Ледники и ледниковые покровы

УДК 551.324.8 doi: 10.15356/2076-6734-2017-3-293-306

Изотопный состав снега и льда на ледниках Новой Земли

© 2017 г. В.Н. Михаленко[1*], С.С. Кутузов[1], А.А. Екайкин[2], И.И. Лаврентьев[1], А.В. Козачек[2], Р.А. Чернов[1]

[1]Институт географии РАН, Москва, Россия;
[2]Арктический и Антарктический научно-исследовательский институт, Санкт-Петербург, Россия
[*]mikhalenko@igras.ru

Isotopic composition of snow and ice on the glaciers of Novaya Zemlya

V.N. Mikhalenko[1*], S.S. Kutuzov [1], A.A. Ekaykin[2], I.I. Lavrantiev[1], A.V. Kozachek[2], R.A. Chernov[1]

[1]Institute of Geography, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia; [2]Arctic and Antarctic Research Institute, St. Petersburg, Russia
[*]mikhalenko@hotmail.com

Received December 21, 2016 *Accepted April 18, 2017*

Keywords: ***Arctic, glaciers, Novaya Zemlya, stable isotopes.***

Summary

In 2015–2016 during the research expeditions of Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences the study of stable water isotopes (^{18}O and D) was conducted on glaciers of Novaya Zemlya. As a result, first data on isotopic composition of seasonal snow cover and glacial ice of different ages were obtained and its connection to recent climate change has been shown. The first studies of the isotopic composition of snow cover and glacial ice at Novaya Zemlya allowed determine the average values and the range of variability of $\delta^{18}O$ and δD. It shown that for the Northern ice cap glacial ice $\delta^{18}O$ vary within −13.91 ÷ −15.83 ‰ with an average value of −14.93 ‰ and −103,95 ÷ −116.75 ‰ for δD at −109.88 ‰ mean value. The maximum variations were recorded for summer snow samples (−8.35 ‰ for $\delta^{18}O$ and −55.79 ‰ for δD), as well as for the horizon of superimposed ice (−20.67 ‰ for $\delta^{18}O$ and −151.48 ‰ for δD) where isotopic composition has been inherited from winter precipitation. Insignificant differences in the coefficients of the meteoric water regression equation for precipitation on GNIP stations and glacial ice at Novaya Zemlya indicate similar conditions of air masses and precipitation formation both at GNIP station and on glaciers. Deuterium excess showed no seasonal fluctuations, and its values did not exceed 15 ‰, which shows that the proportion of continental precipitation of moisture is very low. Analysis of isotopic profiles obtained on the glaciers of Novaya Zemlya indicated the presence of significant melting. This applies not only to the modern shallow horizons, but also to the part of the glacial strata that formed in the highest part of the archipelago close to ice divide and came to the surface at the Serp i Molot Glacier tongue. Therefore, in terms of ice core palaeogeographic reconstructions the most interesting site is the highest part of the Northern ice cap where it is possible to assume the existence of colder horizons formed during the Little Ice Age and where the seasonal geochemical signal may be preserved.

Citation: Mikhalenko V.N., Kutuzov S.S., Ekaykin A.A., Lavrantiev I.I., Kozachek A.V., Chernov R.A. Isotopic composition of snow and ice on the glaciers of Novaya Zemlya. *Led i Sneg*. Ice and Snow. 2017, 57 (3): 293–306. [In Russian]. doi: 10.15356/2076-6734-2017-3-293-306

Поступила 21 декабря 2016 г. *Принята к печати 18 апреля 2017 г.*

Ключевые слова: ***Арктика, изотопный состав, ледники, Новая Земля.***

В 2015–2016 гг. проводились исследования стабильных изотопов ^{18}O и D на ледниках Новой Земли. Установлены средние значения и диапазон изменчивости $\delta^{18}O$ и δD. Показано, что для Северного ледникового купола величины $\delta^{18}O$ в ледниковом льду варьируют в пределах −13,91 ÷ −15,83 ‰ при среднем значении −14,93 ‰. В изменениях эксцесса дейтерия не выявлено никаких сезонных колебаний, а его значения не превышают 15 ‰, что показывает крайне незначительную долю континентальной влаги в выпадающих осадках. Анализ изотопных профилей, полученных на ледниках Новой Земли, свидетельствует о значительном таянии.

Введение

Исследование стабильных изотопов ($H_2{}^{16}O$, $HD^{16}O$, $H_2{}^{18}O$, $H_2{}^{17}O$), входящих в состав атмосферной влаги, позволяет получить комплексную информацию о процессах гидрологического цикла и корректировать параметры моделей общей циркуляции атмосферы [1, 2]. Начало использования стабильных изотопов воды в палеогеографических исследованиях положено В. Дансгором в начале 1950-х годов, когда при измерении изотопного состава атмосферных осадков в Копенгагене он установил, что при прохождении холодного фронта содержание ^{18}O в осадках непрерывно уменьшается [3]. На основе этих наблюдений было высказано предположение, что изотопный состав погребённых осадков (снежно-фирново-ледяных отложений полярных ледников) может быть использован в качестве «палеотермометра». Эта гипотеза подтвердилась при измерении изотопного состава первого в мире глубокого ледникового керна, полученного на станции Кэмп Сенчури в Гренландии [4]. В настоящее время изотопный состав снега и льда ($\delta^{18}O$ и δD) служит базовым источником информации о происхождении и климатических условиях формирования атмосферных осадков, в частности, представляет собой основу для реконструкции палеотемператур при анализе ледниковых кернов [5, 6 и др.].

Данные о пространственном распределении изотопного состава атмосферных осадков получают в основном на метеостанциях, входящих в сеть GNIP (Global Network of Isotopes in Precipitation) [7]. На территории России эта сеть крайне разрежена и неоднородна [8–10]. В арктических районах, где станции GNIP вообще единичны, ледники служат единственным источником информации об изотопном составе осадков [11, 12 и др.]. Процессы формирования изотопного состава снега и льда достаточно хорошо изучены в Гренландии [11, 13, 14], на Шпицбергене [12, 15], Северной Земле [16, 17], Земле Франца-Иосифа [18]. На основе этих данных скоррелированы возрастные шкалы для ледниковых кернов, полученных в разных районах Арктики, и сделаны важные палеогеографические выводы [19].

На архипелаге Новая Земля до последнего времени выполнены лишь единичные измерения изотопного состава льда на языке ледника Шокальского и ледяных включений в многолетнемёрзлых породах [20]. Для внутренних районов ледникового покрова информация отсутствует. В 2015–2016 гг. в рамках экспедиционных исследований Института океанологии РАН проводились исследования стабильных изотопов (^{18}O и D) на ледниках Новой Земли. В результате впервые получены данные об изотопном составе как сезонного снежного покрова, так и ледникового льда разного возраста и показана их связь с современными климатическими изменениями.

Характеристика района и объектов исследования

Современное оледенение Новой Земли по площади и объёму льда – самое большое в Арктике после Гренландии. Общая площадь ледников Новой Земли, согласно данным Международного каталога ледников [21], составляет 22 127 км^2, в том числе площадь оледенения Северного острова равна 21 840 км^2. Эти данные получены на основе дешифрирования космических снимков 2000–2008 гг. Первые гляциологические исследования на Новой Земле проведены в рамках 2-го Международного полярного года (1932–1933 гг.) под руководством М.М. Ермолаева [22, 23]. Во время Международного геофизического года (МГГ) 1957–1959 гг. на архипелаге в Русской Гавани на леднике Шокальского и в ледораздельной части покрова работала гляциологическая экспедиция Института географии АН СССР [24]. В последние годы исследования ведутся в основном дистанционно и сфокусированы на изменениях площади и объёма ледников, а также на выявлении айсберговой опасности.

Работы 2015 и 2016 гг. проводились на Северном ледниковом куполе (2015 г.) и на языке выводного ледника Серп и Молот (2016 г.) (рис. 1). В северной части ледникового покрова Новой Земли находится Северный ледниковый купол, который вместе с выводным ледником Иностранцева (по данным космической съёмки Landsat 2016 г. и цифровой модели рельефа ArcticDEM [25]) образует единый комплекс площадью 2317 км^2 (см. рис. 1). *Северный ледниковый купол* – самостоятельное ледниковое образование площадью 1994 км^2, соединённое с остальным покровом ледником Иностранцева, состо-

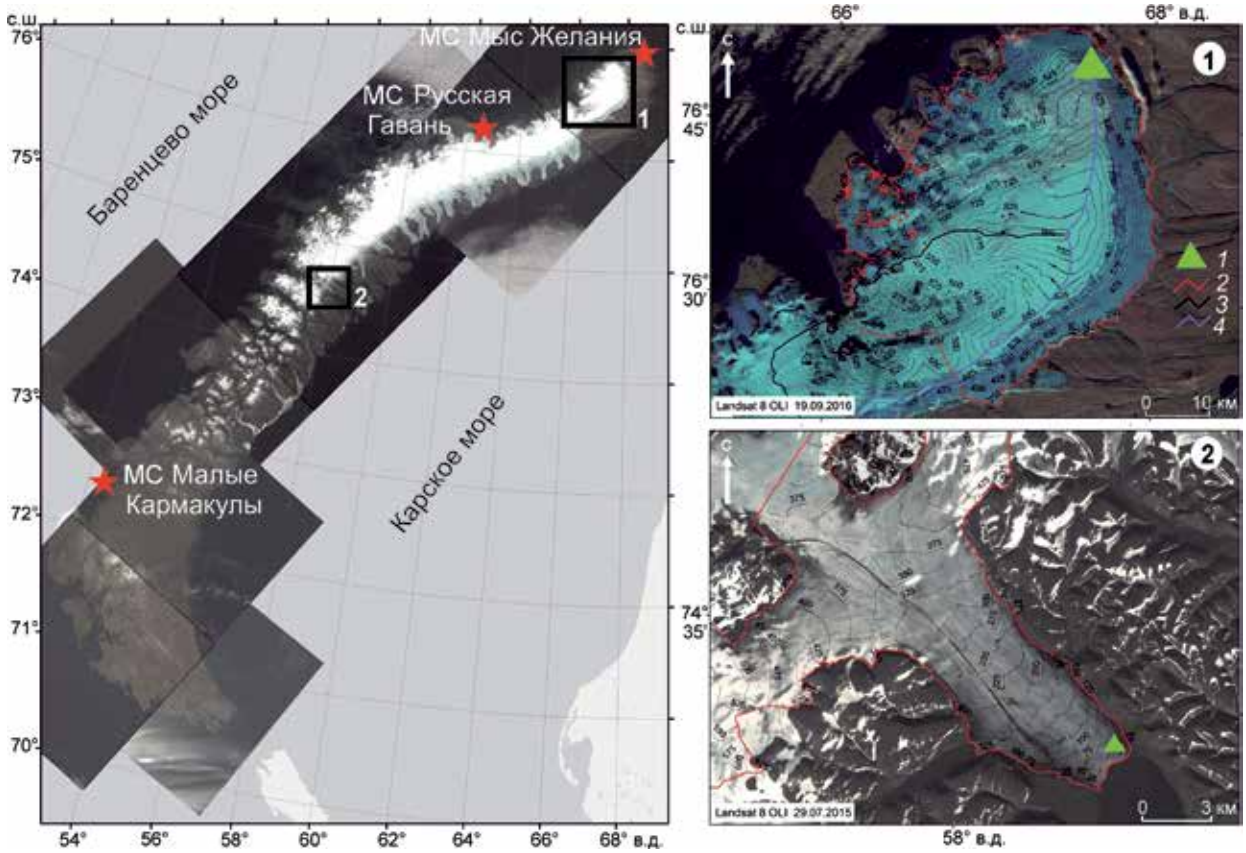

Рис. 1. Район исследований.
Во врезках показаны Северный ледниковый купол (1) и язык ледника Серп и Молот (2).
1 – точки отбора образцов (см. пояснения в тексте); *2* – границы ледников; *3* – ледосборный бассейн ледника Иностранцева; *4* – ледораздел между Баранцевоморской и Карской сторонами ледникового покрова

Fig. 1. Location map. Northern Ice Cap (1) and the tongue of Serp and Molot Glacier (2) are given in boxes. Northern Ice Cap:
1 – sampling sites; *2* – contours of the glaciers; *3* – contours of Inostrantsev Glacier; *4* – ice divide between Barents Sea and Kara Sea sides of the ice cap

ящим из шести ветвей, четыре из которых берут начало с ледораздельной части основного покрова, а две – с Северного ледникового купола. Гипсометрической границей, отделяющей Северный ледниковый купол от основного покрова, служит понижение поверхности в средней части верховьев одной из ветвей ледника Иностранцева, где ледораздел максимально смещён к Карской стороне острова (см. рис. 1). Центральная часть ледникового купола удалена от восточного Карского побережья на 30–40 км и представляет собой обширное плато, покрытое снегом и поднимающееся на 600–800 м над ур. моря.

Ледник Серп и Молот (№ 61 по Каталогу ледников СССР) [26]) находится в южной части ледникового покрова Новой Земли, на границе областей покровного и переходного типа оледенения, и относится к бассейну Карского моря (см. рис. 1). Северная ветвь ледника берёт начало на ледоразделе ледникового покрова, южная – в верховьях сложного ледникового купола. Перепад высот ледниковой поверхности ледника Серп и Молот составляет около 900 м. Его язык образован тремя потоками льда, два из которых текут с севера, а один – с юго-запада. Он лежит в интервале высот 0–400 м и тянется на 20 км в направлении с северо-востока на юго-запад. Край ледника обрывается в Карское море фронтом шириной 2,1 км.

Климат. Для климата Европейской части Арктики характерны отчётливо выраженная сезонность, связанная с приходом солнечной радиации и адвекцией тепла из северной части Атлантического океана в район Баренцева моря [27–29], и

большая межгодовая изменчивость [30]. Новая Земля служит орографическим барьером для атлантических циклонов, движущихся в восточном направлении, поэтому количество осадков убывает с юга на север и с запада на восток [24]. О климатическом режиме Новой Земли можно судить на основании данных береговых метеорологических станций (МС) Малые Кармакулы (72°22′ с.ш., 52°42′ в.д.; 1876–2016 гг.), Русская Гавань (76°11′ с.ш., 62°35′ в.д.; 1933–1992 гг.) и Мыс Желания (76°57′ с.ш., 68°33′ в.д.; 1931–2016 гг.) (рис. 2). Для сравнения на рис. 2 показаны данные по гидрометеорологической обсерватории (ГМО) им. Э.Т. Кренкеля на о. Хейса на Земле Франца-Иосифа (80°37' с.ш., 58°02' в.д.).

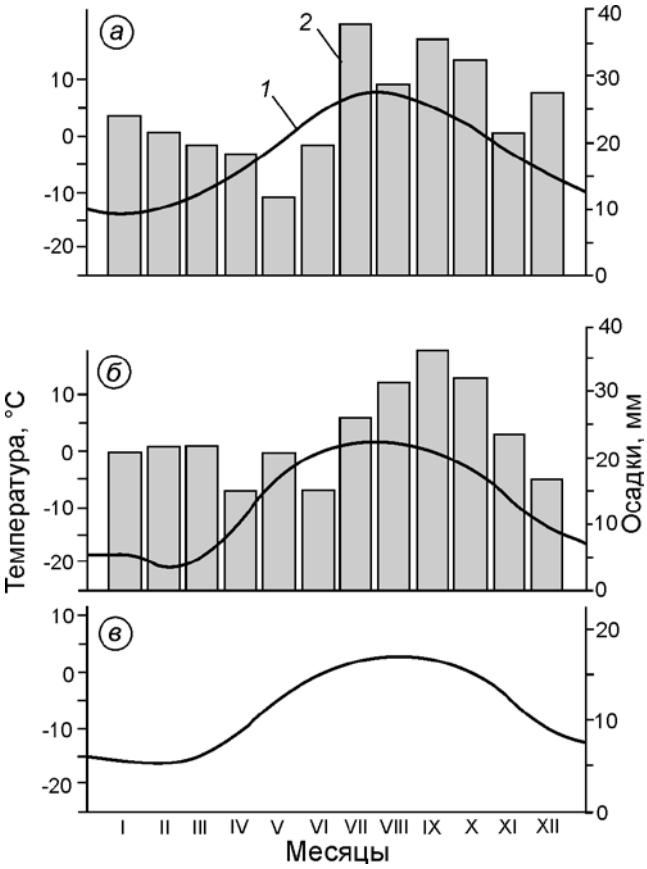

Рис. 2. Внутригодовое распределение температуры воздуха (*1*) и атмосферных осадков (*2*) на метеостанциях Малые Кармакулы (*а*), Мыс Желания (*в*) и на гидрометеорологической обсерватории имени Э.Т. Кренкеля (*б*). Данные по осадкам на метеостанции Мыс Желания крайне ненадёжны; географические координаты станций приведены в тексте

Fig. 2. Mean monthly air temperature (*1*) and precipitation (*2*) at the Malye Karmakuly (*а*), Cape Zhelaniya (*в*), and Krenkel (*б*) meteorological stations.
Precipitation data for Cape Zhelaniya station is extremely unreliable; geographical coordinates for the stations are given in the text

Данные по температуре воздуха и количеству атмосферных осадков отличаются крайней неоднородностью и содержат много пропусков. Особенно это касается сведений по осадкам. Недостоверность данных об атмосферных осадках в полярных районах хорошо известна. В первую очередь это связано с частыми сильными ветрами, особенно на Новой Земле, перераспределяющими выпадающий снег [24]. Другая проблема обусловлена методикой измерения. В 1930-е годы проводился массовый перенос станций на открытое место, репрезентативное для ряда параметров, но не для осадков. С 1953 г. на метеорологических станциях устанавливались осадкомеры Третьякова с ветровой защитой, после чего отмечалось надувание снега в осадкомер. Наконец, с 1966 г. поправка на смачивание стала вводиться непосредственно на станциях. После этого никаких изменений в методике измерений и обработки данных не было, поэтому ряды осадков с 1966 г. можно считать однородными. Вместе с тем представленные в базах данных [31] сведения крайне фрагментарны и не отражают действительной картины.

Согласно материалам Я. Зееберга и С. Формана [32], средняя годовая температура воздуха за период 1955–1998 гг. составляла: в Малых Кармакулах −5,4 °С, в Русской Гавани −8,4 °С, а на Мысе Желания −10,3 °С. В результате наблюдаемого в последние десятилетия потепления (рис. 3) эти значения выросли (за период 2000–2015 гг.) до −3,4 °С в Малых Кармакулах и до −7,1 °С на Мысе Желания. Количество атмосферных осадков в силу указанных причин может быть оценено весьма приблизительно и составляет для периода 1955–1998 гг. на МС Малые Кармакулы 396 мм, Русская Гавань 329 мм и Мыс Желания 283 мм [32]. Для периода 1966–2015 гг. в Малых Кармакулах эта величина составила 355 мм. На ледоразделе (около 760 м над ур. моря) среднее годовое количество осадков возрастает до 800 мм [24].

Методы исследования и полученные данные

В сентябре 2015 г. на склоне Северного ледникового купола Новой Земли пробурено три неглубокие скважины, из которых был отобран керн [33] (табл. 1). Первая скважина (скв. 1) на-

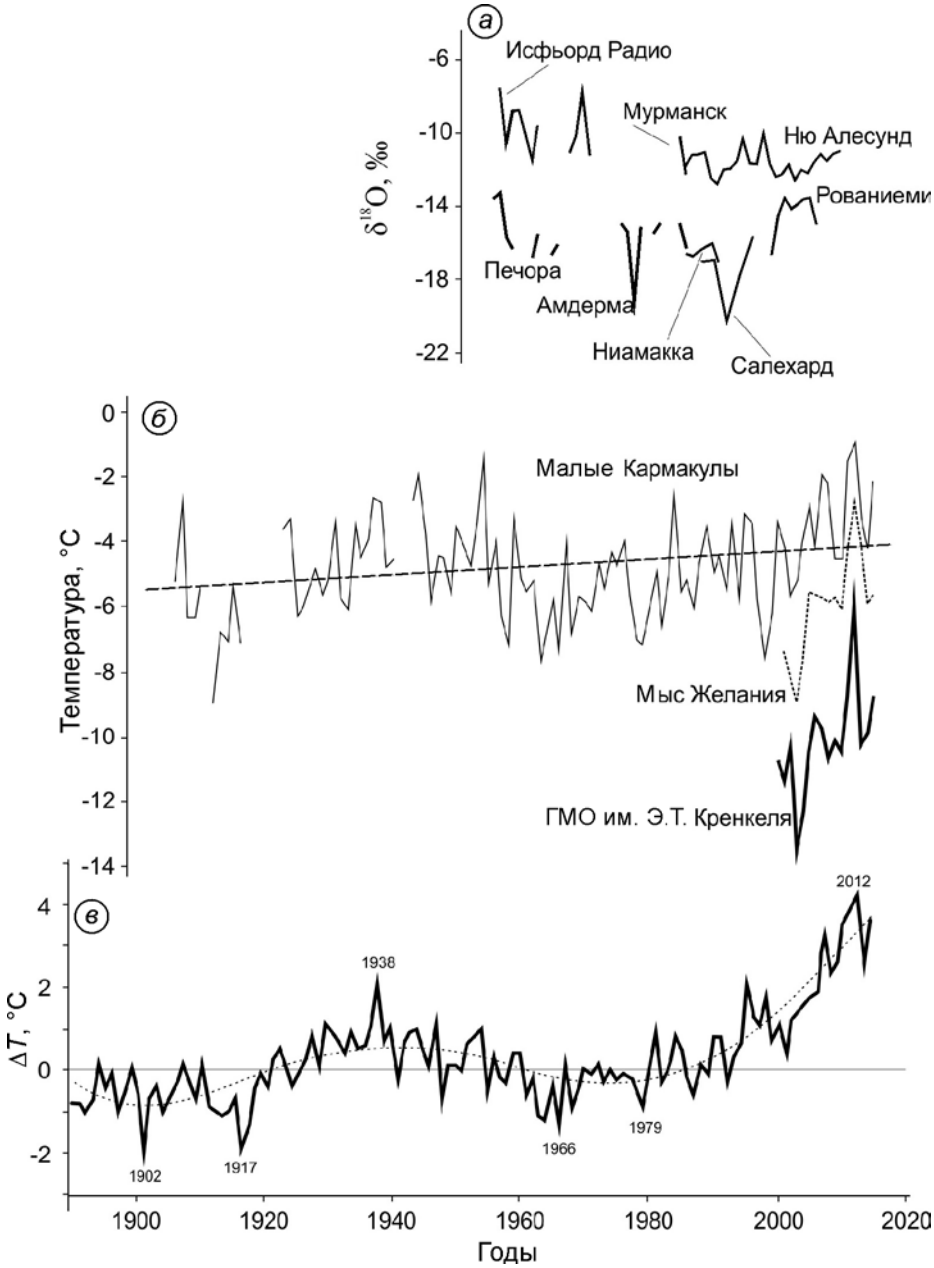

Рис. 3. Изменение изотопного состава $\delta^{18}O$ на станциях сети GNIP в районе исследования (*а*); средняя годовая температура воздуха на станциях Малые Кармакулы, Мыс Желания и гидрометеорологической обсерватории им. Кренкеля (*б*) и средние годовые аномалии температуры воздуха (°С) в широтном поясе 70–80° с.ш. (1891–2014 гг.) (*в*). По [26].

Линия тренда показана для метеостациистанции Малые Кармакулы; координаты станций GNIP приведены в табл. 1

Fig. 3. Stable water ($\delta^{18}O$) isotopic composition at the GNIP stations in Arctic (*a*), mean annual air temperature at the Malye Karmakuly, Cape Zhelaniya, and Krenkel meteorological stations (*б*), and anomalies of mean summer temperature with deviations from the mean 1961–1990 value (*в*) in the 70–80° N latitude belt for 1891–2014 (after [26]).

Air temperature trend line is shown for Malye Karmakuly station. List if GNIP stations is given in Table 1

ходилась в области аккумуляции в фирново-ледяной зоне льдообразования. Вскрытый разрез в верхней части представлен слоем нестаявшего сезонного снежного покрова. Ниже расположены слои инфильтрационного льда. Вторая скважина (скв. 2) пробурена в зоне ледяного питания, третья (скв. 3) – в верхней части области абляции. Стратиграфическое описание разре-

Таблица 1. **Данные о кернах льда и точках отбора образцов, используемых в настоящей работе (жирным шрифтом выделены средние значения изотопного состава)***

Район работ	Координаты, градусы	Высота, м	Глубина скважины, м	$\delta^{18}O$, ‰	δD, ‰	Источник
Купол Лунный, о. Земля Александры, Земля Франца-Иосифа	С.ш. 80,650000 В.д. 46,816667	375	24	**−14,3** −12,1 ÷ −17,2	–	[12]
О. Галля, Земля Франца-Иосифа	С.ш. 80,383333 В.д. 57,916667	350	18	**−15,7** −12,9 ÷ −18,8		
Купол Ветреный, о. Греэм-Белл, Земля Франца-Иосифа	С.ш. 80,783333 В.д. 63,533333	509	24	**−17,2** −13,4 ÷ −22,6		
Северный ледниковый купол, Новая Земля:						Настоящая работа
скв. 1	С.ш. 76,834450 В.д. 67,579350	535	2,3	**−11,36** −8,35 ÷ −12,28	**−80,4** −55,8 ÷ −87,2	
скв. 2	С.ш. 76,852183 В.д. 67,659317°	437	5,35	**−16,27** −13,10÷−20,67	**−119,57** −95,83 ÷ −151,48	
скв. 3	С.ш. 76,51,434 В.д. 67,659317	386	1,90	**−14,93** −13,91 ÷ −15,83	**−109,87** −103,95 ÷ −116,75	
Ледник Серп и Молот, Новая Земля	С.ш. 74,935583 В.д. 58,368717	48	15	**−16,66** −15,51 ÷ −17,78	**−121,28** −113,08 ÷ −129,56	
Купол Академии наук, Северная Земля	С.ш. 80,516667 В.д. 94,816667	760	724	**−20,2** −16,8 ÷ −24,7	–	[11]
Баренцбург, Шпицберген	С.ш. 78,065041 В.д. 14,214635	70–360	–	−7,5 ÷ −17,2	−53,4 ÷ −130,8	[10]

*Прочерки означают, что в цитируемых статьях эти данные не приведены.

зов и их физические свойства приведены в работе [33] и в генерализованном виде представлены на рис. 4. Из керна на месте бурения отобраны образцы с шагом 0,1 м для изотопного анализа, которые помещали в полиэтиленовые пакеты и растапливали при комнатной температуре.

10 августа 2016 г. в северной части языка ледника Серп и Молот из стенки 15-метровой вертикальной трещины отобрано 58 образцов для определения $\delta^{18}O$ и δD в ледниковом льду. Трещина расположена вблизи левого борта, в 300 м от края ледника, и простирается в юго-восточном направлении (см. рис. 1). В интервале глубин 0–5 м от поверхности образцы льда отбирались с шагом 0,2 м, а на глубинах 5–8 м – с шагом 0,1 м.

Перед лабораторной обработкой образцы со всех ледников хранились в замороженном состоянии и растапливались непосредственно перед началом анализов. Анализ на содержание стабильных изотопов ^{18}O и D выполнялся на лазерном анализаторе изотопного состава Picarro L-2120*i* в Лаборатории изменений климата и окружающей среды (ЛИКОС) Арктического и Антарктического научно-исследовательского института (ААНИИ). Каждый образец анализировался один раз, через каждые пять измерений определяли внутренний стандарт лаборатории, близкий по изотопному составу к значениям исследуемых образцов. Некоторые случайно выбранные образцы (10% общего числа) анализировали дважды для контроля качества измерений. Воспроизводимость результатов составила 0,06 ‰ для $\delta^{18}O$ и 0,30 ‰ для δD. Всего проанализировано 122 образца.

Результаты и обсуждение

Средние значения и диапазон изменчивости изотопного состава снега, фирна и льда из кернов представлены в табл. 1. Распределение изотопного состава по глубине показано на рис. 4. Все три керна отобраны вдоль одного профиля на поверхности Северного ледникового купола [33]. Первый из них (скв. 1) представлен нестаявшим остатком сезонного снежного покрова со средним значением $\delta^{18}O$, равным −11,36 ‰. Второй керн (скв. 2) получен из зоны наложенного льда в

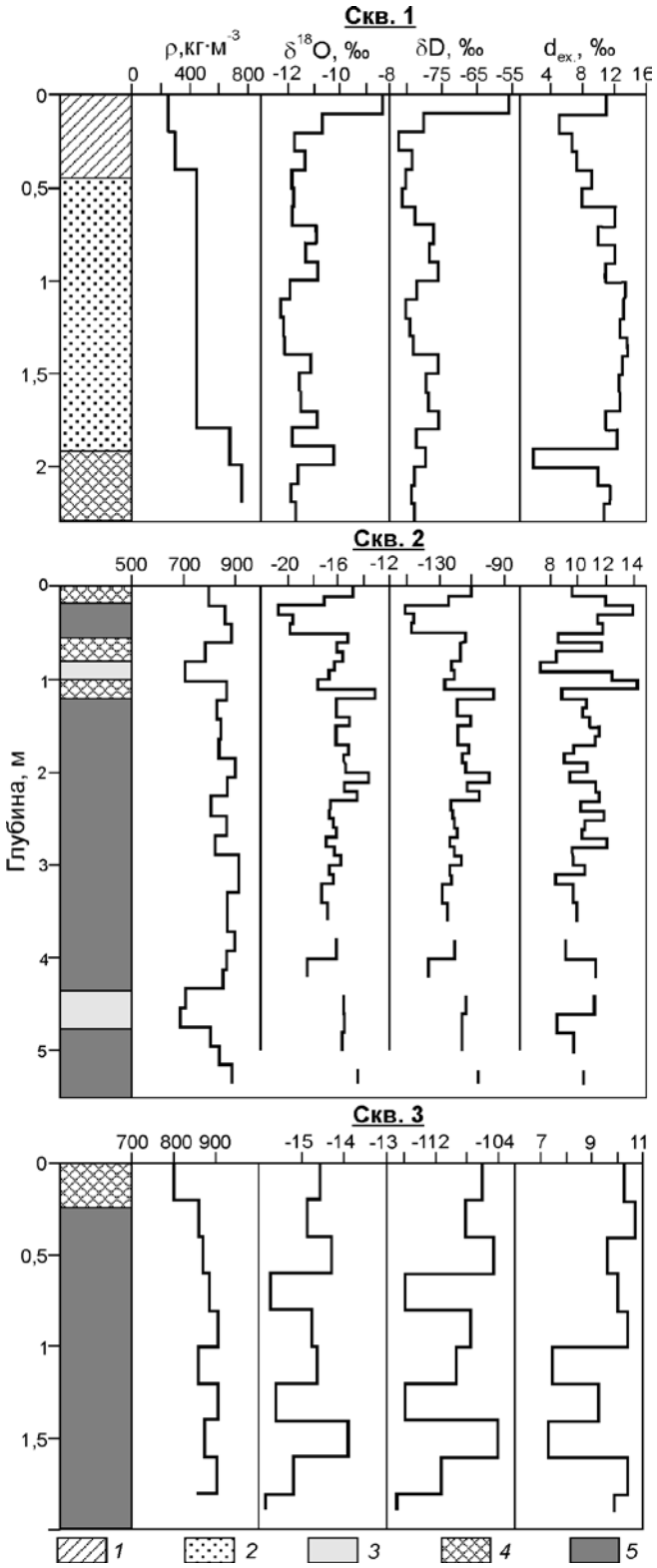

Рис. 4. Стратиграфическое строение (левая колонка), плотность ρ, содержание $\delta^{18}O$, δD и дейтериевого эксцесса d_{ex} в снежно-фирновых кернах, полученных на Северном ледниковом куполе Новой Земли в 2015 г. в скв. 1, 2 и 3:
1 – метелевый снег; *2* – фирнизованный снег; *3* – фирн; *4* – инфильтрационно-конжеляционный (наложенный) лёд; *5* – инфильтрационный лёд

Fig. 4. Ice core stratigraphy (left column), density ρ, stable isotopic ($\delta^{18}O$ and δD) content, and deuterium access d_{ex} for the ice cores 1, 2, and 3 from Northern Ice Cap of Novaya Zemlya in 2015:
1 – fresh snow; *2* – firn snow; *3* – firn; *4* – infiltration-congelation (superimposed) ice; *5* – infiltration ice

непосредственной близости от снеговой границы. Средняя величина $\delta^{18}O$ составила −16,27 ‰. Третий керн (скв. 3) представлен ледниковым льдом. Для верхних двух метров льда из области абляции Северного ледникового купола среднее значение $\delta^{18}O$ составляет −14,93 ‰.

На рис. 5 профиль *1* (нестаявший остаток сезонного снега) имеет более тяжёлый изотопный

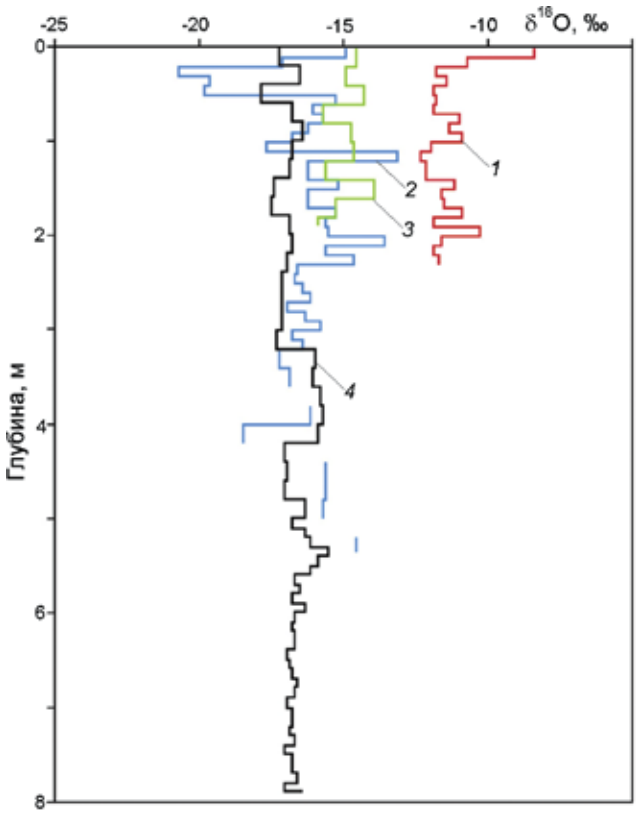

Рис. 5. Содержание $\delta^{18}O$ в кернах из скв. 1 (*1*), 2 (*2*), 3 (*3*), пробуренных на Северном ледниковом куполе, и из вертикальной стенки трещины на языке ледника Серп и Молот (*4*).
Координаты точек отбора образцов приведены в табл. 1
Fig. 5. Stable water isotopic composition ($\delta^{18}O$) in the ice cores 1 (*1*), 2 (*2*), and 3 (*3*) from Northern Ice Cap and in the ice samples collected from vertical wall of the crevasse in Serp and Molot Glacier tongue (*4*).
Characteristics of the sampling sites are given in Table 1

состав по сравнению с ледниковым льдом. Верхний горизонт представляет собой слой свежевыпавшего снега, сформировавшийся из осадков, выпавших на поверхность ледника в начале сентября. Многочисленные осцилляции изотопного состава во вскрытой снежной толще свидетельствуют о значительном таянии и инфильтрации талых вод, что приводит к гомогенизации изотопного профиля. Отдельные пики на этом профиле связаны с унаследованной стратиграфией снежной толщи и режимом снеготаяния, когда при продвижении фронта таяния вниз по разрезу происходят вторичное замерзание воды и формирование прослоев инфильтрационного льда. При этом все различия в изотопном составе снега постепенно сглаживаются.

В 300 м ниже по леднику получен керн льда в инфильтрационно-конжеляционной зоне льдообразования (зоне наложенного льда), где на поверхность выходят слои, представленные талой водой, вторично замёрзшей в слоях сезонного снега. Этот керн представлен льдом, сформировавшимся в области питания ледника и вышедшим на поверхность в результате движения льда и абляции. Изотопно-кислородный профиль льда из данной скважины (профиль *2* – голубая линия на рис. 5) сдвинут относительно нестаявшего остатка сезонного снежного покрова (профиль *1* на рис. 5). Верхняя часть этого керна сформировалась в результате повторного замерзания изотопически более лёгкого зимнего снега. Ниже по разрезу мы наблюдаем постепенное снижение амплитуды колебаний изотопного состава льда, что указывает на интенсивное таяние и гомогенизацию снежно-фирновой толщи. Об этом же свидетельствуют данные из скв. 3 (профиль *3* на рис. 5).

Изотопный профиль *4* на рис. 5 отражает результаты исследования образцов льда из стенки трещины на языке ледника Серп и Молот, расположенного на 220 км южнее Северного ледникового купола. Среднее значение $\delta^{18}O$ для 8-метровой толщи льда составило −16,66 ‰ при незначительных вариациях в пределах −15,51 ÷ −17,78 ‰. Значительная гомогенизация изотопного профиля свидетельствует о достаточно тёплых условиях (с большим количеством талой воды) летнего периода в районе ледораздела, где сформировались слои льда, вышедшие на поверхность на языке ледника. Сравнивая изотопные профили этих двух ледников, мы не наблюдаем существенных различий в изотопном составе современных горизонтов и слоёв, сформировавшихся в более ранний период. В настоящее время можно лишь косвенно судить о возрасте этих горизонтов, который пропорционален величине аккумуляции, толщине льда и скорости его течения. Из опубликованных данных [3, 4] известно, что во время глобальных похолоданий изотопный состав ледникового льда характеризовался более лёгкими значениями, а переход от ледниковья к межледниковьям сопровождался резким сдвигом изотопного сигнала, чего не наблюдается в исследованных изотопных профилях с Новой Земли. Данные горизонты были сформированы в относительно тёплых условиях голоцена.

Значительный сдвиг в изотопном составе сезонного снега в сторону «более тёплых» условий может быть свидетельством формирования современных осадков в более тёплых условиях. Для проверки этой гипотезы мы проанализировали данные многолетней изменчивости изотопного состава атмосферных осадков, полученные на станциях GNIP [5]. Однако на рис. 3, *а* видно, что никакого тренда утяжеления изотопного состава осадков не наблюдается, а представленный профиль *1* на рис. 5 отражает процесс гомогенизации изотопных данных. При таянии верхних горизонтов, состоящих из летнего изотопно более тяжёлого снега, инфильтрующаяся вода на 50% заполняет поры в нижележащих слоях снега с более лёгким изотопным составом, о чём говорит профиль плотности на рис. 4 (скв. 1). В результате средние значения $\delta^{18}O$ выравниваются. На профиле из скв. 2 (см. рис. 4, 5), расположенной выше по течению ледника, где разрез формировался в течение нескольких лет, а не одного сезона, как в случае снежной толщи, наблюдается уже более гомогенизированный и осреднённый профиль. А на леднике Серп и Молот это уже полностью гомогенизированный профиль, отражающий средний изотопный состав атмосферных осадков, выпадавших на поверхность ледника.

Совместный анализ изотопного состава кислорода ^{18}O и водорода D, входящих в состав молекул воды, позволяет получить дополнительную информацию об атмосферных осадках. В глобальном масштабе при равновесных условиях формирования осадков соотношение этих двух изотопов имеет следующий вид: $\delta D = 8\delta^{18}O + 10$ и названо Х. Крэйгом [34] *глобальным уравнением метеорных вод*. Для Новой Земли информация о связи δD–$\delta^{18}O$ отсутствует полностью. На рис. 6 приведены данные об изотопном составе

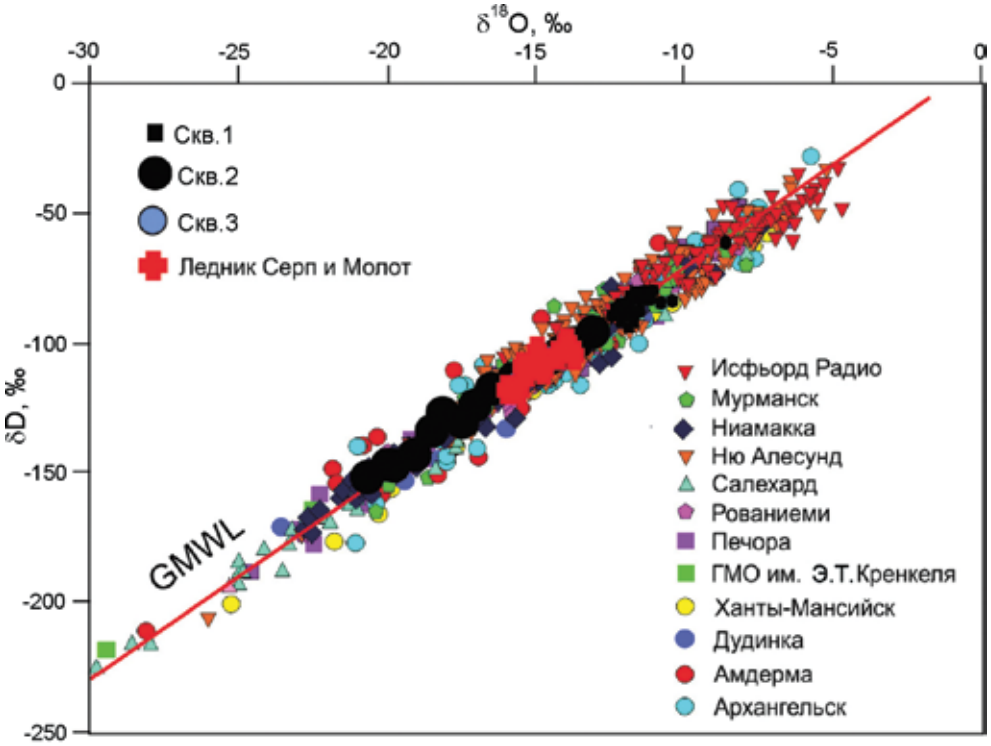

Рис. 6. Линии метеорных вод для станций GNIP (координаты станций приведены в табл. 2) и для образцов с ледников Новой Земли – скважин Северного ледникового купола и ледника Серп и Молот.
Координаты точек отбора образцов и статистические характеристики связей $\delta^{18}O$–δD приведены в табл. 2. Глобальная линия метеорных вод (GMWL) показана красной линией

Fig. 6. Meteoric water lines for GNIP stations (listed at the right section of the figure) and sampling sites from Novaya Zemlya glaciers: ice cores from Northern Ice Cap and vertical wall of the crevasse in Serp and Molot Glacier tongue (listed on the left).
Characteristics of the sampling sites and statistical data of $\delta^{18}O$–δD relationship are given in Table 2. Global meteoric water line (GMWL) is shown as a red line

Таблица 2. **Соотношение δD–δ^{18}O на станциях GNIP и в точках отбора образцов на Новой Земле**

Станция (в скобках дан GNIP-код)	Координаты, градусы	Высота, м	Период наблюдений, годы	$\delta D = a\delta^{18}O + b$	R^2
Норвегия					
Исфьорд Радио (100500)	С.ш. 78,070000 В.д. 13,630000	6	1960–1976	$y = 6{,}46x - 5{,}98$	0,91
Ню Алесунд (0100400)	С.ш. 78,916667 В.д. 11,933333	7	1990–2014	$y = 7{,}26x + 0{,}74$	0,92
Швеция					
Ниамакка (0206000)	С.ш. 68,683333 В.д. 21,530000	403	1990–1995	$y = 7{,}61x + 2{,}58$	0,97
Финляндия					
Рованиеми (0284500)	С.ш. 66,496944 В.д. 25,755278	107	2003–2010	$y = 7{,}66x + 4{,}60$	0,98
Россия					
Мурманск (2211300)	С.ш. 68,966667 В.д. 33,050000	46	1980–1990	$y = 7{,}78x + 5{,}77$	0,92
ГМО им. Кренкеля (2004600)	С.ш. 80,6166675 В.д. 8,050000	20	1990	$y = 7{,}63x + 8{,}16$	0,99
Амдерма (2302200)	С.ш. 69,7666676 В.д. 1,683333	53	1980–1990	$y = 7{,}64x + 7{,}35$	0,91
Дудинка (2307400)	С.ш. 69,4075008 В.д. 6,180556	66	1973–1990	$y = 6{,}98x - 12{,}23$	0,95
Ханты-Мансийск (2393300)	С.ш. 60,9666676 В.д. 9,066667	40	1996–2000	$y = 7{,}98x - 0{,}02$	0,99
Печора (2341800)	С.ш. 65,1166675 В.д. 7,100000	56	1980–1990	$y = 7{,}89x + 8{,}14$	0.97
Салехард (2333000)	С.ш. 66,5333336 В.д. 6,666667	16	1973–2000	$y = 7{,}86x + 1{,}21$	0,99
Архангельск (2255000)	С.ш. 64,5800004 В.д. 0,500000	13	1969–1990	$y = 7{,}96x + 6{,}43$	0,92
Северный ледниковый купол Новой Земли:					
скв. 1	С.ш. 76,8521836 В.д. 7,579350	35	2015	$y = 6{,}78x - 3{,}36$	0,81
скв. 2	С.ш. 76,8521836 В.д. 7,659317	437	2015	$y = 7{,}48x + 1{,}98$	0,99
скв. 3	С.ш. 76,51434 В.д. 67,659317	386	2015	$y = 7{,}17x - 2{,}78$	0,95
Ледник Серп и Молот, Новая Земля	С.ш. 74,935583 В.д. 58,368717	48	2016	$y = 7{,}01x - 4{,}45$	0,97

атмосферных осадков на станциях GNIP в арктических районах Северной Атлантики, расположенных в сходных климатических условиях. Все они лежат вблизи глобальной линии метеорных вод, что указывает на равновесные условия формирования осадков. Здесь же показаны данные по изотопному составу на ледниках Новой Земли (табл. 2). Их положение на линии метеорных вод также указывает на равновесные условия формирования осадков и малую роль постдепозиционных процессов при льдообразовании. Незначительные отличия коэффициентов регрессии в уравнении метеорных вод для осадков на станциях GNIP и в ледниковом льду на Новой Земле свидетельствуют о схожих условиях формирования воздушных масс, приносящих осадки на станции GNIP и на ледники. В изменениях эксцесса дейтерия ($d = \delta D - 8\delta^{18}O$) [35] не установлено никаких сезонных колебаний, а его значения не превышают 15 ‰, что указывает на

крайне незначительную долю континентальной влаги в выпадающих осадках.

Помимо станций GNIP, данные об изотопном составе снега и льда получены при исследованиях на архипелагах Шпицберген, Земля Франца-Иосифа и Северная Земля (см. табл. 1). Сравнение этих данных с результатами, полученными нами на Новой Земле, показывает, что наилучшая сохранность изотопных профилей наблюдается в ледниковой толще самых высоких куполов Земли Франца-Иосифа и Северной Земли. В современных условиях на Новой Земле в результате значительного таяния первоначальный изотопный состав атмосферных осадков к концу сезона абляции сильно усредняется, а в течение нескольких лет практически полностью гомогенизирует.

Заключение

Исследования изотопного состава снежного покрова и ледникового льда на Новой Земле показали, что абсолютные значения и диапазон изменчивости $\delta^{18}O$ и δD характерны для географического положения архипелага. Анализ изотопных профилей для ледников Новой Земли свидетельствует о наличии значительного таяния. Это относится не только к современным приповерхностным горизонтам снега, но и к той части ледниковой толщи, которая сформировалась в самой высокой части архипелага в районе ледораздела и вышла на поверхность на конце языка ледника Серп и Молот. Поэтому с палеогеографической точки зрения наибольший интерес может иметь вершинная часть Северного ледникового купола, где вероятно наличие холодных горизонтов, отложенных во время малого ледникового периода, в которых присутствует изотопно-геохимическая стратификация. Сравнение изотопного состава сезонного снега, ледникового льда и атмосферных осадков на станциях GNIP показало, что различие в значениях $\delta^{18}O$ и δD не связано с потеплением климата, а представляет собой последовательную гомогенизацию изотопных профилей в результате последовательного стаивания летних (изотопно более тяжёлых) слоёв снега и замерзании образовавшейся талой воды в толще изотопно более лёгкого зимнего снега. Несколько последовательных циклов данного процесса в течение ряда лет ведут к почти полному сглаживанию изначального изотопного сигнала, присутствовавшего в атмосферных осадках в момент их выпадения на поверхность ледников.

Благодарности. Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РНФ-14-17-00764. Р.А. Чернов проводил исследования гидротермического режима ледников Новой Земли в соответствии с Государственной программой фундаментальных научных исследований (ГП 14) по теме «Оценки современного состояния и текущих изменений внутреннего гидротермического режима ледников, с выделением данных по эталонным ледникам» (0148-2014-0006). При написании данной работы использованы неопубликованные метеорологические данные, любезно предоставленные Е.А. Александровым (ААНИИ).

Acknowledgments. This work was supported by the RNF grant 14-17-00764. R.A. Chernov conducted research on the hydrothermal regime of the glaciers of Novaya Zemlya in accordance with the State program of fundamental scientific research (GP 14) «Estimates of the current state and current changes in the internal hydrothermal regime of glaciers, with data on reference glaciers» (0148-2014-0006). Unpublished meteorological data were used in writing this work, courtesy of E.A. Alexandrov (AARI).

Литература

1. *Yoshimura K., Miyoshi T., Kanamitsu M.* Observation system simulation experiments using water vapor isotope information // Journ. of Geophys. Research. Atmosphere. 2014. V. 119. P. 7842–7862. doi: 10.1002/2014JD021662.
2. *Gryazin V., Risi C., Jouzel J., Kurita N., Worden J., Frankenberg C., Bastikov V., Gribanov K., Stukova O.* To what

References

1. *Yoshimura K., Miyoshi T., Kanamitsu M.* Observation system simulation experiments using water vapor isotope information. Journ. of Geophys. Research. Atmosphere. 2014, 119: 7842–7862. doi: 10.1002/2014JD021662.
2. *Gryazin V., Risi C., Jouzel J., Kurita N., Worden J., Frankenberg C., Bastikov V., Gribanov K., Stukova O.* To

extent could water isotopic measurements help us understand model biases in the water cycle over Western Siberia // Atmospheric Chemistry and Physics. 2014. V. 14. P. 9807–9830. doi: 10.5194/acp-14-9807-2014.

3. *Екайкин А.А.* Стабильные изотопы воды в гляциологии и палеогеографии. СПб.: изд. ААНИИ, 2016. 63 с.
4. *Dansgaard W., Johnsen S.J., Møller J., Langway C.C.* One thousand centuries of climatic record from Camp Century on the Greenland ice sheet // Science. 1969. V. 166 (3903). P. 377–380.
5. *Masson-Delmotte V., Dreyfus G., Braconnot P., Johnsen S., Jouzel J., Kageyama M., Landias A., Loutre M.-F., Nouet J., Parrenin F., Raynaud D., Stenni B., Tuenter E.* Past temperature reconstructions from deep ice cores: relevance for future climate change // Climate of the Past. 2006. V. 2. P. 145–165. doi: 10.5194/cp-2-145-2006.
6. *Ekaykin A.A., Lipenkov V.Ya.* Formation of the ice core isotopic composition // Physics of Ice Core Records II / Ed. by T. Hondoh. Low Temperature Science Suppl. Issue. 2009. V. 68. P. 299–314.
7. Электронный ресурс: http://www-naweb.iaea.org/napc/ih/IHS_resources_gnip.html
8. *Брезгунов В.С., Есиков А.Д., Ферронский В.И., Сальнова Л.В.* Пространственно-временные вариации изотопного состава кислорода атмосферных осадков и речных вод на территории северной части Евразии их связь с использованием температуры // Водные ресурсы. 1998. Т. 25. № 1. С. 73–84.
9. *Ферронский В.И., Поляков В.А.* Изотопия гидросферы Земли. М.: Научный мир, 2009. 632 с.
10. *Малыгина Н.С., Эйрих А.Н., Курепина Н.Ю., Папина Т.С.* Изотопный состав зимних атмосферных осадков и снежного покрова в переходной зоне Алтая // Лёд и Снег. 2017. Т. 57. № 1. С. 57–68. doi: 10.15356/2076-6734-2017-1-57-68.
11. *Steen-Larsen H.C., Johnsen S.J., Masson-Delmotte V., Stenni B., Risi C., Sodemann H., Baslev-Clausen D., Blunier T., Dahl-Jensen D., Ellehøj M.D., Falourd S., Grindsted A., Gkinis V., Jouzel J., Popp T., Sheldon S., Simonsen S.B., Sjolte J., Steffensen J.P., Sperilich P., Svenbjönsdóttir A.E., Vinther B.M., White J.W.C.* Continuous monitoring of summer surface water vapor isotopic composition above the Greenland Ice Sheet // Atmospheric Chemistry and Physics. 2013. V. 13. P. 4815–4828. doi: 10.5194/acp-13-4815-2013.
12. *Николаев В.И., Осокин Н.И., Зазовская Э.П.* Формирование изотопного состава снега на ледниках Арктики (на примере Шпицбергена и Северной Земли) // Лёд и Снег. 2014. Т. 54. № 1. С. 61–65. doi: 10.15356/2076-6734-2014-1-61-65.
13. *Kobashi T., Kawamura K., Severinghaus J.P., Barnola J.M., Nakaegawa T., Vinther B.M., Johnsen S.J., Box J.E.* High variability of Greenland surface temperature over the past 4000 years estimated from trapped

what extent could water isotopic measurements help us understand model biases in the water cycle over Western Siberia. Atmospheric Chemistry and Physics. 2014, 14: 9807–9830. doi: 10.5194/acp-14-9807-2014.

3. *Ekaykin A.A. Stabil'nye izotopy vody v glyatsiologii i paleogeografii.* Stable water isotopes in glaciology and paleogeography. St. Petersburg, AARI, 2016. 63 p. [In Russian].
4. *Dansgaard W., Johnsen S.J., Møller J., Langway C.C.* One thousand centuries of climatic record from Camp Century on the Greenland ice sheet. Science. 1969, 166 (3903): 377–380.
5. *Masson-Delmotte V., Dreyfus G., Braconnot P., Johnsen S., Jouzel J., Kageyama M., Landias A., Loutre M.-F., Nouet J., Parrenin F., Raynaud D., Stenni B., Tuenter E.* Past temperature reconstructions from deep ice cores: relevance for future climate change. Climate of the Past. 2006, 2: 145–165. doi: 10.5194/cp-2-145-2006.
6. *Ekaykin A.A., Lipenkov V.Ya.* Formation of the ice core isotopic composition. Physics of Ice Core Records II. Ed. by T. Hondoh. Low Temperature Science Suppl. Issue. 2009, 68: 299–314.
7. http://www-naweb.iaea.org/napc/ih/IHS_resources_gnip.html
8. *Brezgunov V.S., Esikov A.D., Ferronsky V.I., Salnova L.V.* Spatial and temporal variations of the oxygen isotopic composition of precipitation and river waters in the northern part of Eurasia and their relationship with temperature. *Vodnye resursy.* Water Resources. 1998, 25 (1): 73–84. [In Russian].
9. *Ferronsky V.I., Polyakov V.A. Izotopiya gidrosfery Zemli.* Isotopes of the Earth hydrosphere. Moscow: Nauchniy Mir, 2009: 632 p. [In Russian].
10. *Malygina N.S., Eirikh A.N., Kurepina N.Yu., Papina T.S.* Isotopic composition of winter precipitation and snow cover in the transition zone of the Altai. *Led i Sneg.* Ice and Snow. 2017, 57 (1): 57–68. doi: 10.15356/2076-6734-2017-1-57-68. [In Russian].
11. *Steen-Larsen H.C., Johnsen S.J., Masson-Delmotte V., Stenni B., Risi C., Sodemann H., Baslev-Clausen D., Blunier T., Dahl-Jensen D., Ellehøj M.D., Falourd S., Grindsted A., Gkinis V., Jouzel J., Popp T., Sheldon S., Simonsen S.B., Sjolte J., Steffensen J.P., Sperilich P., Svenbjönsdóttir A.E., Vinther B.M., White J.W.C.* Continuous monitoring of summer surface water vapor isotopic composition above the Greenland Ice Sheet. Atmospheric Chemistry and Physics. 2013, 13: 4815–4828. doi: 10.5194/acp-13-4815-2013.
12. *Nikolaev V.I., Osokin N.I., Zazovskaya E.P.* Formation of the isotopic composition of snow on the glaciers of the Arctic (for example, Spitsbergen and the North of the Earth). *Led i Sneg.* Ice and Snow. 2014, 54 (1): 61–65. doi: 10.15356/2076-6734-2014-1-61-65. [In Russian].
13. *Kobashi T., Kawamura K., Severinghaus J.P., Barnola J.M., Nakaegawa T., Vinther B.M., Johnsen S.J., Box J.E.* High variability of Greenland surface temper-

air in an ice core // Geophys. Research Letters. 2011. V. 38. № 21. doi: 10.1029/2011GL049444.

14. NEEM community members. Eemian interglacial reconstructed from a Greenland folded ice core // Nature. 2013. V. 493. № 7433. P. 489–494. doi: 10.1038/nature11789.
15. *Isaksson E., Kohler J., Pohjola V., Moore J., Igarashi M., Karlöf L., Martma T., Harro Meijer, Motoyama H., Vaikmäe R., van de Wal R.S.* Two ice-core δ18O records from Svalbard illustrating climate and sea-ice variability over the last 400 years // The Holocene. 2005. V. 15. № 4. P. 501–509. doi: 10.1191/0959683605hl820rp.
16. *Stiévenard M., Nikolaev V., Bol'shiyanov D.Yu., Fléhoc C., Jouzel J., Klementyev O.L., Souchez R.* Pleistocene ice at the bottom of the Vavilov Ice Cap, Severnaya Zemlya, Russian Arctic // Journ. of Glaciology. 1996. V. 42. № 142. P. 403–406.
17. *Opel T., Frietzsche D., Meyer H., Schüett R., Weiler K., Ruth U., Wilhelms F., Fischer H.* 115 year ice-core data from Akademii Nauk ice cap, Severnaya Zemlya: high-resolution record of Eurasian Arctic climate change // Journ. of Glaciology. 2009. V. 55. № 189. P. 21–31. doi: 10.3189/002214309788609029.
18. *Henderson K.A.* An ice core paleoclimate study of Windy Dome, Franz Josef Land (Russia): development of a recent climate history for the Barents Sea. Dissertation for the Degree Doctor of Philosophy in the Graduate School of the Ohio State University. The Ohio State University. 2002. 217 p.
19. *Kotlyakov V.M., Arkhipov S.M., Henderson K.A., Nagornov O.V.* Deep drilling of glaciers in Eurasian Arctic as a source of paleoclimatic records // Quaternary Science Reviews. 2004. V. 23. P. 1371–1390. doi: 10.1016/j.quasirev.2003.12.013.
20. *Leibman M.O., Arkhipov S.M., Perednya D.D., Savvichev A.S., Vanstein B.G., Hubberten H.-W.* Geochemical properties of the water–snow–ice complexes in the area of Shokalsky glacier, Novaya Zemlya, in relation to tabular ground-ice formation // Annals of Glaciology. 2005. V. 42. P. 249–254. doi: 10.3189/172756405781812952.
21. *Pfeffer W.T., Arendt A.A., Bliss A., Bolch T., Cogley J.G., Gardner A.S., Hagen J.-O., Hock R., Kaser G., Keinholtz C., Miles E.S., Moholdt G., Mölg N., Paul F., Radic V., Rastner P., Raup B.H., Rich J., Sharp M.J.,* The Randolph consortium. The Randolph Glacier Inventory: a globally complete inventory of glaciers // Journ. of Glaciology. 2014. V. 60. № 221. P. 537–552. doi: 10.3189/2014JoG13J176.
22. *Ермолаев М.М.* Работы Новоземельской гляциологической станции в Русской Гавани // Бюл. Арктического института. 1934. № 1. С. 50–55.
23. *Ермолаев М.М.* Гляциологическая экскурсия на ледник Шокальского в Русской Гавани // Новоземельские экскурсии, 2. Международный геологический конгресс, 17-й

ature over the past 4000 years estimated from trapped air in an ice core. Geophys. Research Letters. 2011, 38 (21). doi: 10.1029/20 11GL049444.

14. NEEM community members. Eemian interglacial reconstructed from a Greenland folded ice core. Nature. 2013, 493 (7433): 489–494. doi: 10.1038/nature11789.
15. *Isaksson E., Kohler J., Pohjola V., Moore J., Igarashi M., Karlöf L., Martma T., Harro Meijer, Motoyama H., Vaikmäe R., van de Wal R.S.* Two ice-core δ18O records from Svalbard illustrating climate and sea-ice variability over the last 400 years. The Holocene. 2005, 15 (4): 501–509. doi: 10.1191/0959683605hl820rp.
16. *Stiévenard M., Nikolaev V., Bol'shiyanov D.Yu., Fléhoc C., Jouzel J., Klementyev O.L., Souchez R.* Pleistocene ice at the bottom of the Vavilov Ice Cap, Severnaya Zemlya, Russian Arctic. Journ. of Glaciology. 1996, 42 (142): 403–406.
17. *Opel T., Frietzsche D., Meyer H., Schüett R., Weiler K., Ruth U., Wilhelms F., Fischer H.* 115 year ice-core data from Akademii Nauk ice cap, Severnaya Zemlya: high-resolution record of Eurasian Arctic climate change. Journ. of Glaciology. 2009, 55 (189): 21–31. doi: 10.3189/002214309788609029.
18. *Henderson K.A.* An ice core paleoclimate study of Windy Dome, Franz Josef Land (Russia): development of a recent climate history for the Barents Sea. Dissertation for the Degree Doctor of Philosophy in the Graduate School of the Ohio State University. The Ohio State University. 2002: 217 p.
19. *Kotlyakov V.M., Arkhipov S.M., Henderson K.A., Nagornov O.V.* Deep drilling of glaciers in Eurasian Arctic as a source of paleoclimatic records // Quaternary Science Reviews. 2004, 23: 1371–1390. doi: 10.1016/j.quasirev.2003.12.013.
20. *Leibman M.O., Arkhipov S.M., Perednya D.D., Savvichev A.S., Vanstein B.G., Hubberten H.-W.* Geochemical properties of the water–snow–ice complexes in the area of Shokalsky glacier, Novaya Zemlya, in relation to tabular ground-ice formation. Annals of Glaciology. 2005, 42: 249–254. doi: 10.3189/172756405781812952.
21. *Pfeffer W.T., Arendt A.A., Bliss A., Bolch T., Cogley J.G., Gardner A.S., Hagen J.-O., Hock R., Kaser G., Keinholtz C., Miles E.S., Moholdt G., Mölg N., Paul F., Radic V., Rastner P., Raup B.H., Rich J., Sharp M.J.* The Randolph consortium. The Randolph Glacier Inventory: a globally complete inventory of glaciers. Journ. of Glaciology. 2014, 60 (221): 537–552. doi: 10.3189/2014JoG13J176.
22. *Ermolaev M.M.* Works of Novaya Zemlya glaciological station in Russkaya Gavan. *Byulleten' Arkticheskogo instituta.* Arctic Institute Bulletin. 1934, 1: 50–55. [In Russian].
23. *Ermolaev M.M.* Glaciological excursion to the Shokalski Glacier in Russkaya Gavan. In: Novaya Zemlya excursions, 2. Intern. Geological Congress, 17th

мельская экскурсия. Ч. 2. Международный геологический конгресс, 17-я сессия. М.: Изд-во Главсевморпути, 1937. 160 с.
24. *Чижов О.П., Корякин В.С., Давидович Н.В., Каневский З.М., Зингер Е.М., Бажева В.Я., Бажев А.Б., Хмелевской И.Ф.* Оледенение Новой Земли. М.: Наука, 1968. 338 с.
25. *Лаврентьев И.И.* Изменение ледников Новой Земли с 1952 по 2015 гг. // Тезисы докладов на XVI Гляциол. симпозиуме, Санкт-Петербург, 24–27 мая 2016 г. М.: изд. Института географии РАН, 2016. С. 116.
26. Каталог ледников СССР: Т. 3. Северный край. Ч. 2. Новая Земля. Л.: Гидрометеоиздат, 1978. 112 с.
27. *Pfirman S.L., Bauch D., Gammelsrød T.* The Northern Barents Sea: Water Mass Distribution and Modification, in The Polar Oceans and Their Role in Shaping the Global Environment / Eds: O.M. Johannessen, R.D. Muench and J.E. Overland. American Geophysical Union, Geophysical Monograph 85, Washington D.C. 1994. doi: 10.1029/GM085p0077.
28. *Walsh J.E.* Climate of the Arctic marine environment // Ecological applications. 2008. V. 18. № 2. P. 3–22. doi: 10.1890/06-0503.1.
29. Обзор гидрометеорологических процессов в Северном Ледовитом океане, 2014 / Ред. И.Е. Фролов. СПб.: изд. ААНИИ, 2015. 116 с.
30. *Polyakov I.V., Bekryaev R.V., Alekseev G.V., Bhatt U.S., Colony R.L., Johnson M.A., Makshtas A.P., Walsh D.* Variability and trends of air temperature and pressure in the maritime Arctic, 1875–2000 // Journ. of Climate. 2003. V. 16. P. 2067–2077. doi: 10.1175/1520-0442(2003)016.
31. *Radionov V.F., Aleksandrov Ye.I., Svyashchennikov P.N., Fetterer F.* Daily precipitation sums at coastal and island Russian Arctic stations, 1940-1990. Boulder, CO: National Snow and Ice Data Center. 2004. doi: 10.7265/N5JS9NCS.
32. *Zeeberg J., Forman S.L.* Changes in glacier extent on north Novaya Zemlya in the twentieth century // The Holocene. 2001. V. 11. № 2. P. 161–175. doi: 10.1191/095968301676173261.
33. *Чернов Р.А., Кудиков А.В., Мирошников А.Ю.* Первые результаты радиационно-гляциологических исследований Северного ледникового купола // Успехи современного естествознания. 2016. № 11. С. 197–201.
34. *Craig H.* Isotopic variations in meteoric waters // Science. 1961. V. 133. P. 1702–1703. doi: 10.1126/science.133.3465.1702.
35. *Aemisegger F., Pfahl S., Sodemann H., Lehner I., Seneviratne S.I., Wernli H.* Deuterium excess as a proxy for continental moisture recycling and plant transpiration // Atmospheric Chemistry and Physics. 2014. V. 14. P. 4029–4054. doi: 10.5194/acp-14-4029-2014.

session. Moscow: Glavsevmorput Publishing House, 1937. 160 p. [In Russian].
24. *Chizhov O.P., Koryakin V.S., Davidovich N.V., Kanevsky Z.M., Zinger E.M., Bazheva V.Ya., Bazhev A.B., Khmelevskoy I.F. Oledenenie Novoy Zemli.* Glaciation of Novaya Zemlya. Moscow: Nauka, 1968: 338 p. [In Russian].
25. *Lavrentiev I.I.* Changes of Novaya Zemlya glaciers in 1952–2015. Abstracts of the XVI Glaciological Symposium, St. Peretsburg, 24–27 May 2016. 2016: 116. [In Russian].
26. *Katalog lednikov SSSR.* USSR Glacier Inventory. V. 3. Pt. 2. Leningrad: Hydrometeoizdat, 1978: 112 p.
27. *Pfirman S.L., Bauch D., Gammelsrød T.* The Northern Barents Sea: Water Mass Distribution and Modification. In: The polar oceans and their role in shaping the global environment. Eds. O.M. Johannessen, R.D. Muench and J.E. Overland. American Geophysical Union, Geophysical Monograph 85, Washington D.C. 1994. doi: 10.1029/GM085p0077.
28. *Walsh J.E.* Climate of the Arctic marine environment. Ecological applications. 2008, 18 (2): 3–22. doi: 10.1890/06-0503.1.
29. *Obzor gidrometeorologicheskikh protsessov v Severnom Ledovitom okeane.* Overview of hydrometeorological processes in the Arctic Ocean, 2014. Ed. by I.E. Frolov. Sankt Petersburg, AARI, 2015: 116 p. [In Russian].
30. *Polyakov I.V., Bekryaev R.V., Alekseev G.V., Bhatt U.S., Colony R.L., Johnson M.A., Makshtas A.P., Walsh D.* Variability and trends of air temperature and pressure in the maritime Arctic, 1875–2000. Journ. of Climate. 2003, 16: 2067–2077. doi: 10.1175/1520-0442(2003)016.
31. *Radionov V.F., Aleksandrov Ye.I., Svyashchennikov P.N., Fetterer F.* Daily precipitation sums at coastal and island Russian Arctic stations, 1940–1990. Boulder, CO: National Snow and Ice Data Center. 2004. doi: 10.7265/N5JS9NCS.
32. *Zeeberg J., Forman S.L.* Changes in glacier extent on north Novaya Zemlya in the twentieth century. The Holocene. 2001, 11 (2): 161–175. doi: 10.1191/095968301676173261.
33. *Chernov R.A., Kudikov A.B., Miroshnikov A.Yu.* First results of the glaciological research of the Northern Ice Cap in Novaya Zemlya. *Uspekhi sovremennogo estestvoznaniya.* The success of modern natural science. 2016, 11: 197– 201. [In Russian].
34. *Craig H.* Isotopic variations in meteoric waters. Science. 1961, 133: 1702–1703. doi: 10.1126/science.133.3465.1702.
35. *Aemisegger F., Pfahl S., Sodemann H., Lehner I., Seneviratne S.I., Wernli H.* Deuterium excess as a proxy for continental moisture recycling and plant transpiration. Atmospheric Chemistry and Physics. 2014, 14: 4029–4054. doi: 10.5194/acp-14-4029-2014.