Для бурения скважины в снегу и фирне использовалась легкая походная электромеханическая буровая установка «бур Пурше», характеристики которой оптимальны для проведения работ в полевых условиях Центральной Антарктиды: малый вес, быстрая сборка, легкая эксплуатация, питание от бензинового или дизельного генератора (220 В) (рис. 2).

Бурение было закончено 15 января 2018 г. в сезонный период 63-й РАЭ. Всего был выполнен 161 рейс, добыто 212 кернов, глубина скважины составила 70,2 м. Керны первых 10 м снежной толщи частично разрушились в процессе бурения из-за малой прочности ледяной породы. По этой причине в интервале глубин 0–6,5 м было утеряно 58 см керна, что составило около 9 % от общей длины этого интервала. Глубже 6,5 м выход керна составил 100 %.

Обработка снежно-фирновых кернов в гляциологической лаборатории бурового комплекса 5Г

Первоначальная обработка фирновых кернов в полевых условиях включает: 1) измерение длины керна и его привязку по глубине; 2) измерение плотности; 3) отбор проб на изотопный анализ; 4) непрерывное по всей длине керна измерение электропроводности ледяной породы (ECM — Electrical Conductivity Measurements).

Плотность определяется путем точного измерения длины, диаметра и веса каждого куска керна. Сумма ошибок измерения этих трех величин образует ошибку определения плотности. Для кернов из верхней части снежной толщи (0–5 м) ошибка плотности максимальна и может составлять до 0,05 г·см$^{-3}$ (при характерных значениях длины, диаметра и массы куска керна 20 ± 1 см, 5 ± 0,5 см и 200 ± 5 г соответственно). С глубиной ошибка быстро убывает и для кернов, поднятых из интервала

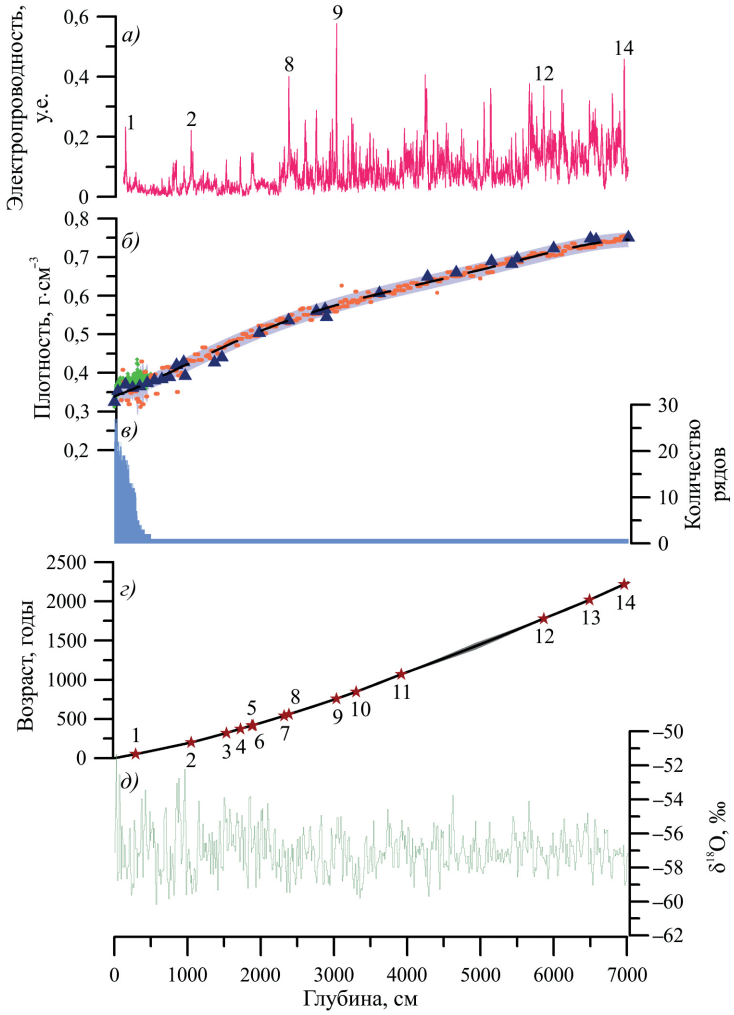

Рис. 3. Изменение основных характеристик керна VK16 по глубине:

а — электропроводность (ЕСМ). Подписаны некоторые из идентифицированных вулканических пиков (табл. 1); *б* — сводный профиль плотности. Синие треугольники — плотность по данным скважин 3Г и 4Г [12]; оранжевые точки — плотность по скважине VK16; зеленые точки — плотность по шурфам [11]; серая заливка — доверительный интервал (±2SEM); *в* — количество рядов, которые использованы для построения сводного профиля плотности; *г* — распределение возраста снежно-фирновых отложений по глубине. Звездочками показаны вулканические пики, которые были использованы для уточнения хроностратиграфической шкалы (см. табл. 1). Серой заливкой вокруг кривой показана ошибка датировки; *д* — профиль изотопного состава керна (концентрация кислорода 18)

Fig. 3. Variation of the main characteristics of the VK16 core as a function of depth:

a — electrical conductivity profile (ECM). Some of the identified markers of absolute age are labeled (table 1); *б* — density stack profile. The blue triangles are density data from the boreholes 3G and 4G [12]; orange points are density data from VK16; green points depict density data from the snow pits [11]; grey shading is the confidence interval (±2SEM); *в* — number of records which are used to build the stacked density profile; *г* — depth-age function. The red stars show the absolute age markers used for the improvement of the chronostratigraphic scale (table 1). The grey shading shows the uncertainty of age; *д* — isotopic profile (concentration of oxygen 18)

глубин 60–70 м, находится в пределах ±0,013 г·см$^{-3}$ (при значениях длины, диаметра и массы 40 ± 0,5 см, 7,5 ± 0,1 см и 1300 ± 5 г соответственно).

Результаты измерений плотности кернов VK16 до глубины 70,2 м представлены на рис. 3*б*.

Для построения сводного профиля плотности на рис. 3*б*, помимо данных скважины VK16, были использованы опубликованные данные по плотности снега в шурфах глубиной до 5 м, вскрытых в окрестностях станции Восток в период с 1980 по 2018 г. [11], а также данные по кернам глубоких скважин 3Г и 4Г [12].

В интервале глубин 0–89 см мы использовали только осредненные данные шурфов, поскольку 19 см керна в этом интервале утеряно, а уцелевшие керны могут иметь систематический сдвиг в сторону более высоких значений плотности. Количество шурфов, для которых имеются данные по плотности снега в интервале 0–89 см, варьирует от 18 до 27 (см. рис. 3*в*).

В интервале глубин 90–500 см для построения сводного профиля плотности использованы данные по шурфам и керну VK16. Количество использованных шурфов в этом интервале плавно снижается с глубиной от 18 в верхней части интервала до 1 глубже отметки 416 см.

С глубины 501 см профиль плотности строился исключительно по керну скважины VK16. Опубликованные данные плотности кернов 3Г и 4Г имеют слишком низкое разрешение по глубине, поэтому мы их не привлекали для построения сводного профиля плотности, но использовали для оценки погрешности измерений.

В целом измерения по шурфам, кернам VK16 и глубоким скважинам хорошо согласуются между собой в пределах ошибки измерения. Общая для всех данных аппроксимирующая функция наиболее точно описывается полиномом пятой степени:

$$\rho = -1{,}4\cdot10^{-19} H^5 + 2{,}49\cdot10^{-15} H^4 - 1{,}52\cdot10^{-11} H^3 + 3{,}13\cdot10^{-8} H^2 + 6{,}52\cdot10^{-15} H + 0{,}34,$$

где ρ — плотность в г·см$^{-3}$, а H — глубина в см.

Плотность плавно увеличивается с глубиной от 0,34 г·см$^{-3}$ в приповерхностном слое снега до 0,75 г·см$^{-3}$ на глубине 70 м. Вертикальный градиент плотности с глубиной постепенно уменьшается. На глубине около 22 м при плотности 0,54 г·см$^{-3}$ прослеживается перегиб, который соответствует переходу от снега к фирну.

Погрешность средних значений (SEM — Standard Error of Mean) плотности была оценена по формуле:

$$\mathrm{SEM} = \mathrm{STD}/n^{1/2},$$

где STD — среднее квадратическое отклонение значений плотности на данной глубине по измерениям в разных шурфах и кернах, а n — объем выборки (количество шурфов и кернов, по которым имеются значения плотности на данной глубине).

Глубже 500 см SEM = STD (поскольку доступны данные лишь по одному керну VK16), которое было определено путем сопоставления плотности керна VK16 и кернов 3Г и 4Г [12] на 23 отметках глубины, для которых имеются данные по глубоким кернам (см. рис. 3*б*).

Разброс значений плотности на данной глубине в разных точках обусловлен погрешностью измерения плотности (см. выше), а также естественной пространственной изменчивостью этого параметра в снежно-фирновой толще.

Верхние 3 м снежной толщи характеризуются большим естественным разбросом значений плотности, который характеризуется STD в пределах 0,02–0,06 г·см$^{-3}$. За счет большого количества данных, доступных для этого интервала, значение SEM

невелико и составляет порядка 0,01 г·см$^{-3}$. В интервале 3–5 м по мере постепенного уплотнения снежной толщи разброс значений плавно уменьшается до 0,01–0,02 г·см$^{-3}$. При этом количество данных о плотности также убывает, благодаря чему величина SEM остается почти неизменной. Наконец, для интервала глубже 5 м изменчивость значений плотности оценивается нами величиной порядка 0,009 г·см$^{-3}$. Интересно, что это значение ниже определенной нами погрешности определения плотности керна VK16 (0,013 г·см$^{-3}$) — это говорит о том, что реальная погрешность измерения плотности существенно меньше наших оценок.

Измерение электропроводности керна (ECM) проводится для обнаружения пиков, соответствующих слоям, которые содержат продукты вулканических извержений. Эта информация служит основой надежного датирования кернов. Измерение ECM проводится по зачищенной поверхности керна с помощью пары электродов, расположенных на небольшом (порядка 1 см) расстоянии друг от друга. Электроды, на которые подано постоянное напряжение 1000 В, движутся вдоль керна со скоростью порядка 1,4 см/с. На выходе замеряется сила тока, которая пропорциональна электропроводности керна. На основе полученных данных строится график распределения уровня сигнала ECM по глубине (рис. 3*а*), и выявляются пики, которые можно идентифицировать как вулканические, основываясь на опубликованных летописях вулканических извержений [13–16].

Уровень электропроводности керна постепенно растет с глубиной, что связано с ростом его плотности (см. рис. 3*а*, *б*). Одновременно растет и разброс значений относительно среднего.

Таблица 1

Список вулканических пиков, обнаруженных в записи ECM по кернам мелкой скважины VK16

Table 1

List of volcanic events recorded in the ECM profile of the VK16 cores over the last two millennia

№	Глубина, см	Датировка, годы CE	Снегонакопление между данным маркером и следующим, г·см$^{-2}$·год$^{-1}$	Атрибуция	Источник
1	293	1964	2,09	Агунг (1964)	[13, 14]
2	1050	1816	1,795	Тамбора (1816)	[13, 14]
3	1530	1696	1,7	Серуа (1696)	[13, 14]
4	1722	1642	1,9	Паркер + Десепшн (1642); Паркер (1641)	[14, 15]
5	1878	1601	1,78	Хуайнапутина (1601)	[13–15]
6	1895	1596	1,85	Невадо-дель-Руис (1595)	[15]
7	2321	1477	1,7	Вейдивотн (1477)	[15]
8	2383	1457	1,822	Куваэ (1453)	[13, 14]
9	3036	1258	1,758	Самалас (1258)	[14–16]
10	3301	1170	1,66	Неизвестный (1170)?	[13]
11	3918	946	1,817	Чанбайшань (946)?	[15]
12	5866	236	1,875	Таупо (236)	[15]
13	6490	–2	1,75	Неизвестный (-2)?	[13]
14	6963	–200	1,82	Неизвестный (-200)?	[13]

На записи ЕСМ (рис. 3*а*) отчетливо выделяются 27 пиков предположительно вулканического происхождения. Из них 14 были с той или иной степенью уверенности идентифицированы по литературным источникам как вулканические пики [13–16]. Список вулканических пиков представлен в табл. 1, в которой собрана краткая информация о каждом извержении.

Предложенную нами интерпретацию обнаруженных пиков ЕСМ (и, соответственно, датировку керна) следует считать предварительной. Окончательная атрибуция пиков будет осуществлена после завершения химических анализов керна, которые позволят определить концентрацию иона SO_4^{2-}, являющегося надежным маркером вулканического извержения. Также будет продолжено бурение других мелких скважин, по кернам которых будут выявляться вулканические события и проводиться кросс-датировка всех скважин.

Датирование снежно-фирновых кернов

Предварительная датировка снежно-фирновой толщи выполняется на основе экспериментального профиля плотности и имеющихся представлений о скорости снегонакопления в данном районе, а затем корректируется с учетом маркеров абсолютного возраста (вулканических пиков, см. табл. 1).

Датирование начинается с построения функции накопленной массы снега в зависимости от глубины по данным о плотности снежно-фирновой толщи. Затем предварительная шкала возраста строится из предположения о постоянной скорости снегонакопления (a = 2,1 г·см$^{-2}$·год$^{-1}$ [17]), при этом возраст на данной глубине равен отношению накопленной массы к a.

Полученный предварительный возраст снежно-фирновой толщи сравнивается с абсолютным возрастом на горизонтах, содержащих продукты извержений вулканов, возраст которых хорошо известен. Скорость накопления снега между известными вулканическими событиями корректируется таким образом, чтобы расчетный возраст снежно-фирновой толщи совпал с абсолютным возрастом, определенным по вулканическим событиям. Датировка керна (функция «глубина–возраст») представлена на рис. 3*г*.

Для надежной интерпретации временных рядов изотопного состава и других характеристик керна необходимо иметь представление о погрешности построенной нами хроностратиграфической шкалы.

Чтобы оценить эту погрешность, мы приняли допущение о том, что ошибка датирования линейно возрастает при удалении от ближайшего маркера абсолютного возраста. Для слоя, содержащего продукты извержений известного вулкана, ошибка минимальна и принята равной 3 года (эта величина связана с неопределенностью даты выпадения продуктов извержения в Антарктиде и, в некоторых случаях, с неопределенностью самой даты извержения). Максимальной же ошибка будет в слое снега, расположенном посередине между двумя соседними маркерами возраста. Зависимость ошибки датирования от расстояния до ближайшего маркера определялась по разработанному нами алгоритму, суть которого поясним на конкретном примере.

Допустим, у нас имеются три последовательно расположенных маркера абсолютного возраста, например: слой вулкана Агунг на глубине 293 см (возраст 53 года), слой Тамборы на глубине 1050 см (201 год) и слой вулкана Серуа на глубине 1530 см (321 год). Представим, что пик вулкана Тамбора отсутствует в записи.

В этом случае снег на глубине 1050 см будет датирован 1806-м годом, то есть ошибка датировки составит 10 лет. Расстояние от слоя Тамборы до ближайшего маркера (которым в данном случае является слой вулкана Серуа) по шкале времени составляет 120 лет. Иными словами, в данном случае расстоянию до маркера, равному 120 лет, соответствует ошибка датировки, равная 10 годам. Аналогичным образом мы последовательно «выключаем» один за другим все вулканические пики, фиксируя наблюдаемую ошибку датировки и расстояние до ближайшего маркера. Затем такая же операция повторяется для сценария, когда последовательно выключаются пары соседних пиков, затем тройки пиков и т. д. В результате мы получаем поле точек на диаграмме зависимости ошибки датирования от расстояния до маркера (рис. 4).

На рис. 4 хорошо видно, что в интервале значений расстояния до ближайшего маркера, равных от 0 до 200 лет, наблюдается ярко выраженный рост значений ошибки датировки. В качестве математического описания этой зависимости мы решили выбрать не уравнение линейной регрессии, а огибающую линию, располагающуюся выше всех точек диаграммы. В этом случае мы гарантированно получаем максимально возможную ошибку датирования.

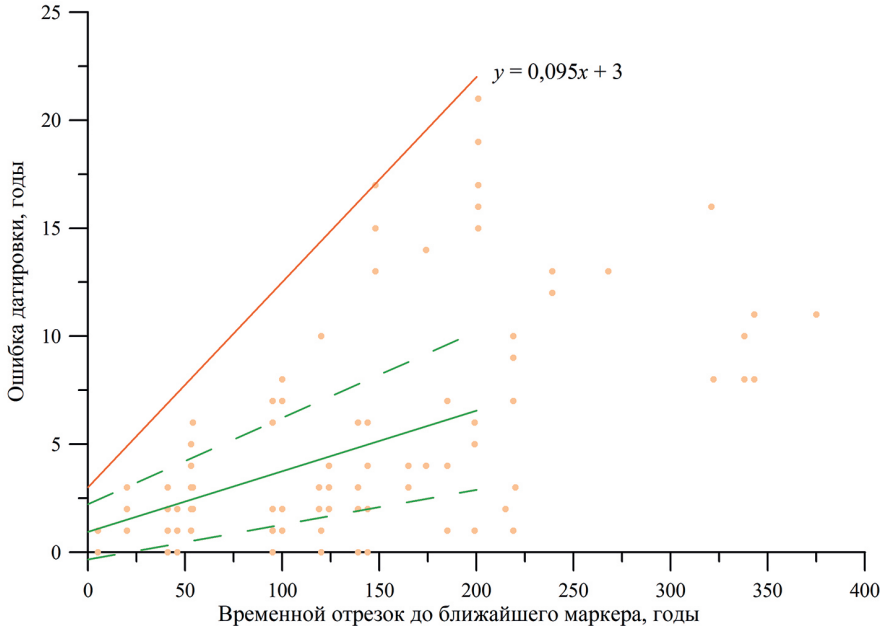

Рис. 4. Зависимость ошибки датирования от расстояния до ближайшего маркера абсолютного возраста для керна VK16.

Точки — отдельные значения ошибки. Зеленая линия — линейная аппроксимация для значений расстояния до ближайшего маркера, равных 0–200 лет. Пунктирные линии ограничивают доверительный интервал линии регрессии (±2σ). Оранжевая линия — зависимость ошибки от расстояния до ближайшего маркера, принятая для дальнейших расчетов в настоящей работе

Fig. 4. Error of dating as a function of the distance to the nearest absolute age marker in VK16 core.

The points are the individual error values. The solid green line is a linear approximation for the 0–200 years range of the distances to the nearest age marker. The dashed green lines show the confidence interval for the regression line (±2σ). The orange line is the error of dating vs distance to the closest age marker function assumed in this work for further calculations

Указанная зависимость представлена линейным уравнением:

$$y = 0{,}095x + 3.$$

Таким образом, ошибка датировки увеличивается примерно на 1 год при удалении от ближайшего маркера возраста на 10 лет, а для самих маркеров она равна 3 годам.

С помощью этой функции мы посчитали ошибку датирования для керна VK16 (см. рис. 3*г*, серая заливка). Для большей части керна ошибка не превышает 10–12 лет, а максимальное ее значение составляет 37 лет в 591 году на глубине 49,27 м. Большое значение ошибки на этой глубине связано с тем, что в интервале глубин 39,18–58,66 м отсутствуют надежно идентифицированные вулканические пики.

Изотопный состав снежно-фирновой толщи

Для отбора проб на изотопный анализ с боковой поверхности керна срезалась пластина толщиной 1 см. Пробоотбор осуществлялся непрерывно с разрешением 10 см (длина одной пробы по оси керна). Всего было отобрано 698 образцов, которые в замороженном виде были доставлены в ЛИКОС ААНИИ.

Измерения изотопного состава ($\delta^{18}O$ и δD) образцов фирна VK16 проводились на двух лазерных анализаторах — Picarro L2120-i и Picarro L2140-i — по разработанной нами методике [18]. Через каждые 5 проб измерялся рабочий стандарт VOS, изготовленный из поверхностного снега, который был отобран в окрестностях станции Восток и откалиброван относительно стандартов МАГАТЭ — VSMOW2, GISP и SLAP. Для контроля качества измерения часть образцов (10 % от общего количества) измерялась повторно. В общей сложности было измерено 697 проб керна VK16 (один образец утерян во время размораживания). Воспроизводимость результатов составила 0,05 ‰ для $\delta^{18}O$ и 0,33 ‰ для δD. Вертикальный профиль изотопного состава снежно-фирновой толщи по керну VK16 представлен на рис. 3*д*. Затем этот вертикальный профиль был преобразован во временной ряд изотопного состава на основе разработанной нами хроностратиграфической шкалы керна VK16.

ОБСУЖДЕНИЕ

Полученные нами результаты позволяют провести первую предварительную реконструкцию климатических условий (температуры воздуха и скорости снегонакопления) в районе станции Восток за последние 2000 лет. Окончательная реконструкция климата позднего голоцена будет выполнена после завершения исследований всех трех кернов — VK16, VK18, VK19.

Палеоклиматические реконструкции по данным снежно-фирновых и ледяных кернов основываются на представлении о том, что физические и геохимические характеристики льда отражают условия его формирования в прошлом. Известно, что изотопный состав твердых атмосферных осадков (относительная концентрация тяжелых изотопов водорода и кислорода) зависит от температуры конденсации влаги в атмосфере [19]. Использование этой зависимости для реконструкции приземной температуры воздуха в пункте бурения основывается на ряде допущений, а именно:

1) амплитуда климатических изменений в районе конденсации (в Центральной Антарктиде) была существенно больше по сравнению с климатическими изменениями в источнике влаги (в умеренных и тропических областях Южного полушария);

2) атмосферная циркуляция (траектории воздушных масс и интенсивность поступления влаги в Центральную Антарктиду) не претерпела фундаментальных изменений;

3) температура конденсации влаги менялась в тесной связи с приземной температурой воздуха;

4) тип осадкообразования и сезонный ход осадков также существенно не изменились;

5) интенсивность постдепозиционных процессов оставалась постоянной.

В тех случаях, когда речь идет об изучении глобальных климатических изменений, например тех, которые происходят в рамках стотысячелетнего климатического цикла, эти условия, по-видимому, не выполняются, поэтому интерпретация изотопных рядов в масштабах десятков тысяч лет представляет серьезные затруднения. Вместе с тем указанные допущения с большой долей вероятности приемлемы при реконструкции климатических условий позднего голоцена (современной эпохи), и, следовательно, в нашем случае можно предположить, что соотношение между изотопным составом отложенного снега и приземной температурой воздуха оставалось одинаковым на протяжении последних 2000 лет. Это предположение позволяет нам использовать данные о температуре, полученные на метеорологической площадке станции Восток, для расчета изотопно-температурного калибровочного коэффициента, который затем будет использоваться для реконструкции температуры воздуха за последние 2000 лет по данным изотопного состава снежно-фирновых кернов.

На рис. 5 показана связь между изотопным составом керна VK16 и средней годовой приземной температурой воздуха на станции Восток.

Для средних годовых значений в период 1958–2015 гг. коэффициент корреляции между изотопным составом и температурой составляет 0,16±0,14 (статистически незначим). Причиной такого результата может быть низкое отношение сигнала к шуму

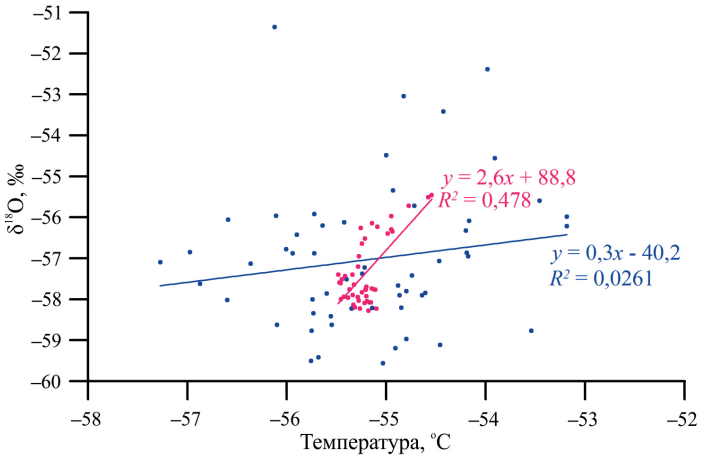

Рис. 5. Поле корреляции между изотопным составом снега по керну VK16 и приземной температурой воздуха на станции Восток.

Синие точки — поле корреляции между среднегодовыми значениями температуры воздуха и изотопного состава в период 1958–2015 гг. (n = 58). Розовые точки — скользящие средние за 15 лет на основе тех же данных (n = 44)

Fig. 5. Correlation field between the isotopic composition of the snow samples from VK16 and the surface air temperature at Vostok meteorological station.

The blue points are the annual mean air temperature data versus isotopic composition in 1958–2015 (n = 58). The pink points are the same data after 15-year running mean smoothing (n = 44)

в рядах изотопного состава. Для подавления шума мы сгладили оба ряда скользящим средним с периодом осреднения 15 лет. В этом случае коэффициент корреляции составляет 0,69±0,11 (значим). Отметим, что абсолютный размах колебаний приземной температуры воздуха в период 1958–2015 гг. составлял 4 °С, а после сглаживания уменьшился до 1 °С. Можно сделать вывод, что корреляция между изотопным составом и температурой объясняется исключительно трендом на потепление, который установился с 1992 г. и который сопровождается параллельным увеличением концентрации тяжелых изотопов в снегу (рис. 6*а*, 7).

Коэффициент регрессии для сглаженных рядов изотопного состава ($\delta^{18}O$) и приземной температуры воздуха составляет 2,6 ‰/°С и существенно превышает значение этого коэффициента, который предсказывается изотопной теорией и наблюдается в других регионах Антарктиды [20]. Это указывает на то, что либо амплитуда изменений температуры конденсации существенно больше амплитуды приземной температуры воздуха, что весьма маловероятно, либо на изотопный состав снега оказывают влияние другие факторы, помимо температуры конденсации. В работе [7] показано, что изотопный состав отложенного снега может быть теснее связан не со средней годовой, а с летней температурой, которая определяет интенсивность

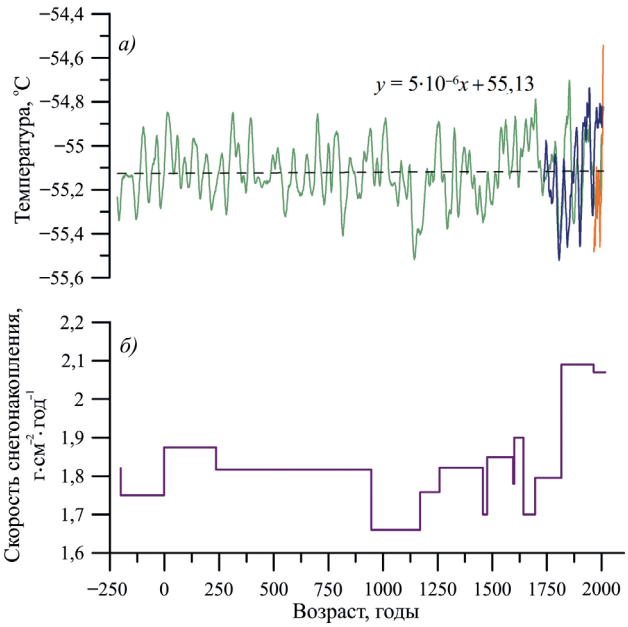

Рис. 6. Реконструированные климатические ряды по кернам VK16:

а — средние 15-летние значения приземной температуры воздуха в районе станции Восток: зеленая кривая — по данным кернов VK16, синяя кривая — по данным VRS13 [7], оранжевая кривая — инструментальные наблюдения на станции Восток; *б* — средняя скорость снегонакопления в интервалах времени между соседними маркерами абсолютного возраста (см. рис. 3*г* и табл. 1)

Fig. 6. Reconstructed climatic series from VK16 data:

a — 15-year running means of the surface temperature data in the vicinity of Vostok station; the green curve is the data derived from the VK16 core; the blue curve is the VRS13 data [7], the orange curve is the instrumental data from Vostok station; *б* — mean snow accumulation rate values over the time intervals between adjacent absolute age markers (fig. 3*г*, table 1)

постдепозиционных процессов, изменяющих первоначальный изотопный состав осадков и формирующих изотопный состав снежной толщи.

Обнаруженная связь между изотопным составом снежно-фирновой толщи и температурой воздуха позволяет нам использовать ее для реконструкции палеоклиматических условий за последние 2000 лет.

Изотопно-температурная калибровочная функция для рядов, представленных на рис. 5, выражается следующим уравнением:

$$\text{Температура} = 0{,}18 \cdot \delta^{18}\text{O} - 44{,}85.$$

С помощью этой функции мы реконструировали изменчивость приземной температуры воздуха за период с 216 г. до н. э. по 2010 г. н. э. в районе станции Восток по данным временного ряда изотопного состава (δ^{18}O) образцов фирна керна VK16 (см. рис. 6*а*).

Также на рис. 6*а* показан наиболее длинный из доступных на сегодняшний день сводных рядов температуры для станции Восток за последние 290 лет (ряд VRS13 [7]) и ряд инструментальных наблюдений на метеорологической площадке.

Полученные температурные ряды имеют значительное сходство. Так, ряды по VK16 и VRS13 относительно неплохо совпадают как по амплитуде температуры, так и по характеру временнóй изменчивости, с учетом наличия шума в данных VK16. Эти ряды воспроизводят минимумы 1806, 1900, 1960 гг. н. э. и максимумы 1830, 1890, 1915–1945 гг. н. э. (см. рис. 7). Данные с метеоплощадки и температура по VK16 показывают общий тренд на повышение с 1992 г. (см. рис. 7). Это указывает на то, что сглаженные изотопные данные, полученные даже по одному керну, могут быть использованы для реконструкции вековых климатических изменений в данном районе.

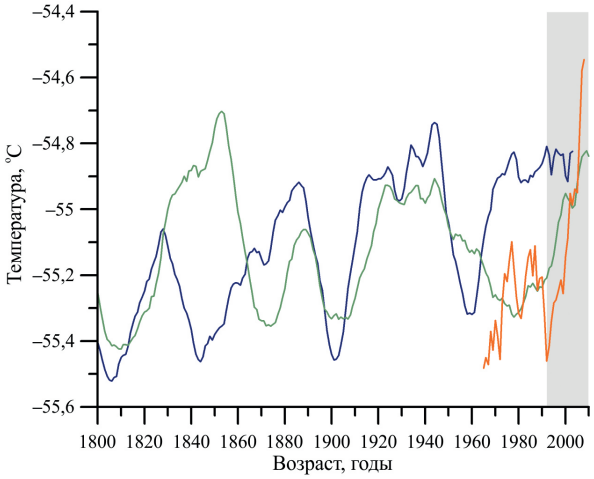

Рис. 7. Реконструированные ряды приземной температуры воздуха с XIX в.

Все линии — 15-летние скользящие средние приземной температуры воздуха в районе станции Восток: зеленая кривая — по данным кернов VK16, синяя кривая — по данным VRS13 [7], оранжевая кривая — инструментальные наблюдения на станции Восток. Серая заливка — температурный тренд с 1992 г.

Fig. 7. Reconstructed surface air temperature series since the early XIX century.

All the lines are the 15-year running means of the surface temperature data in the vicinity of Vostok station: the green curve represents data derived from the VK16 core, the blue curve is the VRS13 data [7], the orange curve represents instrumental data from Vostok station. The grey shading highlights the temperature trend since 1992

На протяжении всего 2000-летнего периода не наблюдается статистически значимых трендов температуры (см. рис. 6*а*). Если же взять последнее тысячелетие, то имеется тенденция к незначительному похолоданию. Этот результат противоречит выводам работы [5] о положительном тренде температуры в Антарктике за указанный период времени.

Впрочем, как было указано раннее, восточно-антарктическое плато является огромным белым пятном с точки зрения климатических данных за последние 2000 лет, поэтому сводные ряды, представленные в работе [5] имеют систематический сдвиг в сторону тех регионов, для которых эти данные были получены (Западная Антарктида и Земля Королевы Мод).

На следующих этапах работы нам предстоит изучить отношение сигнала к шуму в температурных рядах, а также сравнить полученные данные по VK16 с новыми температурными рядами VK18 и VK19.

Годовые значения скорости снегонакопления мы не смогли получить из-за невозможности идентификации годовых слоев в керне, но рассчитали среднюю скорость снегонакопления между известными вулканическими пиками, которые представлены в табл. 1. Результаты расчетов показаны на рис. 6*б*.

При реконструкции скорости снегонакопления по данным кернов следует учитывать две поправки: на адвекцию льда и на утончение годовых слоев.

Скорость движения льда в районе станции Восток составляет порядка 2 м/год, т. е. за 2000 лет ледник проходит около 4 км. На таком расстоянии скорость накопления снега меняется незначительно, поэтому поправкой на адвекцию льда можно пренебречь.

В верхней части ледника утончение слоя, связанное не с уплотнением снега, а с динамикой ледника, приблизительно равно отношению глубины слоя к мощности ледника в ледяном эквиваленте. Для скважины глубиной 70 м, что составляет порядка 44 м в ледяном эквиваленте, и мощности ледника около 3650 м утончение составляет порядка 1 %, которым также можно пренебречь.

По рис. 6*б* видно, что скорость снегонакопления менялась довольно существенно за последние 2000 лет. В целом за этот период времени скорость накопления снега постепенно росла, и последние 200 лет, возможно, являются эпохой наибольшей аккумуляции, среднее значение которой за период 1816–2016 гг. достигает 2,08 г·см$^{-2}$·год$^{-1}$. Этот вывод согласуется с результатами работ [6, 17].

Изучение прошлой изменчивости климата в районе станции Восток за последние 2000 лет будет продолжено на следующих этапах работы после завершения лабораторных анализов образцов кернов VK18 и VK19.

ВЫВОДЫ И ДАЛЬНЕЙШИЕ ПЛАНЫ

С целью реконструкции климатических условий в Центральной Антарктиде в период позднего голоцена (последние 2000 лет) нами были проведены непрерывные измерения изотопного состава (δD, $\delta^{18}O$) снежно-фирнового керна из скважины VK16, пробуренной на станции Восток до глубины 70,2 м. Измерения проводились с разрешением 10 см, общее количество образцов составило 697.

По результатам измерения плотности керна VK16 и опубликованным данным по шурфам и глубоким скважинам 3Г и 4Г построен сводный профиль плотности снежно-фирновой толщи до глубины 70,2 м.

В ходе анализа непрерывной записи электропроводности керна было выявлено 27 пиков, 14 из которых с большой долей вероятности соответствуют слоям фирна,

содержащим продукты известных вулканических извержений. Сводный профиль плотности керна и данные по глубине залегания осадков надежно датированных вулканических событий были использованы для построения хроностратиграфической шкалы снежно-фирновой толщи, отложенной в этом районе за последние 2250 лет.

Результаты проведенных анализов позволили нам провести реконструкцию климатических условий позднего голоцена в окрестностях станции Восток. Выяснено, что приземная температура воздуха на протяжении последних 2250 лет оставалась относительно стабильной и колебалась в пределах от –54,7 °С до –55,5 °С. Характер наблюдаемой изменчивости (последовательность минимумов и максимумов) подтверждается ранее опубликованными результатами реконструкции температуры для последних 290 лет [7].

Реконструкция средней скорости снегонакопления выполнялась для интервалов времени между маркерами абсолютного возраста (см. табл. 1). Скорость снегонакопления в первом тысячелетии незначительно колебалась вокруг значения 1,8 г·см$^{-2}$·год$^{-1}$, тогда как во втором тысячелетии начался слабый восходящий тренд, который привел к росту средней скорости аккумуляции снега до 1,83 г·см$^{-2}$·год$^{-1}$. Наибольшая скорость снегонакопления наблюдалась в последние 200 лет, когда среднее значение достигло 2,08 г·см$^{-2}$·год$^{-1}$. Этот вывод согласуется с результатами работ [6, 17].

В целом можно прийти к заключению, что использованные методики измерения и интерпретации данных позволяют получать надежную информацию о климатической изменчивости в прошлом и могут быть использованы при изучении кернов других мелких скважин, пробуренных в окрестностях станции Восток. Дальнейшие работы, направленные на реконструкцию изменений климата Центральной Антарктиды за последние 2000 лет, будут заключаться в следующем:

– расширение района исследований на область Ледораздела В и продолжение бурения скважины RB20 с отметки 20,5 м (бурение скважины RB20 в районе Купола В было начато в сезонный период 65-й РАЭ);

– полевые и лабораторные анализы образцов из скважин VK18, VK19 и вновь полученных снежно-фирновых кернов скважины RB20;

– уточнение хроностратиграфической шкалы, выполнение кросс-датировки всех скважин, построение сводных рядов изотопного состава и скорости снегонакопления за последние 2000 лет;

– изучение отношения сигнала к шуму по кернам всех скважин как функции от периода осреднения, уточнение методики извлечения климатического сигнала из рядов, сильно искаженных стратиграфическим шумом;

– исследование переходной функции «изотопный состав — температура воздуха» с учетом постдепозиционных изменений изотопного состава твердых атмосферных осадков в снежной толще;

– интерпретация данных по изотопному составу снега и реконструкция температуры воздуха в окрестностях станции Восток, а также условий в источнике влаги в позднем голоцене.

Конфликт интересов. Конфликт интересов отсутствует.

Финансирование. Работа выполнялась в рамках проекта 5.2 НИТР Росгидромета «Комплексные океанологические, климатические, гляциологические и геофизические исследования Антарктиды и Южного океана».

Благодарности. Авторы благодарят Российскую антарктическую экспедицию и ее начальника А.В. Клепикова за поддержку и логистическое обеспечение полевых

работ в районе станции Восток, а также сотрудников зимовочного состава 62-й РАЭ станции Восток Виталия Заровчатского и Максима Зюкова за помощь в проведении буровых работ на скважине VK16.

Competing interests. There are no competing interests.

Funding. This work is performed as part of the project 5.2 RTR of Roshydromet "Comprehensive oceanological, climatological, glaciological and geophysical studies of Antarctica and the Southern Ocean".

Acknowledgements. The authors are grateful to the administration of the Russian Antarctic Expedition (RAE) and its chief Klepikov A. V. for the logistical support of the glaciological program at Vostok Station, as well as to the participants of the 62th winter season for their assistance in the drilling work at the VK16 borehole, in particular V. Zarovchatsky and M. Zyukov.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Проект CLIVASH2k. URL: http://pastglobalchanges.org/ini/wg/2k-network/projects/clivash (дата обращения 01.08.2020)

2. Проект IPICS. URL: http://pastglobalchanges.org/science/end-aff/ipics/intro (дата обращения 01.08.2020)

3. Проект PAGES2k. URL: http://pastglobalchanges.org/science/wg/2k-network/intro (дата обращения 01.08.2020)

4. *Ahmed M., Anchukaitis K. J., Asrat A. et al.* Continental-scale temperature variability during the past two millennia // Nature geoscience. 2013. V. 6. № 5. P. 339–346.

5. *Stenni B., Curran M.A.J., Abram N.J., Orsi A., Goursaud S., Masson-Delmotte V., Neukom R., Goosse H., Divine D., van Ommen T., Steig E.J., Dixon D.A., Thomas E.R., Bertler N.A.N., Isaksson E., Ekaykin A., Werner M., Frezzotti M.* Antarctic climate variability on regional and continental scales over the last 2000 years // Climate of the Past. 2017. V. 13. P. 1609–1634.

6. *Thomas E.R., van Wessem J.M., Roberts J., Isaksson E., Schlosser E., Fudge T.J., Vallelonga P., Medley B., Lenaerts J., Bertler N., van den Broeke M.R., Dixon D.A., Frezzotti M., Stenni B., Curran M., Ekaykin A.A.* Regional Antarctic snow accumulation over the past 1000 years // Climate of the Past. 2017. V. 13. P. 1491–1513.

7. *Ekaykin A.A., Kozachek A.V., Lipenkov V.Ya., Shibaev Yu.A.* Multiple climate shifts in the Southern Hemisphere over the past three centuries based on central Antarctic snow pits and core studies // Annals of Glaciology. 2014. V. 55. № 66. P. 259–266.

8. *Petit J.R., Jouzel J., Raynaud D., Barkov N.I., Barnola J.-M., Basile I., Bender M., Chappellaz J., Davisk M., Delaygue G., Delmotte M., Kotlyakov V.M., Legrand M., Lipenkov V.Ya., Lorius C., Pe'pin L., Ritz C., Saltzmank E., Stievenard M.* Climate and atmospheric history of the past 420,000 years from the Vostok ice core, Antarctica // Nature. 1999. V. 399. № 6735. P. 429–436.

9. *Veres D., Bazin L., Landais A., Toye Mahamadou Kele H., Lemieux-Dudon B., Parrenin F., Martinerie P., Blayo E., Blunier T., Capron E., Chappellaz J., Rasmussen S.O., Severi M., Svensson A., Vinther B., Wolff E.W.* The Antarctic ice core chronology (AICC2012): an optimized multi-parameter and multi-site dating approach for the last 120 thousand years // Climate of the Past. 2013. V. 9. P. 1733–1748.

10. *Münch T., Kipfstuhl S., Freitag J., Meyer H., Laepple T.* Regional climate signal vs. local noise: a two-dimensional view of water isotopes in Antarctic firn at Kohnen Station, Dronning Maud Land // Climate of the Past. 2016. V. 12. P. 1565–1581.

11. *Екайкин А.А., Тебенькова Н.А., Липенков В.Я., Чихачев К.Б., Верес А.Н., Рихтер А.* Недооценка скорости снегонакопления в центральной части Антарктиды (станция Восток) по данным реечных наблюдений // Метеорология и гидрология. 2020. № 2. С. 114–125.

12. *Lipenkov V.Ya., Salamatin A.N., Duval P.* Bubbly-ice densification in ice sheets: II. Applications // Journal of Glaciology. 1997. V. 43. № 145. P. 397–407.

13. *Castellano E., Becagli S., Hansson M., Hutterli M., Petit J.R., Rampino M.R., Severi M., Steffensen J.P., Traversi R., Udisti R.* Holocene volcanic history as recorded in the sulfate stratigraphy of the European Project for Ice Coring in Antarctica Dome C (EDC96) ice core // Journal of Geophysical Research. 2005. V. 110. P. D06114. doi: 10.1029/2004JD005259.

14. *Osipov E.Y., Khodzher T.V., Golobokova L.P., Onischuk N.A., Lipenkov V.Ya., Ekaykin A.A., Shibaev Yu.A., Osipova O.P.* High-resolution 900 year volcanic and climatic record from the Vostok area, East Antarctica // The Cryosphere. 2014. V. 8. P. 843–851.

15. *Toohey M., Sigl M.* Volcanic stratospheric sulphur injections and aerosol optical depth from 500 BCE to 1900 CE // Earth System Science Data. 2017. V. 9. P. 809–831.

16. *Sigl M., Winstrup M., McConnell J.R., Welten K.C., Plunkett G., Ludlow F., Büntgen U., Caffee M., Chellman N., Dahl-Jensen D., Fischer H., Kipfstuhl S., Kostick C., Maselli O.J., Mekhaldi F., Mulvaney R., Muscheler R., Pasteris D.R., Pilcher J.R., Salzer M., Schüpbach S., Steffensen J.P., Vinther B.M., Woodruff T.E.* Timing and climate forcing of volcanic eruptions for the past 2,500 years // Nature. 2015. V. 523. P. 543–549.

17. *Ekaykin A.A., Lipenkov V.Ya., Kuzmina I.N., Petit J.R., Masson-Delmotte V., Johnsen S.J.* The changes in isotope composition and accumulation of snow at Vostok station, East Antarctica, over the past 200 years // Annals of Glaciology. 2004. V. 39. P. 569–575.

18. *Екайкин А.А.* Стабильные изотопы воды в гляциологии и палеогеографии / Ред. В.Я. Липенков. СПб.: ААНИИ, 2016. 64 с.

19. *Dansgaard W.* Stable isotopes in precipitation // Tellus. 1964. V. 16. № 4. P. 436–468.

20. *Stenni B., Scarchilli C., Masson-Delmotte V., Schlosser E., Ciardini V., Dreossi G., Grigioni P., Bonazza M., Cagnati A., Karlicek D., Risi C., Udisti R., Valt M.* Three-year monitoring of stable isotopes of precipitation at Concordia Station, East Antarctica // The Cryosphere. 2016. V. 10. P. 2415–2428.

REFERENCES

1. Project CLIVASH2k. Available at: http://pastglobalchanges.org/ini/wg/2k-network/projects/clivash (accessed 01.08.2020).

2. Project IPICS. Available at: http://pastglobalchanges.org/science/end-aff/ipics/intro (accessed 01.08.2020).

3. Project PAGES2k. Available at: http://pastglobalchanges.org/science/wg/2k-network/intro (accessed 01.08.2020).

4. *Ahmed M., Anchukaitis K. J., Asrat A. et al.* Continental-scale temperature variability during the past two millennia. Nature geoscience. 2013, 6 (5): 339–346.

5. *Stenni B., Curran M.A.J., Abram N.J., Orsi A., Goursaud S., Masson-Delmotte V., Neukom R., Goosse H., Divine D., van Ommen T., Steig E.J., Dixon D.A., Thomas E.R., Bertler N.A.N., Isaksson E., Ekaykin A., Werner M., Frezzotti M.* Antarctic climate variability on regional and continental scales over the last 2000 years. Climate of the Past. 2017, 13: 1609–1634.

6. *Thomas E.R., van Wessem J.M., Roberts J., Isaksson E., Schlosser E., Fudge T.J., Vallelonga P., Medley B., Lenaerts J., Bertler N., van den Broeke M.R., Dixon D.A., Frezzotti M., Stenni B., Curran M., Ekaykin A.A.* Regional Antarctic snow accumulation over the past 1000 years. Climate of the Past. 2017, 13: 1491–1513.

7. *Ekaykin A.A., Kozachek A.V., Lipenkov V.Ya., Shibaev Yu.A.* Multiple climate shifts in the Southern Hemisphere over the past three centuries based on central Antarctic snow pits and core studies. Annals of Glaciology. 2014, 55 (66): 259–266.

8. *Petit J.R., Jouzel J., Raynaud D., Barkov N.I., Barnola J.-M., Basile I., Bender M., Chappellaz J., Davisk M., Delaygue G., Delmotte M., Kotlyakov V.M., Legrand M., Lipenkov V.Ya., Lorius C., Pe'pin L., Ritz C., Saltzmank E., Stievenard M.* Climate and atmospheric history of the past 420,000 years from the Vostok ice core, Antarctica. Nature. 1999, 399 (6735): 429–436.

9. *Veres D., Bazin L., Landais A., Toye Mahamadou Kele H., Lemieux-Dudon B., Parrenin F., Martinerie P., Blayo E., Blunier T., Capron E., Chappellaz J., Rasmussen S.O., Severi M., Svensson A., Vinther B., Wolff E.W.* The Antarctic ice core chronology (AICC2012): an optimized multi-parameter and multi-site dating approach for the last 120 thousand years. Climate of the Past. 2013, 9: 1733–1748.

10. *Münch T., Kipfstuhl S., Freitag J., Meyer H., Laepple T.* Regional climate signal vs. local noise: a two-dimensional view of water isotopes in Antarctic firn at Kohnen Station, Dronning Maud Land. Climate of the Past. 2016, 12: 1565–1581.

11. *Ekaykin A.A., Teben'kova N.A., Lipenkov V.Ya., Tchikhachev K.B., Veres A.N., Richter A.* Underestimation of snow accumulation rate in Central Antarctica (Vostok Station) derived from stake measurements. *Meteorologiia i gidrologiia*. Meteorology and Hydrology. 2020, 2: 114–125. [In Russian].

12. *Lipenkov V.Ya., Salamatin A.N., Duval P.* Bubbly-ice densification in ice sheets: II. Applications. Journal of Glaciology. 1997, 43 (145): 397–407.

13. *Castellano E., Becagli S., Hansson M., Hutterli M., Petit J.R., Rampino M.R., Severi M., Steffensen J.P., Traversi R., Udisti R.* Holocene volcanic history as recorded in the sulfate stratigraphy of the European Project for Ice Coring in Antarctica Dome C (EDC96) ice core. Journal of Geophysical Research. 2005, 110: D06114. doi: 10.1029/2004JD005259.

14. *Osipov E.Y., Khodzher T.V., Golobokova L.P., Onischuk N.A., Lipenkov V.Ya., Ekaykin A.A., Shibaev Yu.A., Osipova O.P.* High-resolution 900 year volcanic and climatic record from the Vostok area, East Antarctica. The Cryosphere. 2014, 8: 843–851.

15. *Toohey M., Sigl M.* Volcanic stratospheric sulphur injections and aerosol optical depth from 500 BCE to 1900 CE. Earth System Science Data. 2017, 9: 809–831.

16. *Sigl M., Winstrup M., McConnell J.R., Welten K.C., Plunkett G., Ludlow F., Büntgen U., Caffee M., Chellman N., Dahl-Jensen D., Fischer H., Kipfstuhl S., Kostick C., Maselli O.J., Mekhaldi F., Mulvaney R., Muscheler R., Pasteris D.R., Pilcher J.R., Salzer M., Schüpbach S., Steffensen J.P., Vinther B.M., Woodruff T.E.* Timing and climate forcing of volcanic eruptions for the past 2,500 years. Nature. 2015, 523 (7562): 543–549.

17. *Ekaykin A.A., Lipenkov V.Ya., Kuzmina I.N., Petit J.R., Masson-Delmotte V., Johnsen S.J.* The changes in isotope composition and accumulation of snow at Vostok station, East Antarctica, over the past 200 years. Annals of Glaciology. 2004, 39: 569–575.

18. *Ekaykin A.A. Stabil'nye izotopy vody v gliatsiologii i paleogeografii.* Stable isotopes of water in glaciology and palaeogeography. St. Petersburg: Arctic and Antarctic Research Institute, 2016: 64 p. [In Russian].

19. *Dansgaard W.* Stable isotopes in precipitation. Tellus. 1964, 16 (4): 436–468.

20. *Stenni B., Scarchilli C., Masson-Delmotte V., Schlosser E., Ciardini V., Dreossi G., Grigioni P., Bonazza M., Cagnati A., Karlicek D., Risi C., Udisti R., Valt M.* Three-year monitoring of stable isotopes of precipitation at Concordia Station, East Antarctica. The Cryosphere. 2016, 10: 2415–2428.