

ГЛЯЦИОЛОГИЯ И КРИОЛОГИЯ

УДК 551.583.2

DOI: 10.30758/0555-2648-2019-65-1-46-62

ПРОСТРАНСТВЕННАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ ИЗОТОПНОГО СОСТАВА И СКОРОСТИ НАКОПЛЕНИЯ СНЕГА НА СНЕГОМЕРНОМ ПОЛИГОНЕ СТАНЦИИ ВОСТОК (ЦЕНТРАЛЬНАЯ АНТАРКТИДА)

А.А. ЕКАЙКИН^{1,2*}, Д.О. ВЛАДИМИРОВА¹, Н.А. ТЕБЕНЬКОВА², Е.В. БРОВКОВ³,
А.Н. ВЕРЕС^{1,2}, А.В. КОВЯЗИН³, А.В. КОЗАЧЕК¹, М. ЛИНДРЕН⁴, Ю.А. ШИБАЕВ¹,
А.В. ПРЕОБРАЖЕНСКАЯ¹, В.Я. ЛИПЕНКОВ¹

¹ — ГИЦ РФ Арктический и антарктический научно-исследовательский институт, Санкт-Петербург, Россия

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

³ — АО «Аэрогеодезия», Санкт-Петербург, Россия

⁴ — Дрезденский технический университет, г. Дрезден, ФРГ

*ekaykin@aari.ru

SPATIAL VARIABILITY OF SNOW ISOTOPIC COMPOSITION AND ACCUMULATION RATE AT THE STAKE FARM OF VOSTOK STATION (CENTRAL ANTARCTICA)

A.A. EKAYKIN^{1,2*}, D.O. VLADIMIROVA¹, N.A. TEBENKOVA², E.V. BROVKOV³,
A.N. VERES^{1,2}, A.V. KOVYAZIN³, A.V. KOZACHEK¹, M. LINDREN⁴, Yu.A. SHIBAEV¹,
A.V. PREOBRAZHENSAYA¹, V.Ya. LIPENKOV¹

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 — Aerogeodesia, St. Petersburg, Russia

⁴ — Dresden Technical University, Dresden, Germany

*ekaykin@aari.ru

Received December, 10, 2018

Accepted February, 11, 2019

Keywords: Antarctica, mesodunes, snow accumulation, spatial variability, stable water isotopes, Vostok station.

Citation: Ekaykin A.A., Vladimirova D.O., Tebenkova N.A., Brovkov E.V., Veres A.N., Kovyazin A.V., Kozachek A.V., Lindren M., Shibaev Yu.A. Preobrazhenskaya A.V., Lipenkov V.Ya. Spatial variability of snow isotopic composition and accumulation rate at the stake farm of Vostok station (Central Antarctica). *Problemy Arktiki i Antarktiki*. Arctic and Antarctic Research. 2019, 65, 1: 46–62. [In Russian]. doi: 10.30758/0555-2648-2019-65-1-46-62.

Summary

The knowledge of the spatial distribution of the snow accumulation rate and isotopic composition in different scales, from local to continental, over the Antarctic Ice Sheet is critically important for the interpretation of the paleoclimate data obtained from deep ice cores, for correct assessment of the ice sheet mass balance, etc. With this in mind, we have synthesized geodetic, glaciological and geochemical data collected in the vicinity of central Antarctic Vostok station in 1970–2017 in order to shed light on the processes governing the spatial distribution of snow isotopic composition and accumulation rate in the spatial scale from 100 to 1000 m. First, we have discovered that snow surface height and snow accumulation rate field are strongly affected by the influence of the logistic convoy route annually operating between Russian Antarctic stations Vostok and Progress. This influence is detectable up to 1 km leeward from the route. At the same time the isotopic composition of the upper 10 cm of the snow does not show any anomalies in the vicinity of the route. This is an unexpected result, because large anomalies of the ice sheet surface (e.g., megadunes) are known to affect the snow isotopic composition. Second, in the undisturbed part of the snow surface near Vostok station we have discovered quasi-periodic (with the wavelength of about 400 m) low-amplitude variations of the surface height that are covariant with the corresponding waves in snow accumulation and isotopic composition. We suggest that spatial variability of the snow isotopic composition is due to the different ratio of summer and winter precipitation deposited in different locations, as evident from a strong negative correlation between δD and dxs parameters. The results of this study may explain the nature of the low-frequency noise (with the time-scale from decades to centuries) observed in the climate records obtained from shallow and deep ice cores in central Antarctica.

Поступила 10 декабря 2018 г.

Принята к печати 11 февраля 2019 г.

Ключевые слова: Антарктида, изотопный состав, мезодюны, пространственная изменчивость, снегонакопление, станция Восток.

Изучение пространственного распределения скорости накопления и изотопного состава снега в различных масштабах на поверхности антарктического ледяного покрова критически важно для интерпретации палеоклиматических данных по глубоким ледяным кернам, для корректной оценки баланса массы ледяного щита и т.д. Впервые на основании большого объема геодезических, гляциологических и геохимических данных была детально изучена пространственная изменчивость изотопного состава и скорости накопления снега в районе станции Восток (Центральная Антарктида) в пространственном масштабе от 100 до 1000 м. Показано, что высота снежной поверхности и скорость накопления снега изученной территории существенно преобразованы влиянием проходящей здесь трассы санно-гусеничных походов между станциями Восток и Прогресс. В ненарушенной части данной территории выявлены квазипериодические колебания высоты поверхности с горизонтальными размерами порядка 400 м («мезодюны») и ассоциированные с ними аномалии изотопного состава и скорости накопления снега. Полученные результаты могут прояснить природу низкочастотного шума, наблюдаемого в климатических рядах, полученных по антарктическим ледяным кернам.

ВВЕДЕНИЕ

Изотопный состав (концентрация стабильных изотопов водорода и кислорода) и скорость накопления снега полярных ледяных щитов являются одними из важнейших гляциоклиматических показателей. Изотопный состав осадков — производная их температурной истории [1], и в этом качестве «палеотермометра» широко используется в палеоклиматологии при интерпретации данных глубоких ледяных кернов [2]. Скорость снегонакопления — одна из двух (наряду с абляцией) составляющих баланса массы ледяных щитов нашей планеты, уменьшение объема льда которых является основным фактором, влияющим на повышение уровня моря в начале XXI в. [3, 4].

Изучение пространственной изменчивости изотопного состава и скорости накопления снега в различных пространственных масштабах является, таким образом, одной из актуальных задач современной гляциоклиматологии. Разный пространственный масштаб исследований направлен на решение различных задач. Так, изучение распределения характеристик снежного покрова в континентальном масштабе призвано выявить общие географические закономерности, отвечающие за формирование снежной толщи. Тогда как для интерпретации данных, полученных по отдельно взятому ледяному керну, требуется детальное знание изменчивости свойств снежного покрова в масштабе от локального (1–10 м) до регионального (10–100 км).

Мировой опыт изучения пространственных вариаций характеристик снежного покрова в Центральной Антарктиде в интересующем нас масштабе (100–1000 м) крайне мал, что объясняется очевидными логистическими трудностями. Возможно, единственным исследованием подобного рода была работа [5], авторы которой показали наличие квазипериодических волн на поверхности снежного покрова в районе станции Восток с горизонтальными размерами порядка 200–300 м («мезодюн»), проявляющихся в аномалиях скорости снегонакопления и изотопного состава снега.

В более мелком масштабе (< 100 м) пространственное распределение изотопного состава снега в районе станции Конен было изучено в работе [6]. Показано, что в масштабе 10–100 м изотопный состав поверхностного снега характеризуется большой изменчивостью, имеющей случайный характер («стратиграфический шум»). В районах с низкой скоростью снегонакопления (< 64 мм в.э./год) дисперсия шума существенно превышает дисперсию сигнала, что делает практически невозможным изучение климатической изменчивости в масштабе лет и даже десятилетий по данным лишь одного шурфа или керна (см. также [7–9]).

В более крупном масштабе (> 1 км) представляет интерес изучение «мегадюн». В частности, показана связь между высотой снежной поверхности и аномалиями снегонакопления и между аномалиями снегонакопления и аномалиями изотопного состава снега [10, 11].

В этой работе мы используем синтез геодезических, гляциологических и геохимических данных, собранных на снегомерном полигоне ст. Восток (Восточная Антарктида) начиная с января 1970 г. для детального исследования пространственной изменчивости изотопного состава и скорости накопления снега в масштабе от 100 до 1000 м. Мелкомасштабная (случайная) изменчивость, а также временные вариации этих параметров будут представлены в других работах.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Скорость снегонакопления

Снегомерные наблюдения в районе станции Восток ведутся непрерывно по единой методике начиная с января 1970 г. [12]. В декабре 1998 г. к западу от старого снегомерного полигона был поставлен новый, и с тех пор наблюдения на них ведутся параллельно. Всего на обоих снегомерных полигонах насчитывается 158 вех, расставленных на расстоянии 25 м друг от друга в виде трех профилей. Общая площадь полигона составляет 2 км² (рис. 1). Накопление снега за год вычисляется как произведение осредненного по полигону прироста высоты снежной поверхности (средней разности высоты вех в декабре нынешнего и декабре предыдущего года) на осредненное по полигону значение декабрьской плотности снежного покрова. В настоящей работе нас интересуют значения прироста высоты снежного покрова

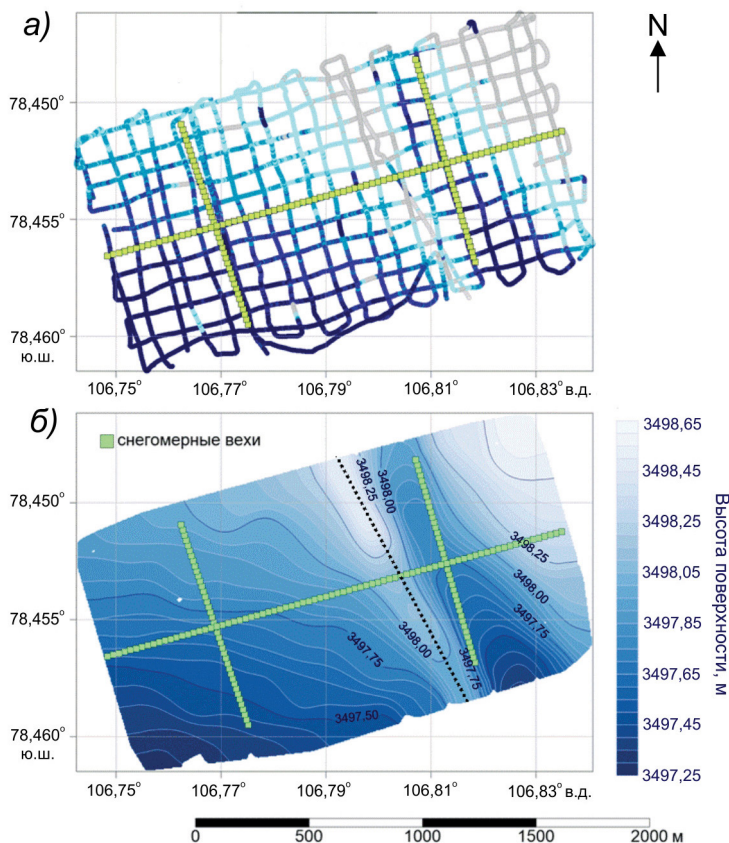


Рис. 1. Пространственная изменчивость высоты поверхности ледника в районе снегомерного полигона станции Восток:

a — исходные данные. Цветными линиями показаны маршруты геодезической съемки, цвет соответствует измеренной в данной точке маршрута высоте поверхности согласно легенде; *б* — карта высоты поверхности, построенная с применением методики пространственного сглаживания (см. текст). Черным пунктиром показано положение трассы транспортных походов Восток — Прогресс. Светло-зелеными точками на обоих рисунках показано расположение вех снегомерного полигона. Восточная и западная половины полигона упоминаются в тексте как «старый» и «новый» снегомерный полигоны

Fig. 1. Spatial variability of the glacier altitude in the vicinity of the accumulation stake farm at Vostok station:

a — the original data. The colored lines show the route of the geodetic survey, and the color relates to the altitude measured in the corresponding points of the route, according to the legend; *б* — the map of the altitude drawn based on the data given in Fig. 1a, and using the technique of the spatial smoothing (see the text). Black dashed line is the route of the transport convoys between Vostok and Progress stations. Light green squares at the both maps show the stakes of the accumulation-stake farm. East and West halves of the stake farm are correspondingly mentioned in the text as “old” and “new” farms,

на отдельных вехах, которые сравниваются с данными о высоте снежной поверхности и об изотопном составе поверхностного слоя снега.

Высота поверхности

Рельеф снежной поверхности в районе снегомерного полигона был впервые детально изучен в декабре 1999 г. (сезон 45-й Российской антарктической экспе-

диции — РАЭ), когда с помощью оптического нивелира AN2 нами было измерено превышение высоты поверхности снега возле каждой снегомерной вехи относительно первой вехи старого полигона. По нашей оценке, случайная погрешность определения разности высот между двумя соседними вехами не превышает 1 мм, что на порядок меньше естественной изменчивости высоты снежного покрова.

В сезонный период 60-й РАЭ (январь 2015 г.) нами была выполнена площадная кинематическая GPS-съемка обоих снегомерных полигонов (рис. 1а) с использованием снегохода. Расстояние между профилями составило 100 м, общая длина маршрутов — около 40 км. Измерения абсолютной высоты поверхности проводились каждую секунду, что при средней скорости движения около 13 км/ч дает пространственное разрешение, равное 3,6 м. Общее количество точек наблюдения, таким образом, составило порядка 11 тысяч. Случайная погрешность единичного измерения — около 10–15 см. Полученные данные были обработаны с помощью программы Golden Software Surfer. С целью устранения случайных ошибок измерений была применена методика пространственного сглаживания. Радиус осреднения был выбран равным 1 км, при этом вес каждой точки при вычислении среднего взвешенного значения высоты поверхности обратно пропорционален квадрату расстояния до той точки, для которой выполняется расчет высоты. Этот метод позволяет эффективно убирать случайные шумы без существенной потери информации о мелкомасштабной (т.е. имеющей характерные размеры порядка 100 м) пространственной изменчивости рельефа снежной поверхности.

В результате была составлена цифровая модель рельефа поверхности для территории снегомерного полигона (рис. 1б).

Отбор проб поверхностного снега

В январе 2000 г. (сезон 45-й РАЭ) возле каждой вехи старого снегомерного полигона нами была отобрана проба поверхностного (0–10 см) снега для последующего измерения изотопного состава. В январе 2007 г. (сезон 52-й РАЭ) этот пробоотбор был повторен аналогичным образом. В сезон 55-й РАЭ (январь 2010 г.) поверхностные 10-сантиметровые пробы были отобраны возле каждой пятой вехи обоих снегомерных полигонов. Наконец, в сезон 62-й РАЭ (январь 2017 г.) поверхностные 10-сантиметровые пробы снега были отобраны возле каждой вехи обоих снегомерных полигонов.

Все пробы хранились в замороженном виде в герметично закрытых контейнерах вплоть до момента лабораторного анализа во избежание изменения их изотопного состава.

Лабораторные измерения изотопного состава снега

Изотопный состав снега (концентрация атомов D и ^{18}O), как правило, выражается в промилле относительно общепринятого изотопного стандарта VSMOW-2:

$$\delta(\text{‰}) = \frac{R_{SA} - R_{ST}}{R_{ST}} \times 1000,$$

где R_{SA} — концентрация тяжелых атомов в образце, а R_{ST} — их концентрация в стандарте (155 ppm для D и 2005 ppm для ^{18}O).

Образцы 45-й РАЭ измерялись в Лаборатории изменений климата и окружающей среды (LSCE, г. Сакле, Франция) — ^{18}O и D, и в институте Нильса Бора университета Копенгагена (Дания) — ^{18}O . Для выполнения изотопных измерений использовался масс-спектрометрический метод. Случайная погрешность измерения составила 0,05 ‰ для $\delta^{18}\text{O}$ и 0,8 ‰ для δD .

Образцы 52-й РАЭ измерялись в Таллинском геологическом институте с помощью масс-спектрометрии. Определялась только концентрация ^{18}O , случайная погрешность измерения составила 0,05 %.

Образцы 55-й и 62-й РАЭ измерялись в Лаборатории изменений климата и окружающей среды (ЛИКОС) ААНИИ на лазерных анализаторах Picarro L2120 и L2140. Через каждые 5 образцов выполнялось измерение рабочего стандарта VOS, изготовленного из современного поверхностного снега, собранного в окрестностях станции Восток и калиброванного относительно стандартов МАГАТЭ VSMOW-2, GISP и SLAP. Воспроизводимость результатов, оцененная посредством повторного измерения 10 % случайно выбранных образцов, составила 0,05 ‰ для $\delta^{18}\text{O}$ и 0,5 ‰ для δD .

Во всех случаях погрешность измерения изотопного состава на 1–2 порядка меньше естественной изменчивости этого параметра, то есть удовлетворительна для целей настоящего исследования.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Рельеф снежной поверхности в районе снегомерного полигона

На рис. 1б представлена карта высоты поверхности ледника для района снегомерного полигона ст. Восток. В пределах полигона высота поверхности меняется на 1,45 м от 3497,10 м до 3498,55 м с юго-запада на северо-восток. Средний наклон поверхности составляет 0,65 м/км, что соответствует наклону поверхности ледника в этой части подледникового озера Восток [13].

В западной части закартированной территории («новый снегомерный полигон») поверхность снега исключительно ровная, отсутствуют какие-либо формы рельефа с горизонтальными размерами > 100 м и/или с амплитудой высоты > 5 см. В то же время в восточной части территории («старый снегомерный полигон») обнаруживается аномалия высоты поверхности, простирающаяся с северо-северо-запада на юго-юго-восток. Аномалия состоит из гребня, возвышающегося над окружающей равниной на высоту до 1 м, и расположенной с подветренной (восточной) стороны от него ложбины глубиной 60–80 см.

Ось гребня точно совпадает с трассой санно-гусеничных походов со станции Восток на станцию Прогресс (рис. 1б). В период с 1957 по 2009 г. этот участок трассы также использовался для транспортных походов между станциями Восток и Мирный. С большой степенью уверенности можно утверждать, что существование указанной аномалии напрямую связано с расположением здесь трассы транспортных походов. Возвышение трассы над окружающим рельефом обусловлено уплотнением снега гусеницами и полозьями саней, вследствие чего поверхность снега оказывается меньше подверженной ветровой эрозии. Ниже мы рассмотрим влияние этой аномалии рельефа на скорость накопления снега.

Связь между скоростью накопления снега и аномалиями высоты снежной поверхности

На рис. 2 представлена карта средних значений прироста снега на снегомерном полигоне за 10 лет (2007–2016 гг.). Характер расположения вех не дает возможности построить детальную карту снегонакопления для всей изученной территории, но позволяет проследить основные закономерности: равномерное распределение накопления в западной части территории и аномалии накопления в восточной ее части, связанные с наличием трассы Восток — Прогресс (повышенное накопление

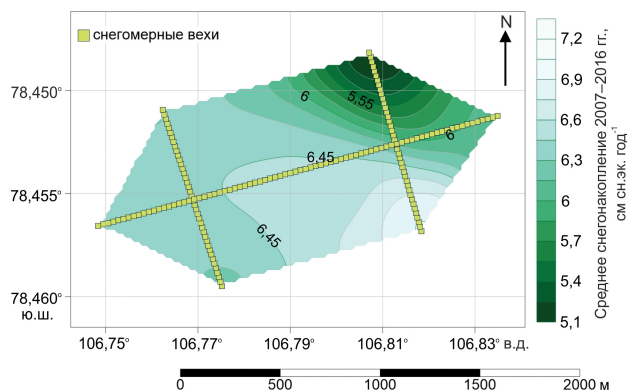


Рис. 2. Карта распределения скорости прироста высоты снежной поверхности на снегомерных полигонах станции Восток. Светло-зелеными точками показано положение снегомерных вех

Fig. 2. The map of the spatial distribution of the snow accumulation rate at the Vostok stake farm. The location of the stakes are shown by light green squares

вблизи трассы с подветренной стороны и пониженное — на удалении от нее с восточной стороны).

Рассмотрим взаимодействие между рельефом поверхности и накоплением снега более подробно. На рис. 3 показаны высота снежной поверхности и средний прирост снега за 2007–2016 гг. по каждому из трех профилей снегомерного полигона (профиль «запад – восток» и профили «север – юг» старого и нового полигонов).

Профиль СЮ нового полигона (левая половина рис. 1б) находится в ненарушенной части снежного покрова. Профиль поверхности ровный, без крупных аномалий, с одинаковым наклоном, равным приблизительно 60 см/км. Соответственно, накопление снега в пределах этого профиля также распределено равномерно и характеризуется случайным разбросом вокруг среднего значения.

Профиль ЗВ делится на две части: в западной половине (новый полигон) профили высоты поверхности и накопления не нарушены, а в восточной половине четко выделяется гребень трассы Восток — Прогресс, ложбина к востоку от него и связанные с ними аномалии накопления. Взаимодействие рельефа снежной поверхности и накопления снега носит сложный характер. На самом гребне трассы наблюдается минимум накопления, т.к. с возвышенности свежий снег легко сдувается ветром. Сразу за трассой с подветренной стороны накопление повышено — снег откладывается в ветровой тени. Наконец, на удалении порядка 150–900 м с подветренной стороны от трассы накопление понижено, поскольку переносимый метельным переносом снег уже выпал из снего-ветрового потока раньше. Таким образом, трасса Восток — Прогресс служит своеобразной снегозащитной полосой, увеличивая накопление снега в одних местоположениях и уменьшая в других.

Ложбина с подветренной стороны от трассы (рис. 1б и 3), по-видимому, обязана своим существованием этой отрицательной аномалии снегонакопления: пониженный в течение многих лет прирост снега привел к уменьшению высоты относительно окружающей равнины. Действительно, при сопоставлении высоты снежной поверхности в декабре 1999 г. и в январе 2000 г. (рис. 3) видно, что за 15 лет подветренный склон гребня трассы (зона повышенного накопления) стал чуть выше, а ложбина с подветренной стороны от трассы стала глубже на 15–20 см.

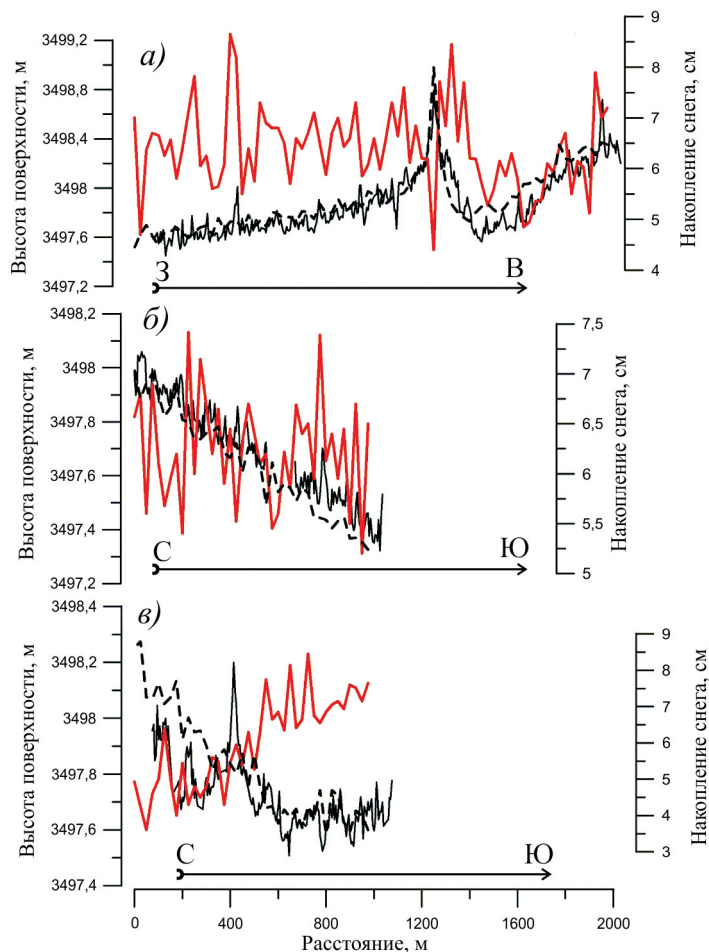


Рис. 3. Профили высоты поверхности и накопления снега на снегомерных полигонах станции Восток:

a — профиль «запад – восток» обоих снегомерных полигонов; *б* — профиль «север – юг» нового полигона; *в* — профиль «север – юг» старого полигона. Черными линиями показана высота поверхности, измеренная в январе 2015 г. (сплошные линии) и в декабре 1999 г. (пунктир). Красные линии — средний прирост снега за 10 лет (2007–2016 гг.)

Fig. 3. The profiles of the snow surface height and snow build-up at the stake farm of Vostok station: *a* — profile “west – east” of the both stake farms; *b* — profile “north – south” of the new farm; *v* — profile “north – south” of the old farm. Black lines are the snow surface height measured in January 2015 (solid lines) and in December 1999 (dashed lines). Red lines are the mean snow build-up during 10 years (2007–2016).

То же наблюдается и на профиле СЮ старого полигона: северная часть профиля лежит в ложбине (рис. 1б), соответственно, там наблюдается пониженное снегонакопление (рис. 2 и 3), что привело к снижению высоты поверхности примерно на 20 см за 15 лет (рис. 3).

Западная часть снегомерного полигона (новый полигон) при этом характеризуется равномерным близким к среднему многолетнему накоплением снега (6,4 см/год) и неизменной высотой поверхности.

Ранее считалось, что трасса походов оказывает влияние на поле снегонакопления лишь в непосредственной близости от нее, причем только с подветренной стороны [14]. Данные, представленные на рис. 1–3, убедительно показывают, что влиянию трассы в той или иной степени подвержен весь старый снегомерный полигон. Тем не менее мы утверждаем, что положительные и отрицательные аномалии снегонакопления в пределах старого полигона взаимно компенсируют друг друга и осредненное по всей площади полигона значение накопления снега надежно характеризует естественный климатически обусловленный прирост снега в данный год. Мы делаем этот вывод на основании сопоставления снегонакопления на старом и новом (не подверженном влиянию трассы) полигонах за период 1999–2016 гг. Среднее накопление снега за этот период составило $7,0 \pm 0,2$ см на старом полигоне и $7,5 \pm 0,2$ см на новом полигоне. Статистически эти две величины различаются несущественно, поэтому можно сделать вывод о том, что накопление снега на обоих снегомерных полигонах одинаково. Коэффициент корреляции между годовыми значениями прироста на обоих полигонах равен $0,51 \pm 0,22$ и значим с вероятностью 96 % (временная изменчивость накопления будет более подробно рассмотрена в другой статье).

Спектральный анализ представленных на рис. 3 профилей высоты поверхности, выполненный с помощью программы Statistica, показал отсутствие выраженных колебаний в высокочастотной части спектра. В низкочастотной части спектра на профилях СЮ присутствуют слабо выраженные колебания с длиной волны 300–500 м. На профиле 3В отмечены колебания с длиной волны 500–1000 м, которые могут быть отражением аномалий, связанных с трассой Восток — Прогресс.

Профили снегонакопления характеризуются квазипериодическими колебаниями с длиной волны 75–100 м (на профилях СЮ) и около 200 м (профиль 3В). Колебания с периодом 200–400 м также присутствуют и в спектре профилей СЮ. В целом результаты спектрального анализа не противоречат ранее полученным результатам [14]. Однако если раньше обнаруженные вариации интерпретировались исключительно как естественные колебания высоты снежной поверхности («мезодюны») и связанные с ними аномалии снегонакопления, то вновь полученные нами данные свидетельствуют о том, что эти осцилляции могут быть артефактами, связанными с существованием трассы Восток–Прогресс. Тем не менее спектральный анализ профиля СЮ нового полигона, не затронутого влиянием трассы, подтверждает существование слабовыраженных естественных пространственных колебаний как высоты снежной поверхности, так и скорости снегонакопления с длиной волны порядка 300–400 м.

Пространственная изменчивость изотопного состава поверхностного слоя снега

На рис. 4 и 5 представлено распределение изотопного состава поверхностного (0–10 см) слоя снега на профилях снегомерного полигона совместно с высотой снежной поверхности. Сразу же бросается в глаза, что, в отличие от снегонакопления (рис. 3), изотопный состав снега не обнаруживает выраженных аномалий, связанных с существованием трассы Восток — Прогресс. Это неожиданный результат, поскольку по данным изучения мегадюн известно, что крупные аномалии высоты поверхности ледника и накопления снега проявляются и в соответствующих аномалиях изотопного состава снега [10]. По-видимому, имеет значение различие механизма пространственного перераспределения снега в этих двух случаях.

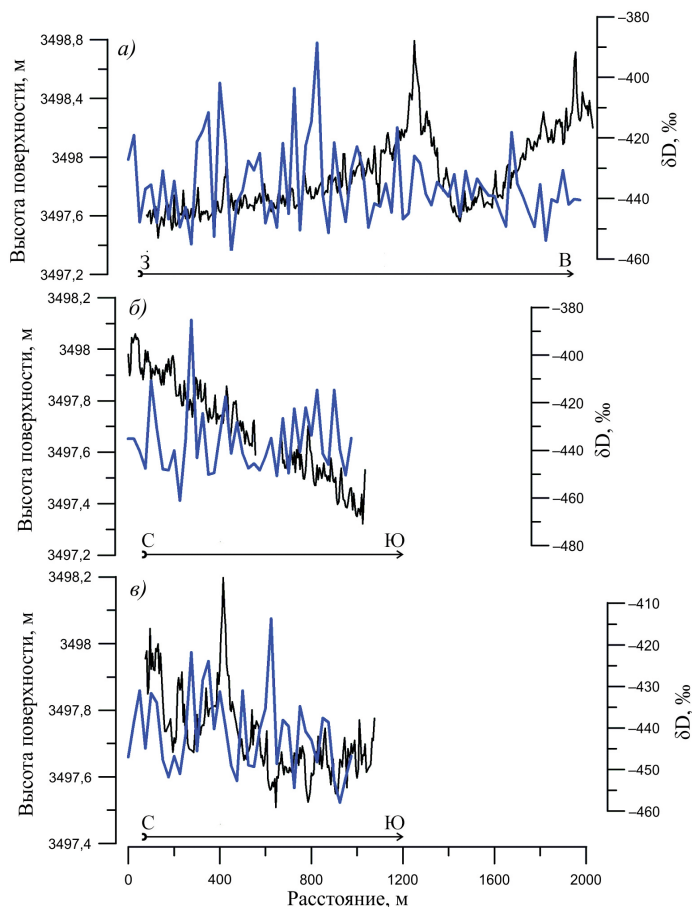


Рис. 4. Профили высоты поверхности и изотопного состава поверхностного слоя снега на снегомерных полигонах станции Восток:

a — профиль «запад – восток» обоих снегомерных полигонов; *б* — профиль «север – юг» нового полигона; *в* — профиль «север – юг» старого полигона. Черными линиями показана высота поверхности, измеренная в январе 2015 г. Синие линии — изотопный состав снега

Fig. 4. The profiles of the snow surface height and isotopic composition of the surface (10 cm) snow at the stake farm of Vostok station:

a — profile “west – east” of the both stake farms; *б* — profile “north – south” of the new farm; *в* — profile “north – south” of the old farm. Black lines are the snow surface height measured in January 2015. Blue lines are snow isotopic composition

Крупные горизонтальные и вертикальные размеры мегадюн (длина волны не менее 1–2 км при высоте 2–5 м [11]) приводят к ускорению/замедлению скорости кatabатического снего-ветрового потока на участках с повышенным/пониженным наклоном поверхности. Снег собирается с подветренного склона дюн и откладывается на наветренных склонах, причем различие в накоплении снега может достигать одного порядка (от почти 0 до 12 см/год на расстоянии 1,5 км [10]). По-видимому, перенос снега происходит интенсивнее зимой, когда скорость ветра больше, а снежные частицы меньше. В результате в общей массе отложенного снега доля зимних

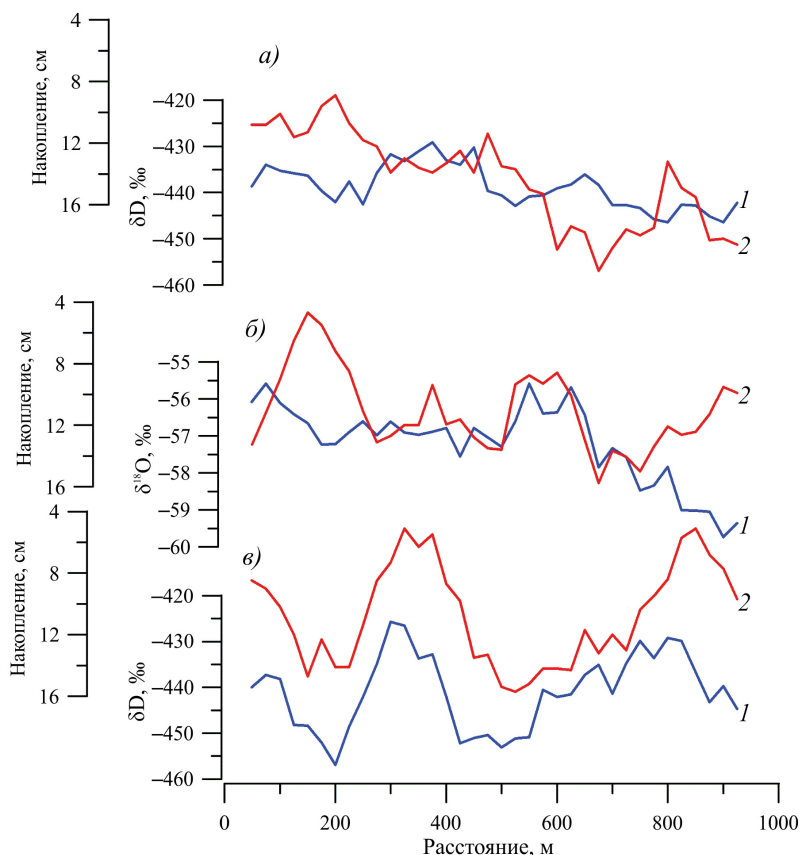


Рис. 5. Распределение изотопного состава и прироста высоты снежной толщи вдоль профиля «север – юг» старого полигона для трех временных срезов:

a — январь 2017 г.; *б* — январь 2007 г.; *в* — январь 2000 г. 1 — изотопный состав снега в указанный год, 2 — суммарный прирост снега за предыдущие два года. Все кривые сглажены по 5 точкам (125 м). Данные за январь 2000 г. — из [5], остальные — по данным этой работы

Fig. 5. The distribution of the isotopic composition and snow accumulation rate along the “north – south” profile of the old stake farm for three time snapshots

a — January 2017; *б* — January 2007; *в* — January 2000. 1 — snow isotopic composition in given year, 2 — total snow build-up in the previous 2 years. All the curves are smoothed by 5-point (125 m) filter. Data for January 2000 is taken from [5], the other data is taken from this work

осадков больше на подветренных склонах дюн, чем на наветренных, — что приводит к отрицательной корреляции между изотопным составом и накоплением снега. Альтернативным (или дополнительным) механизмом может быть различная интенсивность постдепозиционных процессов в снежной толще на разных склонах дюн, что приводит к большему обогащению тяжелыми изотопами снега, отложенного в участках с пониженным снегонакоплением [10].

Трасса же Восток — Прогресс представляет собой относительно высокое и узкое стационарное препятствие на пути снего-ветрового потока. Перенос снега осуществляется не за счет изменения средней скорости, а за счет турбулентной составляющей потока. По-видимому, этот процесс имеет одинаковую интенсив-

ность в разные сезоны года, что не приводит к изменению изотопного состава переотложенного снега. Связанная с трассой пространственная изменчивость накопления снега (от 5,5 до 8 см/год, рис. 3) гораздо меньше, чем в районе мегадюн, что не приводит к существенному изменению интенсивности постдепозиционных процессов.

Рассмотрим пространственную изменчивость изотопного состава снега в масштабе нескольких сотен метров. В работе [5] было показано существование квазипериодических колебаний изотопного состава (по данным образцов, собранных в январе 2000 г.) на профиле СЮ старого полигона с длиной волны 200–300 м, коррелирующих с соответствующими аномалиями высоты поверхности и накопления снега. На рис. 5 мы воспроизвели этот результат, добавив также данные, полученные в 2007 и 2017 гг. Для сопоставимости результатов мы применили к новым данным такую же методику обработки, которая была использована в [5]: мы сравниваем изотопный состав поверхностного слоя снега в январе данного года с суммарным снегонакоплением за 2 предыдущих года, причем все профили сглажены по пяти точкам (125 м) для подавления высокочастотных вариаций. Новые данные не подтверждают ни существования квазипериодических волн в значениях изотопного состава, ни значимой корреляции между изотопным составом и накоплением снега. Тем не менее наблюдается определенная схожесть пространственной изменчивости обоих параметров: чем выше дисперсия значений снегонакопления, тем выше дисперсия значений изотопного состава. Кроме того, во всех трех случаях наблюдается отрицательная зависимость между трендами обоих параметров.

Как указано выше, профиль СЮ старого полигона целиком находится под влиянием трассы Восток — Прогресс, поэтому обнаруженную на нем пространственную изменчивость изотопного состава и накопления снега следует считать связанным с трассой артефактом.

Для изучения естественной изменчивости этих параметров мы использовали данные, собранные на профиле СЮ нового полигона, не подверженного влиянию трассы (рис. 6).

Прежде всего следует отметить наличие слабо выраженных (амплитуда порядка 2–3 см) квазипериодических волн аномалий высоты поверхности с длиной волны порядка 400 м (хотя длина профиля не позволяет надежно изучать волны длиннее 200 м). Не обнаружено статистически значимой зависимости между аномалиями высоты поверхности (измеренной в январе 2015 г.) и накоплением снега в 2015–2016 гг. (коэффициент корреляции $-0,13 \pm 0,18$). Наконец, обнаружена статистически значимая (коэффициент корреляции $0,35 \pm 0,17$) положительная связь между изотопным составом поверхностного (0–10 см) снега в январе 2017 г. и накоплением снега за предыдущие 2 года (2015–2016 гг.).

Положительная корреляция между двумя этими параметрами наблюдается впервые, и в настоящее время нам не известен механизм, который мог бы приводить к такому виду зависимости между накоплением и изотопным составом снега. Чтобы понять механизм формирования пространственной изменчивости изотопного состава, мы привлекли данные по «экссессу дейтерия» δx_s (который определяется как $\delta x_s = \delta D - 8\delta^{18}O$). Коэффициент корреляции между δD и δx_s в пределах профиля СЮ нового полигона равен $-0,7 \pm 0,1$ (статистически

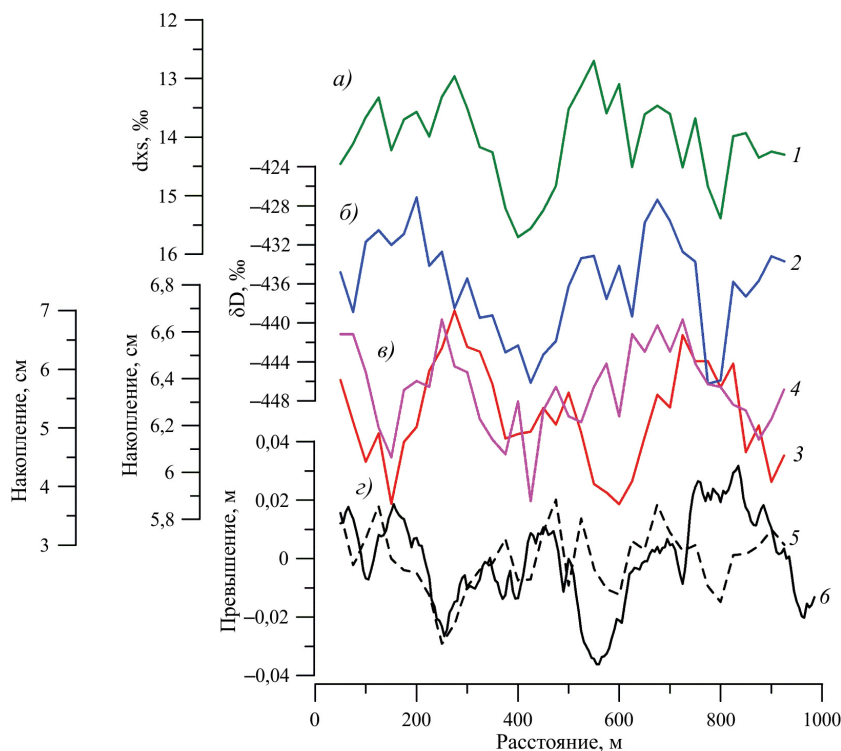


Рис. 6. Распределение характеристик снежного покрова вдоль профиля север – юг нового снегомерного полигона:

a — эксцесс дейтерия в снеге, январь 2017 г.; *б* — δD в снеге, январь 2017 г.; *в* — накопление снега; *г* — высота поверхности. 1 и 2 — изотопный состав снега (dxs и δD), 3 — средний прирост снега в 1970–2016 гг., 4 — средний прирост снега в 2015–2016 гг., 5 — высота поверхности в декабре 1999 г., 6 — высота поверхности в январе 2015 г. Все кривые сглажены по пяти точкам (125 м)

Fig. 6. The distribution of the snow characteristics along the “north–south” profile of the new stake farm: *a* — deuterium excess in snow, January 2017; *б* — δD in snow, January 2017; *в* — snow build-up; *г* — snow surface height. 1 and 2 — snow isotopic content (dxs and δD), 3 — mean snow build-up in 1970–2016 гг., 4 — mean snow build-up in 2015–2016 гг., 5 — snow surface height in December 1999, 6 — snow surface height in January 2015. All the curves are smoothed by 5-point (125 m) filter

значим). Такая сильно отрицательная корреляция между этими двумя изотопными параметрами характерна для сезонного хода изотопного состава осадков на станции Восток [15]. Таким образом, пространственная изменчивость изотопного состава, по всей видимости, связана с разной долей зимних и летних осадков в отложенном снеге.

Результаты, представленные на рис. 6, не противоречат выдвинутому ранее предположению о существовании «мезодюн» (квазипериодических волн характеристик снежной поверхности с длиной волны несколько сотен метров), однако представленные данные освещают лишь один временной срез. Чтобы доказать существование этих естественных колебаний, изучение пространственной изменчивости изотопного состава снега на профиле СЮ нового полигона необходимо продолжить и повторить измерения еще как минимум 1–2 раза.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполненное нами исследование выявило существование значительной пространственной изменчивости изотопного состава и накопления снега в окрестностях станции Восток (Центральная Антарктида) в пространственном масштабе 100–1000 м. Часть этих вариаций — артефакт, связанный с прохождением через изучаемую территорию трассы движения санно-гусеничных поездов, соединяющих российские антарктические станции Восток и Прогресс. Мы показали, что влиянием трассы так или иначе охвачен весь т.н. «старый снегомерный полигон» (рис. 1), хотя пространственное перераспределение снега и не оказывает влияния на осредненную по всему полигону величину снегонакопления.

Западная часть снегомерного полигона (т.н. «новый полигон»), не охваченная влиянием трассы, также испытывает заметные пространственные вариации обоих исследуемых параметров с характерным пространственным масштабом порядка 300–400 м. При этом аномалии снегонакопления и изотопного состава снега связаны между собой положительной связью, чего не наблюдалось раньше. Для выяснения механизма этой связи и для подтверждения существования «мезодюн» потребуются дополнительные полевые и лабораторные работы.

Выводы данной работы имеют практическое значение для интерпретации данных кернов мелких и глубоких скважин. В частности, существование «мезо-дюн» позволило бы пролить свет на природу низкочастотного шума (с периодом от десятилетий до столетий) в климатических рядах, реконструированных по кернам из скважин, пробуренных в относительной близости друг от друга.

Другим практическим результатом исследования является вывод о необходимости переноса старого снегомерного полигона ст. Восток на новое место, не подверженное влиянию трассы Восток — Прогресс.

В заключение следует также отметить, что район станции Восток — уникальное место с точки зрения пространственной изменчивости характеристик снежного покрова, поскольку ледник здесь располагается над обширным подледниковым озером [13], что обуславливает исключительную ровность поверхности ледникового покрова. Мы предполагаем, что вследствие гладкости этой поверхности, лишенной крупных форм рельефа, климатический ряд, восстановленный по глубокому ледяному керну, лишен рельефообусловленных (то есть не климатических) аномалий в масштабе больше нескольких десятков или первых сотен лет.

Этот вывод применим только к рядам в интервале 0–40 тыс. л.н., поскольку лед старше 40 тыс. лет, добытый из глубоких скважин на ст. Восток, образовался за пределами подледникового озера Восток [16]. За пределами береговой черты ледник характеризуется крупными (горизонтальные размеры более 1 км) аномалиями высоты поверхности, хорошо различимыми на космических снимках. Сочетание движения ледника с предполагаемым собственным движением этих форм рельефа относительно ледника (характерная скорость которых составляет порядка нескольких метров в год [10]) приводит к формированию рельефообусловленных аномалий в реконструированных по ледяным кернам временных рядах с периодом от нескольких сотен до тысяч лет.

Благодарности. Данная работа была поддержана Российским фондом фундаментальных исследований, грант № 17-05-01168.

Авторы статьи благодарны руководству РАЭ за логистическое обеспечение гляциологических исследований в районе станции Восток, а также всем участникам 45-й, 52-й, 55-й, 60-й и 62-й РАЭ за содействие в полевых работах, в частности — Семену Радкевичу за помощь в нивелирной съемке и Алексею Маркову — за помощь в сборе снежных образцов.

Мы также благодарим сотрудников LSCE, Института Нильса Бора и Таллинского геологического института за выполнение масс-спектрометрических измерений изотопного состава образцов.

Acknowledgments. This work is financed by Russian Foundation for Basic Research grant 17-05-01168.

The authors are grateful to the administration of Russian Antarctic Expedition (RAE) for logistical support of the glaciological program at Vostok, as well as to all the participants of the 45th, 52nd, 55th, 60th and 62nd RAE field seasons for assistance in field works, in particular to Semyon Radkevich for his help in geodetic observations, and to Alexey Markov for his help in snow samples collection.

We also thank the staff of LSCE (France), Niels Bohr Institute (Denmark) and Tallinn Geological Institute (Estonia) for the mass-spectrometric measurements of the isotopic content in the snow samples.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Екайкин А.А.* Стабильные изотопы воды в гляциологии и палеогеографии. СПб.: ААНИИ, 2016. 63 с.
2. *Landais A., Casado M., Prie F., Magand O., Arnaud L., Ekaykin A., Petit J.R., Picard G., Fily M., Minster B., Touzeau A., Goursaud S., Masson-Delmotte V., Jouzel J., Orsi A.* Surface studies of water isotopes in Antarctica for quantitative interpretation of deep ice core data // *Comptes Rendus Geoscience*. 2017. V. 349. P. 139–150.
3. *IMBIE team.* Mass balance of the Antarctic Ice Sheet from 1992 to 2017 // *Nature*. 2018. V. 558. P. 219–222.
4. *Van den Broeke M. et al.* Greenland Ice Sheet Surface Mass Loss: Recent Developments in Observation and Modeling // *Current Climate Change Reports*. 2017. V. 3 (4). P. 345–356.
5. *Ekaykin A.A., Lipenkov V.Ya., Barkov N.I., Petit J.R., Masson-Delmotte V.* Spatial and temporal variability in isotope composition of recent snow in the vicinity of Vostok Station: Implications for ice-core interpretation // *Annals of Glaciology*. 2002. V. 35. P. 181–186.
6. *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 // *Clim. Past*. 2016. V. 12. P. 1565–1581.
7. *Altnau S., Schlosser E., Isaksson E., Divine D.* Climatic signals from 76 shallow firn cores in Dronning Maud Land, East Antarctica // *The Cryosphere*. 2015. V. 9. P. 925–944.
8. *Casado M., Landais A., Picard G., Munch T., Laepple T., Stenni B., Dreossi G., Ekaykin A., Arnaud L., Genthon C., Touzeau A., Masson-Delmotte V., Jouzel J.* Archival processes of the water stable isotope signal in East Antarctic ice cores // *The Cryosphere*. 2018. V. 12. P. 1745–1766.
9. *Touzeau A., Landais A., Stenni B., Uemura R., Fukui K., Fujita S., Guilbaud S., Ekaykin A., Casado M., Barkan E., Luz B., Magand O., Teste G., Le Meur E., Baroni M., Savarino J., Bourgeois I., Risi C.* Acquisition of isotopic composition for surface snow in East Antarctica and the links to climatic parameters // *The Cryosphere*. 2016. V. 10. P. 1–16.
10. *Ekaykin A.A., Eberlein L., Lipenkov V.Ya., Popov S., Scheinert M., Schröder L., Turkeev A.* Non-climatic signal in ice core records: lessons from Antarctic megadunes // *The Cryosphere*. 2016. V. 10. P. 1217–1227.

11. *Frezzotti M., Gandolfi S., Urbini S.* Snow megadunes in Antarctica: Sedimentary structure and genesis // *J. Geophys. Res.* 2002. V. 107 (D18). P. 1–12.
12. *Барков Н.И., Липенков В.Я.* Накопление снега в районе станции Восток в 1971–1973 гг. // *Инф. бюлл. САЭ.* 1978. № 98. С. 63–68.
13. *Popov S.V., Masolov V.N.* Forty-seven new subglacial lakes in the 0–110° E sector of East Antarctica // *J. Glaciol.* 2007. V. 53 (181). P. 289–297.
14. *Екайкин А.А., Липенков В.Я., Барков Н.И.* Пространственно-временная структура поля снегонакопления в районе станции Восток, Центральная Антарктида // *Вестник СПбГУ, сер. 7.* 1998. № 4 (28). С. 38–50.
15. *Landais A., Ekaykin A.A., Barkan E., Winkler R., Luz B.* Seasonal variations of ¹⁷O-excess and d-excess in snow precipitation at Vostok Station, East Antarctica // *J. Glaciol.* 2012. V. 58 (210). P. 725–733.
16. *Цыганова Е.А., Попов С.В., Саламатин А.Н., Липенков В.Я.* Результаты радиолокационного зондирования и моделирования течения ледникового покрова Восточной Антарктиды вдоль линии тока, проходящей через станцию Восток // *Лед и снег.* 2010. Вып. 1 (109). С. 14–29.

REFERENCES

1. *Ekaykin A.A.* *Stabilnye isotopy vody i glaciologii i paleogeografii.* Stable water isotopes in glaciology and palaeogeography. St. Petersburg: AARI, 2016: 63 p. [In Russian].
2. *Landais A., Casado M., Prie F., Magand O., Arnaud L., Ekaykin A., Petit J.R., Picard G., Fily M., Minster B., Touzeau A., Goursaud S., Masson-Delmotte V., Jouzel J., Orsi A.* Surface studies of water isotopes in Antarctica for quantitative interpretation of deep ice core data. *Comptes Rendus Geoscience.* 2017, 349: 139–150.
3. *IMBIE team.* Mass balance of the Antarctic ice sheet from 1992 to 2017. *Nature.* 2018, 558: 219–222.
4. *Van den Broeke M. et al.* Greenland ice sheet surface mass loss: recent developments in observation and modeling. *Current Climate Change Reports.* 2017, 3 (4): 345–356.
5. *Ekaykin A.A., Lipenkov V.Ya., Barkov N.I., Petit J.R., Masson-Delmotte V.* Spatial and temporal variability in isotope composition of recent snow in the vicinity of Vostok Station: Implications for ice-core interpretation. *Annals of Glaciology.* 2002, 35: 181–186.
6. *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 Kohlen Station, Dronning Maud Land. *Clim. Past.* 2016, 12: 1565–1581.
7. *Altnau S., Schlosser E., Isaksson E., Divine D.* Climatic signals from 76 shallow firn cores in Dronning Maud Land, East Antarctica. *The Cryosphere.* 2015, 9: 925–944.
8. *Casado M., Landais A., Picard G., Münch T., Laepple T., Stenni B., Dreossi G., Ekaykin A., Arnaud L., Genthon C., Touzeau A., Masson-Delmotte V., Jouzel J.* Archival processes of the water stable isotope signal in East Antarctic ice cores. *The Cryosphere.* 2018, 12: 1745–1766.
9. *Touzeau A., Landais A., Stenni B., Uemura R., Fukui K., Fujita S., Guilbaud S., Ekaykin A., Casado M., Barkan E., Luz B., Magand O., Teste G., LeMeur E., Baroni M., Savarino J., Bourgeois J., Risi C.* Acquisition of isotopic composition for surface snow in East Antarctica and the links to climatic parameters. *The Cryosphere.* 2016, 10: 1–16.
10. *Ekaykin A.A., Eberlein L., Lipenkov V.Ya., Popov S., Scheinert M., Schröder L., Turkeev A.* Non-climatic signal in ice core records: lessons from Antarctic megadunes. *The Cryosphere.* 2016, 10: 1217–1227.
11. *Frezzotti M., Gandolfi S., Urbini S.* Snow megadunes in Antarctica: Sedimentary structure and genesis. *J. Geophys. Res.* 2002, 107 (D18): 1–12.

12. Barkov N.I., Lipenkov V.Ya. Snow accumulation in the vicinity of Vostok Station in 1970 – 1973. *Informaciony bulleten Sovetskoy Antarkticheskoy Ekspedicii*. Information Bulletin of the Soviet Antarctic Expedition. 1978, 98: 63–68. [In Russian].
13. Popov S.V., Masolov V.N. Forty-seven new subglacial lakes in the 0–110° E sector of East Antarctica. *J. Glaciol.* 2007, 53 (181): 289–297.
14. Ekaykin A.A., Lipenkov V.Ya., Barkov N.I. Spatial and temporal structure of snow accumulation field in the vicinity of Vostok Station, Eastern Antarctic. *Vestnik Sankt Peterburgskogo universiteta*. Journal of St Petersburg State University, Series 7. 1998, 4 (28): 38–50. [In Russian].
15. Landais A., Ekaykin A.A., Barkan E., Winkler R., Luz B. Seasonal variations of ¹⁷O-excess and d-excess in snow precipitation at Vostok Station, East Antarctica. *J. Glaciol.* 2012, 58 (210): 725–733.
16. Tsyganova E.A., Popov S.V., Salamatin A.N., Lipenkov V.Ya. East Antarctica ice sheet flow along the Vostok flow line from the echosounding and modelling results. *Led i sneg*. Ice and Snow. 2010, 1 (109): 14–29. [In Russian].