

СНЕЖНЫЙ ПОКРОВ И СНЕЖНЫЕ ЛАВИНЫ

УДК 551.583.15

doi: 10.31857/S2076673420030046

Изотопный состав атмосферных осадков и природных вод в районе Баренцбурга (Шпицберген)

© 2020 г. А.А. Скакун^{1,2*}, К.Б. Чихачев¹, А.А. Екайкин^{1,3}, А.В. Козачек^{1,4},
Д.О. Владимирова⁴, А.Н. Верес^{1,3}, С.Р. Веркулич¹, О.Р. Сидорова¹, Н.Э. Демидов¹

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

²Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория (ГАО РАН), Санкт-Петербург, Россия; ³Институт наук о Земле, Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия; ⁴Институт географии РАН, Москва, Россия

*a_skakun@mail.ru

Stable isotopic composition of atmospheric precipitation and natural waters in the vicinity of Barentsburg (Svalbard)

A.A. Skakun^{1,2*}, K.B. Chikhachev¹, A.A. Ekaykin^{1,3}, A.V. Kozachek^{1,4}, D.O. Vladimirova⁴,
A.N. Veres^{1,3}, S.R. Verkulich¹, O.R. Sidorova¹, N.E. Demidov¹

¹Arctic and Antarctic Research Institute, St. Petersburg, Russia; ²The Central (Pulkovo) Astronomical Observatory, St. Petersburg, Russia; ³Institute of Earth Sciences, Saint Petersburg State University, St. Petersburg, Russia; ⁴Institute of Geography, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

*a_skakun@mail.ru

Received January 25, 2019 / Revised August 1, 2019 / Accepted September 19, 2019

Keywords: atmospheric precipitation, isotopic composition, natural waters, Svalbard.

Summary

In 2016–2017, during Russian Arctic Expedition on Svalbard (RAE-S) we have collected the samples of atmospheric precipitation, terrestrial waters, snow and ice on Spitsbergen island in the vicinity of Grønfjorden. The measurements of stable water isotope content ($\delta^{18}\text{O}$ and δD) in the atmospheric precipitation has allowed to draw the Local Meteoric Water Line ($\delta\text{D} = 6,93\delta^{18}\text{O} - 0,35$) and to analyze the relationship between the isotopic content and condensation temperature. Aside from this, the d-excess values in precipitation ($d_{\text{exc}} = \delta\text{D} - 8\delta^{18}\text{O}$) was interpreted as a marker of the moisture source. It has been demonstrated that the isotopic content of the surface waters (lakes and rivers) clearly points to the dominating type of feeding (atmospheric, ground) of these hydrological objects. We have discovered the inter-annual variability of the isotopic composition of Lake Kongress water during 2 years and defined the sources of water in its tributaries: 13 of them have atmospheric source and 9 – ground source. In general, isotopic content of water in the vicinity of Grønfjorden (mean values are: $\delta^{18}\text{O} = -10,3\text{‰}$, $\delta\text{D} = -72,5\text{‰}$) is higher than in other regions of Svalbard.

Citation: Skakun A.A., Chikhachev K.B., Ekaykin A.A., Kozachek A.V., Vladimirova D.O., Veres A.N., Verkulich S.R., Sidorova O.R., Demidov N.E. Stable isotopic composition of atmospheric precipitation and natural waters in the vicinity of Barentsburg (Svalbard). *Led i Sneg. Ice and Snow*. 2020. 60 (3): 379–394. [In Russian]. doi: 10.31857/S2076673420030046.

Поступила 25 января 2019 г. / После доработки 1 августа 2019 г. / Принята к печати 19 сентября 2019 г.

Ключевые слова: атмосферные осадки, изотопный состав, природные воды, Шпицберген.

Приведена интерпретация изотопных исследований проб воды, снега и льда, отобранных на ледниках Альдегонда, Западный и Восточный Грөнфьорд и в их долинах (озёра, снежники, реки), а также в долине оз. Конгресс. На основании анализа изотопного состава атмосферных осадков в посёлке Баренцбург в 2016–2017 гг. обсуждается использование изотопного состава как индикатора источника влаги для атмосферных осадков.

Введение

Концентрация тяжёлых стабильных изотопов $\delta^{18}\text{O}$ и δD в природных водах – комплексный климатологический параметр, характеризующий

условия, при которых формировалась влага. Изотопный метод с 1950-х годов широко и успешно применяется в палеоклиматологии, гидрологии и гляциологии для реконструкции прошлых изменений температуры воздуха, скорости снего-

накопления, выяснения происхождения природных вод и различных масс-балансовых расчётов в гидрологических системах.

Изотопные исследования элементов гидрологической системы полярных районов (областей питания и абляции ледников, водотоков, озёр) характеризуют её современное состояние. Изотопный состав снега в области питания ледника позволяет оценить современный средний взвешенный изотопный состав выпадающих осадков и их вклад в общую массу ледника в разные сезоны. При детальном отборе и исследовании образцов из шурфов в области питания можно определить годовой ход изотопного состава осадков в конкретном районе. Изучение образцов льда в области абляции даёт сведения об осреднённом за большой период времени изотопном составе осадков, питавших ледник в прошлом. Сопоставление этих данных с изотопным составом современных осадков позволяет составить представление об изменении климата в данном районе за время жизни ледника. Одновременно изотопный состав льда в области абляции характеризует изотопный состав талых ледниковых вод. В свою очередь изотопный состав водотоков однозначно характеризует происхождение вод, а при слиянии двух водотоков, имеющих разное происхождение, позволяет оценить их относительный вклад в питание реки. Изотопный состав воды озёр представляет собой интегральную характеристику баланса массы озера. Таким образом, зная изотопный состав всех элементов системы, можно установить для каждого объекта вклад атмосферного, ледникового и подземного питания, стока вод, а также определить величину испарения и прочие параметры.

Как правило, большую проблему в подобных исследованиях создаёт отсутствие данных об изотопном составе атмосферных осадков, которые служат отправной точкой всех изотопных расчётов. Поэтому отбор проб атмосферных осадков представляет собой важную задачу, которая решается с помощью организации круглогодичного мониторинга. Это особенно актуально ввиду происходящего в настоящее время потепления климата, наглядно проявляющегося в Арктике. Архипелаг Шпицберген привлекает внимание исследователей прежде всего как область интенсивного современного оледенения. Благодаря особенностям климата и рельефа здесь представлены ледники разных типов,

среди которых особенно часто встречается горно-покровный – «шпицбергенский» тип. Местные ледники имеют различный характер питания, льдообразования и температурный режим, демонстрируют большую динамичность.

Обобщённые данные по изотопному составу атмосферных осадков Евразийской Арктики, отобранных в 1961–1962 гг. на метеостанции (ГМС) Исфьорд Радио (Шпицберген), впервые приведены В. Дансгором [1]. Он отметил, что осадки в зимний период характеризуются увеличением содержания $\delta^{18}\text{O}$, потому что из-за влияния Гольфстрима море на западном побережье архипелага часто не замерзает и появляются большие перепады температуры между морской поверхностью и приземным слоем воздуха. Мониторинг изотопного состава атмосферных осадков в разные годы проводился на ГМС Нью Алесунн, Исфьорд Радио и Хорнсунн (рис. 1).

ГМС Исфьорд Радио ($78^{\circ}04'$ с.ш., $13^{\circ}38'$ в.д.) находится на удалении ~ 15 км от пос. Баренцбург и характеризуется сходными метеорологическими условиями, однако мониторинг изотопного состава осадков на ней вёлся только с 1960 по 1976 г., в то время как ГМС Нью Алесунн ($78^{\circ}55'$ с.ш., $11^{\circ}56'$ в.д.) располагается на побережье Конгсфьорда на расстоянии около 215 км от пос. Баренцбург и имеет мониторинговые данные с 1990 по 2015 г. Польская полярная ГМС Хорнсунн ($77^{\circ}0'$ с.ш., $15^{\circ}33'$ в.д.) расположена на побережье гавани Исфьорн Хорнсуннфьорда в южной части о. Западный Шпицберген на расстоянии порядка 120 км от Баренцбурга. Мониторинг изотопного состава атмосферных осадков на ней вёлся только в 2013–2014 гг. [2]. Среднегодовой изотопный состав осадков, ‰: на ГМС Нью Алесунн следующий – $\delta^{18}\text{O} = -11,6$, $\delta\text{D} = -83,8$; на ГМС Исфьорд Радио – $\delta^{18}\text{O} = -9,54$, $\delta\text{D} = -63,2$; на ГМС Хорнсунн – $\delta^{18}\text{O} = -8,0$, $\delta\text{D} = -58,3$.

Российские изотопно-геохимические исследования на Шпицбергене были начаты в 1974 г. в рамках гляциологической экспедиции Института географии РАН, задача которой заключалась в выяснении механизмов формирования изотопного и химического состава атмосферных осадков и уточнении условий сохранения первоначального изотопного и химического состава в тёплых ледниках архипелага. Отбор проб атмосферных осадков, выполненный в Баренцбурге

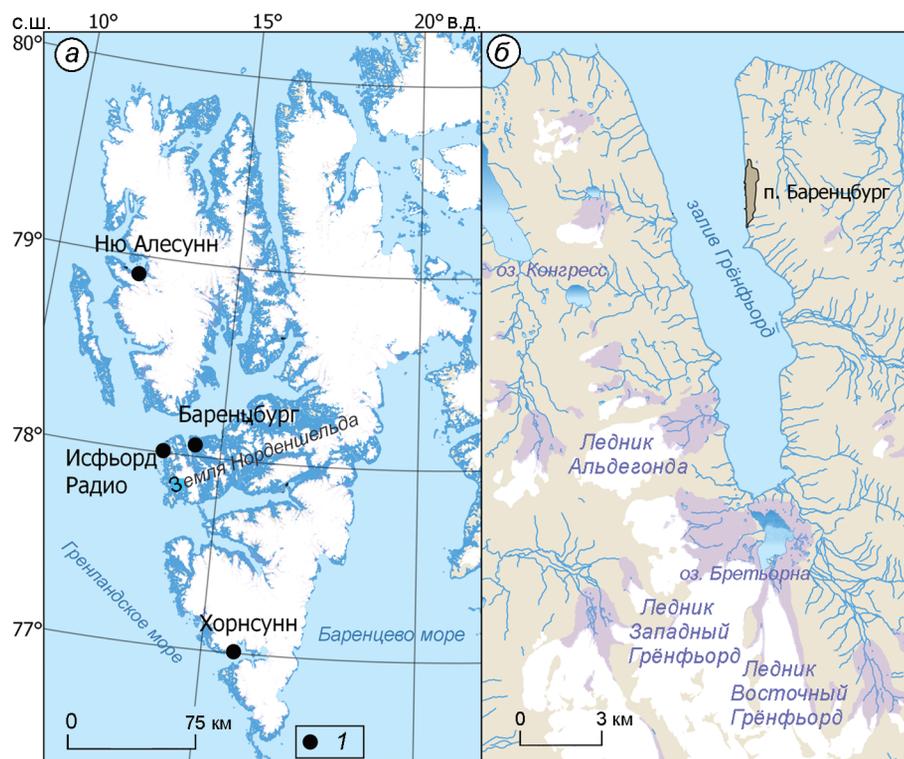


Рис. 1. Карта о. Западный Шпицберген (а) и района исследований (б):

1 – станции, на которых проводился мониторинг изотопного состава атмосферных осадков

Fig. 1. Map of Spitsbergen island (а) and of the area of study (б): 1 – stations where the isotopic composition of precipitation is measured

в 1975–1981 гг., показал, что связь между температурой воздуха и $\delta^{18}\text{O}$ сильно варьирует со временем, а среднегодовое значение $\delta^{18}\text{O}$ составляет $-11,0\text{‰}$ [3]. Район исследовательских работ в окрестностях залива Грэнфьорд отличается разнообразием различных гидрологических систем (см. рис. 1). На востоке – это долина Грэндален, ледники Тавле и Тунге, на юге – ледники Западный и Восточный Грэнфьорд, Янсон, Баалсруд с основными водотоками – реками Грэнфьорд и Бретьорна. На западе самые крупные ледники – Альдегонда и Варде, самые значимые водотоки – реки Конгресс, Брюде, Альдегонда, а также ручьи Вастакельва, Твербекен. Наиболее доступны, с точки зрения логистики, ледники Альдегонда, Западный и Восточный Грэнфьорд, а также долина озера Конгресс. Именно эти гидрологические системы стали основными объектами исследования, результаты которого приводятся и обсуждаются в настоящей работе.

Методика полевых и лабораторных работ

Отбор проб выполнялся на о. Западный Шпицберген, на территориях, прилегающих к заливам Грэнфьорд и Исфаьрд, в ходе лет-

них работ Российской арктической экспедиции на Шпицбергене (РАЭ-Ш) в 2016 и 2017 гг. Были отобраны пробы атмосферных осадков в пос. Баренцбург, льда – с ледников Альдегонда, Восточный и Западный Грэнфьорд, воды – из рек Бретьорна, Альдегонда, Конгресс и озёр в долинах Альдегонда, Восточный и Западный Грэнфьорд, а также из озера Конгресс (см. рис. 1). Отбор вели на выбранных репрезентативных участках в областях питания и абляции ледников, в водотоках и озёрах. В области абляции ледников пробы отбирали с равномерным шагом по линии тока льда для получения временной изменчивости, поскольку при движении от области аккумуляции к языку ледника возраст поверхностного льда увеличивается. Маршруты по долинам строились так, чтобы охватить максимальное число находящихся в них озёр и притоков основного русла. Пробы из притоков отбирали выше места их впадения в основное русло, пробы из основного русла – ниже впадения в него каждого из притоков. По возможности маршрутами и отбором охватывали оба борта долины. Пробы атмосферных осадков в пос. Баренцбург отбирали с июля 2016 г. по апрель 2017 г. В соответствии с принятой методикой образец мог накапливаться в пробоот-

борнике в течение нескольких дней, например, в случае непрерывных осадков.

Пробы отбирали в герметичные пробирки и хранили в замороженном виде для предотвращения обмена с атмосферой и фазовых переходов воды до момента выполнения лабораторного анализа. Изотопный состав проб измеряли в Лаборатории изменений климата и окружающей среды (ЛИКОС) ААНИИ на лазерном анализаторе изотопного состава Picarro L2120-i. В этом приборе применяется технология абсорбционной спектроскопии по затуханию света (WS-CRDS). Перед выполнением анализа образцы, содержащие примеси, фильтровали с помощью фильтров Sartorius с диаметром пор 0,45 мкм. Для получения максимально точных значений использовали методику измерений, разработанную в ЛИКОС [4]. В соответствии с этой методикой регулярно выполняются калибровки прибора для определения точности измерений, значений калибровочных коэффициентов и коэффициентов памяти при измерении δD и $\delta^{18}O$. Калибровки выполняют с использованием изотопных стандартов, изготовленных в Международном агентстве по атомной энергии (МАГАТЭ).

При измерениях образцов использовали внутренний лабораторный стандарт SPB-2 ($\delta^{18}O = -9,66 \text{ ‰}$, $\delta D = -74,1 \text{ ‰}$), калиброванный относительно стандартов МАГАТЭ. Рабочий стандарт измеряли через каждые пять измерений образцов. Некоторые случайно выбранные образцы анализировали дважды для оценки воспроизводимости результатов. Воспроизводимость составила 0,07 ‰ для $\delta^{18}O$ и 0,3 ‰ для δD при измерении проб в 2016 г. и соответственно 0,06 ‰ и 0,4 ‰ при измерении проб в 2017 г., т.е. случайная погрешность измерений на 1–2 порядка меньше естественной изменчивости изотопного состава природных вод в исследуемом районе (см. далее).

Результаты и обсуждение

Изотопный состав атмосферных осадков.

На рис. 2 приведены полученные нами данные по изотопному составу осадков и температуре воздуха в Баренцбурге в 2016–2017 гг. Средний изотопный состав за указанный период составил, ‰: $\delta^{18}O = -9,3$, $\delta D = -65$. На рис. 2 видно,

что в тёплый период — с июля по ноябрь включительно — вариации температуры незначительны и не превышают 8 °С по амплитуде, в то время как изотопный состав сильно колеблется (стандартные отклонения равны 3,7 ‰ для $\delta^{18}O$ и 29 ‰ для δD). В холодный период — с декабря по апрель включительно — метеоусловия характеризуются перепадами температур до 20 °С, которые хорошо отражаются и в изотопном составе осадков (отличие от среднего значения может достигать 30 ‰ для $\delta^{18}O$ и 70 ‰ для δD). Так, можно проследить следующие тенденции: повышению температуры в начале февраля 2017 г. соответствует аналогичный ход изотопного состава, а тренд понижения температуры от середины декабря 2016 г. до конца января 2017 г. повторяется и в изотопном составе.

Очень низкая температура, установившаяся в Баренцбурге во второй декаде марта 2017 г. (до $-22,3 \text{ °C}$), нашла отражение в аномально низком значении изотопного состава снега, ‰: $\delta^{18}O = -18,4$, $\delta D = -144,5$. В то же время сильное понижение температуры в начале декабря 2016 г. никак не прослеживается в изотопном составе, как и несколько локальных повышений температуры в январе 2017 г. Таким образом, связь между температурой и изотопным составом не остаётся постоянной в течение года и требует уточнения более долговременными данными. В этом смысле показательны среднемесячные значения изотопного состава осадков на разных ГМС архипелага Шпицберген.

На рис. 3 приведены среднемесячные значения изотопного состава атмосферных осадков (а, б) и температуры воздуха на станциях (в). Для ГМС Хорнсунна были взяты осреднённые температурные данные за 2005–2016 гг. На всех станциях температурные кривые очень похожи: максимум температуры наблюдается в июле ($\approx 5 \text{ °C}$), лето длится примерно с мая по октябрь. При этом вариации на ГМС Хорнсунн гораздо меньше по амплитуде, чем у остальных станций: от $-8,6$ до $4,8 \text{ °C}$, в то время как в Баренцбурге в 1975–1981 гг. температура менялась от -16 до 5 °C . Также разнятся температуры в январе и декабре (для ГМС Хорнсунн они выше, чем для других станций, примерно на 5 °C). В то же время самые большие амплитуды изотопного состава (см. рис. 3, а, б) демонстрируют именно осадки на ГМС Хорнсунн (1σ для $\delta^{18}O = 3,2 \text{ ‰}$,

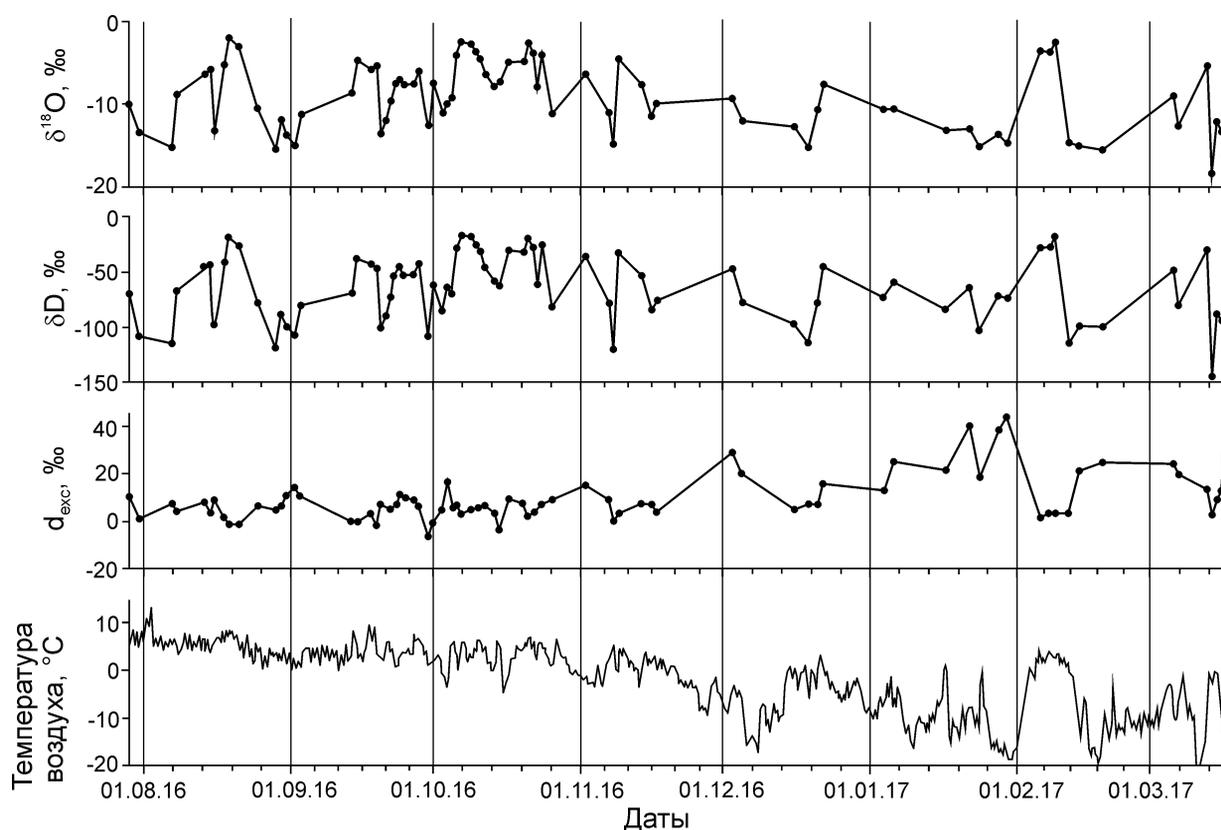


Рис. 2. Значения изотопного состава осадков ($\delta^{18}\text{O}$, δD , d_{exc}) и температуры воздуха ($^{\circ}\text{C}$) [5] на высоте 2 м над поверхностью земли в пос. Баренцбург в период с июля 2016 г. по апрель 2017 г.

Fig. 2. The values of isotopic content of atmospheric precipitation ($\delta^{18}\text{O}$, δD , d_{exc}) and 2-m air temperature ($^{\circ}\text{C}$) [5] in Barentsburg from July 2016 to April 2017

для $\delta\text{D} = 21,5 \text{ ‰}$). При этом на ГМС с длительным мониторингом (Ню Алесунн и Исфьорд Радио) эти значения гораздо меньше (1σ для $\delta^{18}\text{O} \approx 1 \text{ ‰}$, 1σ для $\delta\text{D} \approx 5 \text{ ‰}$), что может быть связано с неизбежным сглаживанием данных в процессе осреднения. Такой высокий изотопный состав проб с ГМС Хорнсунн (значения изотопного состава не опускаются ниже $\delta^{18}\text{O} = -12,5$ и $\delta\text{D} = -84 \text{ ‰}$) может быть объяснён слабой связью изотопного состава осадков с температурой воздуха на этой станции.

Один из важных изотопных параметров – эксцесс дейтерия ($d_{\text{exc}} = \delta\text{D} - 8\delta^{18}\text{O}$), характеризующий сдвиг изотопного состава образца относительно глобальной линии атмосферных осадков. Его значение тесно связано с кинетическим фракционированием влаги при испарении с поверхности воды [4]. На рис. 2 видно, что для зимних осадков характерен очень высокий d_{exc} , а в летний период наблюдается обратная ситуация. Точки экстремумов приходятся на 30 сентября

2016 г. ($-6,8 \text{ ‰}$) и 17 марта 2017 г. ($+45,1 \text{ ‰}$). Такие вариации амплитуды могут быть связаны с изменением географического положения источника влаги. Его можно отследить с помощью модели атмосферного переноса HYSPLIT [6]. Модельные траектории движения воздушных масс в течение 24 часов показывают, что в эти дни источник влаги находился в разных районах: 30 сентября влага поступала из Атлантического океана, а 17 марта её источником был Северный Ледовитый океан. Таким образом, для ГМС Баренцбург параметр d_{exc} вероятно, может быть использован для определения источника влаги: низкое значение d_{exc} соответствует влаге, сформировавшейся в Северной Атлантике, а высокий d_{exc} встречается исключительно в зимних осадках, связанных с переносом арктических воздушных масс в регион исследования.

По результатам измерений в пос. Баренцбург линия метеорных вод описывается следующим уравнением: $\delta\text{D} = 6,93\delta^{18}\text{O} - 0,35$

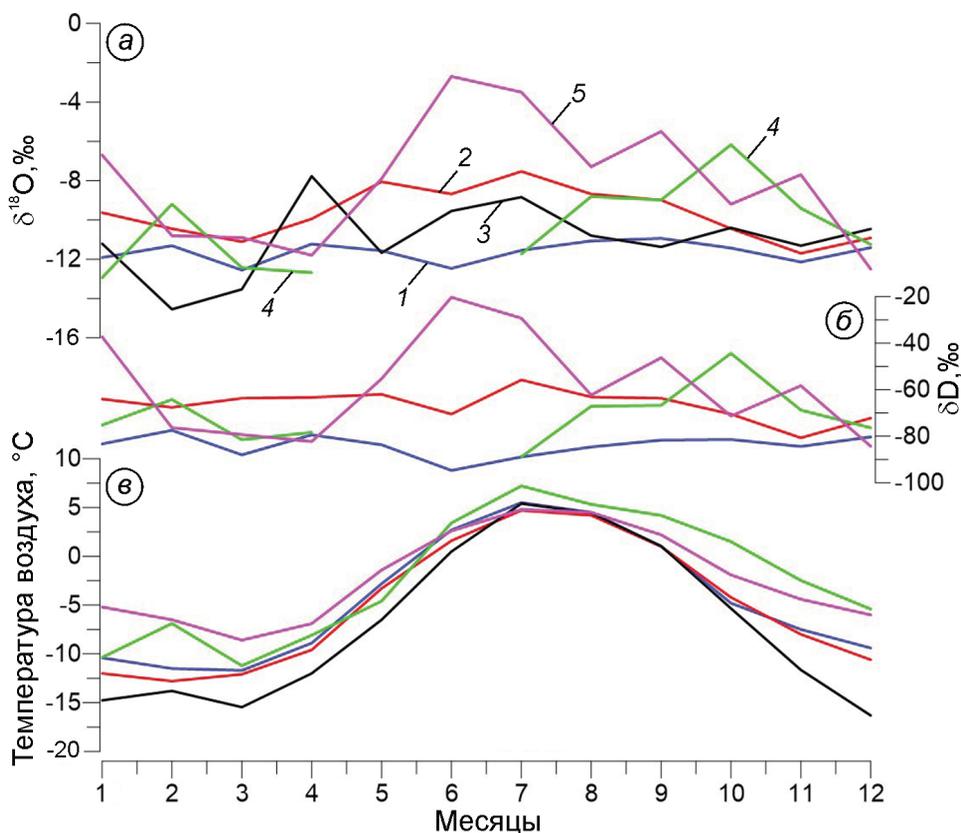


Рис. 3. Средние месячные значения изотопного состава атмосферных осадков и температуры воздуха на четырёх станциях Западного Шпицбергена:

a – относительная концентрация $\delta^{18}\text{O}$; *б* – относительная концентрация δD ; *в* – температура воздуха, $^{\circ}\text{C}$. Для станции Баренцбург отдельно приведены значения для двух разных промежутков времени. ГМС: 1 – Нью Алесунн 1990–2015 гг.; 2 – Исфьорд Радио 1960–1976 гг.; 3 – Баренцбург 1975–1981 гг.; 4 – Баренцбург 2016–2017 гг.; 5 – Хорнсунн 2013–2014 гг. Осреднение температуры воздуха на станции Хорнсунн проведено за период 2005–2016 гг. [7]

Fig. 3. Mean monthly values of isotopic composition of precipitation and air temperature at 4 Spitsbergen stations: *a* – concentration $\delta^{18}\text{O}$; *б* – concentration δD ; *в* – air temperature, $^{\circ}\text{C}$. Two different time intervals are considered for Barentsburg. 1 – Ny Alesund 1990–2015; 2 – Isfjord Radio 1960–1976; 3 – Barentsburg 1975–1981; 4 – Barentsburg 2016–2017; 5 – Hornsund 2013–2014. For Hornsund station the temperature data is averaged over 2005–2016 [7]

(рис. 4, *a*). Сюда не вошли данные за 1975–1981 гг. [3], так как в них отсутствуют сведения о δD . Данные, полученные в рамках мониторинговой программы МАГАТЭ для ГМС Исфьорд Радио, показывают следующую линейную зависимость: $\delta\text{D} = 6,46\delta^{18}\text{O} - 5,98$, а для ГМС Нью Алесунн – $\delta\text{D} = 7,27\delta^{18}\text{O} + 0,87$ [8]. Измерениям на ГМС Хорнсунн соответствует уравнение $\delta\text{D} = 6,61\delta^{18}\text{O} + 5,12$. Кроме того, в работе [9] выведено уравнение для средней по Арктике линии метеорных вод – $\delta\text{D} = 7,68\delta^{18}\text{O} + 4,50$. Указанные уравнения демонстрируют хорошее согласие между собой и изображены в виде линий на рис. 4, *a*. На этом рисунке также приведены результаты современных измерений изотопного состава осадков в пос. Баренцбург.

Все имеющиеся данные по особенностям изотопного состава и широте можно разделить на три группы: 1) Нью Алесунн в северной части о. Западный Шпицберген; 2) Баренцбург и Исфьорд Радио – в центральной; 3) Хорнсунн – в южной. Для «группы Баренцбурга» несколько массивов данных были объединены с помощью взвешенного среднего, рассчитанного с учётом времени наблюдений в каждом случае: Исфьорд Радио – 16 лет, Баренцбург [3] – 6 лет, современный Баренцбург – 1 год. Многолетнее среднее в этом случае $\delta^{18}\text{O} \approx -10 \text{‰}$. На рис. 4, *б* показаны зависимости $\delta^{18}\text{O}$ от температуры для каждой группы. Эти зависимости обусловлены множеством разных факторов и характеризуются рядом закономерностей. Например, существует зависи-

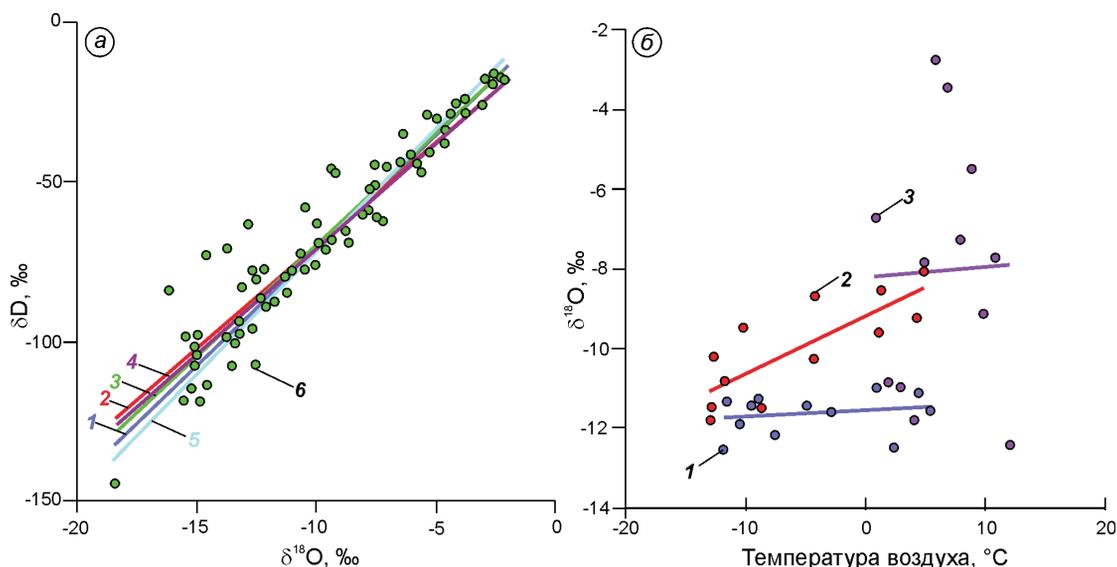


Рис 4. Зависимости между различными параметрами изотопного состава и температурой:

a – связь между относительной концентрацией $\delta^{18}\text{O}$ и относительной концентрацией δD в пробах атмосферных осадков; линии метеорных вод на станциях: 1 – Нью Алесунн; 2 – Исфьорд Радио; 3 – Баренцбург; 4 – Хорнсунн; 5 – арктическая линия метеорных вод [9]; 6 – значения изотопного состава проб атмосферных осадков в пос. Баренцбург в 2016–2017 гг.; *b* – зависимость относительной концентрации $\delta^{18}\text{O}$ в атмосферных осадках от температуры воздуха в точке отбора проб; усреднённые за каждый месяц года данные для: 1 – Нью Алесунна; 2 – Баренцбурга; 3 – Хорнсунна. Сплошные линии показывают линейную регрессию для каждой группы данных

Fig. 4. Dependencies between various parameters of isotopic composition and temperature:

a – Svalbard meteoric water lines (concentration δD as a function of the concentration $\delta^{18}\text{O}$): 1 – Ny Alesund; 2 – Isfjord Radio; 3 – Barentsburg; 4 – Hornsund; 5 – Arctic meteoric water line from [9]; 6 – isotopic composition of Barentsburg samples in 2016–2017; *b* – relationship between mean monthly values of concentration $\delta^{18}\text{O}$ in precipitation and air temperature for 3 groups of Spitsbergen stations: 1 – Ny Alesund; 2 – Barentsburg; 3 – Hornsund. Solid lines are linear regressions

мость изотопного состава от направления ветра – в осадках при ветре северо-западного и восточного направлений в Баренцбурге в 1980-х годах наблюдались очень высокие значения изотопного состава, достигавшие $\delta^{18}\text{O} \approx -1,5 \text{ ‰}$. Такой изотопный состав показывает большую роль близлежащей морской акватории в формировании влаги [3]. Определённую роль в формировании изотопного состава осадков играет также площадь распространения зимнего морского льда. При увеличении площади льда наблюдается понижение концентрации тяжёлых изотопов в осадках, поскольку морской лёд ограничивает контакт воздушных масс с поверхностью морской воды, обогащённой тяжёлыми изотопами [10].

Коэффициент корреляции между средними месячными значениями $\delta^{18}\text{O}$ и температурой воздуха для «группы Баренцбург» составляет 0,79 (статистически значим); связь между этими величинами выражается уравнением $\delta^{18}\text{O} = 0,14t - 9,2$. В случае ГМС Нью Алесунн и Хорнсунн, расположенных на других широтах

архипелага, коэффициенты корреляции равны 0,22 и 0,03 соответственно, что свидетельствует об отсутствии связи между приземной температурой воздуха и изотопным составом осадков.

Изотопный состав проб, отобранных в ледниковых долинах. Пробы на изотопный анализ ледникового стока отбирались в районе залива Грэнфьорд, впадающего в Исфьорд – самый крупный залив о. Западный Шпицберген. К побережью Грэнфьорда выходят восемь долин, в одной из которых лежит русло р. Конгресс, берущей начало из оз. Конгресс. Только три из этих долин более чем наполовину заняты горно-долинными ледниками: Альдегонда – на западе, Западный и Восточный Грэнфьорд – на юге (см. рис. 1); в других долинах ледниковые тела сохранились в цирках в виде каровых и склоновых ледников либо располагаются только в самом верховье долины [11]. Такое состояние ледников связано с их деградацией, по меньшей мере, с 1900 г. и обусловлено глобальными изменениями климата [12]. Результаты изотопных исследований

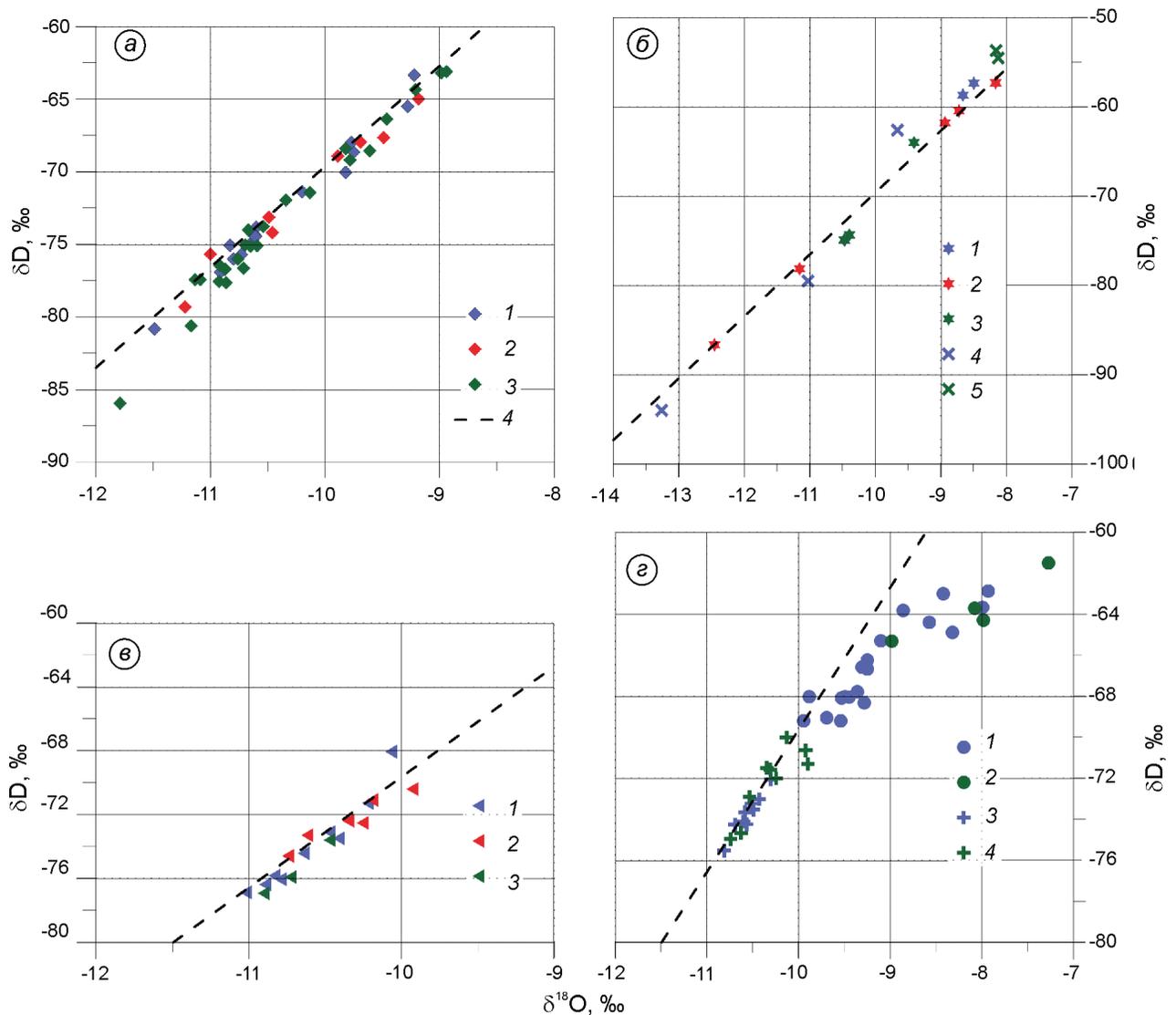


Рис. 5. Изотопный состав проб с ледников и их долин.
а – пробы льда с ледников: 1 – Альдегонда; 2 – Западный Грэнфьорд; 3 – Восточный Грэнфьорд; 4 – локальная линия метеорных вод в Баренцбурге; *б* – пробы снега из снежников и с поверхности ледников: 1 – снег на Альдегонде; 2 – снег на Западном Грэнфьорде; 3 – снег на Восточном Грэнфьорде; 4 – снежники в долине Альдегонды; 5 – снежники в долине ледников Западный и Восточный Грэнфьорд; *в* – вода из водотоков: 1 – Альдегонда; 2 – Западный Грэнфьорд; 3 – Восточный Грэнфьорд; *г* – вода из озёр, рек и ручьев с ледниковым питанием, а также из маленьких озёр в долине: 1 – озёра и ручьи с подземным питанием в долине Альдегонда; 2 – озёра с подземным питанием в долине ледников Западный и Восточный Грэнфьорд; 3 – озёра, река и ручьи с ледниковым питанием в долине Альдегонда; 4 – озёра, реки и ручьи с ледниковым питанием в долине ледников Западный и Восточный Грэнфьорд

Fig. 5. Isotopic composition of sample staken from glaciers and their valleys.
a – Glacier ice: 1 – Aldegonda; 2 – West Grenfjord; 3 – East Grenfjord; 4 – the local meteoric water line for Barentsburg; *б* – samples of snow: 1 – Aldegonda’s snow; 2 – West Grenfjord’s snow; 3 – East Grenfjord’s snow; 4 – Aldegonda’s snow patches; 5 – snow patches of East and West Grenfjord; *в* – water flows on the glacier surface: 1 – Aldegonda; 2 – West Grenfjord; 3 – East Grenfjord; *г* – the rivers and lakes in the glacier valley: 1 – rivers and lakes in Aldegonda valley with ground feeding type; 2 – rivers and lakes in Grenfjord valley with ground feeding type; 3 – river and lakes in Aldegonda valley with glacier feeding type; 4 – river and lakes in Grenfjord valley with glacier feeding type

проб, отобранных непосредственно на ледниках Альдегонда, Западный и Восточный Грэнфьорд (лёд, снег, водотоки – река и ручьи на по-

верхности ледника – сезонный талый сток) и в их долинах (озёра, снежники, река) приведены на рис. 5 в виде диаграммы зависимости δD от $\delta^{18}O$.

Ледник Альдегонда относится к типу горно-долинных ледников, имеет двухслойное строение с холодным верхним и тёплым нижним слоями. В последнее столетие ледник быстро отступает. В 2016–2017 гг. практически вся его поверхность представляла собой область абляции. Изотопный состав проб льда, поверхностного снега и водотоков, отобранных на леднике, близок к значениям изотопного состава атмосферных осадков (см. рис. 5 а–в). Средние значения изотопного состава, ‰: проб льда – $\delta^{18}\text{O} = -10,4$ и $\delta\text{D} = -73,6$; поверхностного снега – $\delta^{18}\text{O} = -9,2$ и $\delta\text{D} = -64,7$; поверхностных водотоков – $\delta^{18}\text{O} = -10,6$ и $\delta\text{D} = -74,2$. Для образцов из мелких озёр в долине характерны более высокие значения изотопного состава ($\delta^{18}\text{O} = -9,1$ и $\delta\text{D} = -66,5$ ‰) при более низких значениях d_{exc} (6,4 ‰ при среднем для ледника значении около 10 ‰). Это указывает на существенный вклад испарения и/или подземных вод в водный баланс озёр. При этом изотопный состав воды приледникового озера Альдегонда ($\delta^{18}\text{O} = -10,3$ и $\delta\text{D} = -72,0$ ‰) и реки, вытекающей из этого озера ($\delta^{18}\text{O} = -10,8$ и $\delta\text{D} = -74,9$ ‰ в гидрологическом створе), подтверждает значительный вклад талой воды ледника в формирование стока.

В долине были отобраны также пробы воды до и после фильтрации через моренный фильтр. Обнаружено, что преодоление моренного фильтра способствует уменьшению значений $\delta^{18}\text{O}$ и δD и увеличению d_{exc} . Так, вода из небольшого озера в долине ($\delta^{18}\text{O} = -8,4$, $\delta\text{D} = -63$, $d_{\text{exc}} = 4,3$ ‰) после просачивания через моренную стенку формируется в ручей со следующим изотопным составом, ‰: $\delta^{18}\text{O} = -9,3$, $\delta\text{D} = -66,6$, $d_{\text{exc}} = 7,8$. Изменения для δD составили более 3 ‰, а для $d_{\text{exc}} - 3,5$ ‰. При прохождении воды через горную породу обычно происходит обогащение ^{18}O , а d_{exc} снижается; в частности, такое явление наблюдается у объектов с питанием подземными водами (см. рис. 5, г). В данном случае обеднение по $\delta^{18}\text{O}$ и повышение d_{exc} может быть следствием смешивания ледниковых водотоков с водами фильтрованного ручья. Если предположить, что в формировании изотопного состава фильтрованного ручья участвовали только вода из озера-источника и ледниковые водотоки, то легко подсчитать, что доля вод озера-источника в ручье

составляет примерно 60 %, а остальная часть – ледниковые воды.

Изотопный состав снежников демонстрирует широкий разброс значений ($\delta^{18}\text{O} = -13,3 \div -9,6$, $\delta\text{D} = -94 \div -62$, $d_{\text{exc}} = 8 \div 15$ ‰), что может быть обусловлено различной ориентировкой склонов по сторонам света. Например, наименьшие значения изотопного состава ($\delta^{18}\text{O} = -13,3$ и $\delta\text{D} = -94$ ‰) наблюдаются на снежнике на северном склоне, что объясняется низкой скоростью таяния в этом месте и, как следствие, сохранением зимних осадков. В процессе измерений мы не обнаружили зависимости изотопного состава проб льда с ледника от высоты. Это указывает на то, что весь ледник сложен голоценовым льдом.

Восточный и Западный Грэнфьорд. Ледник Грэнфьорд, который традиционно разделяют на западную и восточную части, расположен на юге залива Грэнфьорд на расстоянии 2 км от береговой линии. *Восточный Грэнфьорд* – часть асимметричной двускатной ледниковой системы Грэнфьорд–Фритьюф длиной около 17 км. Площадь ледника Восточный Грэнфьорд – 7,6 км² (длина $\approx 5,3$ км, ширина ≈ 1 км). Он состоит из двух потоков льда, сливающихся в средней части на уровне 300–360 м. Зона ледораздела с ледником Фритьюф довольно широкая, с неё начинается левый поток льда, в то время как в истоке правого потока расположена область фирнового питания. Язык ледника спускается к северу до высоты 40 м [13]. Ледник *Западный Грэнфьорд* имеет длину 9 км и ширину 7 км, один из его потоков вливается в ледник Восточный Грэнфьорд. Ледники Западный и Восточный Грэнфьорд питают реку Бретьорна, которая впадает в залив.

Пробы были собраны из озёр в долине ледников, в р. Бретьорна, а также на самих ледниках. Изотопный состав проб в областях абляции и аккумуляции отличается: для области аккумуляции характерны более высокие значения, соответствующие летним осадкам. На леднике Западный Грэнфьорд в области аккумуляции изотопный состав пробы льда следующий, ‰: $\delta^{18}\text{O} = -11,8$, $\delta\text{D} = -86$, а на ледоразделе Восточного – $\delta^{18}\text{O} = -9,8$ и $\delta\text{D} = -68,4$. В то же время на языке Западного Грэнфьорда его состав иной, ‰: $\delta^{18}\text{O} = -11$, $\delta\text{D} = -75,9$, а для Восточного – $\delta^{18}\text{O} = -9,8$ и $\delta\text{D} = -69,2$. Эти данные позволяют предположить, что в области аккумуля-

ляции в составе талой воды участвовал недавно выпавший снег, что несколько повышает изотопный состав. Водотоки на двух ледниках очень близки по изотопному составу. Средние значения составляют, ‰: $\delta^{18}\text{O} = -10,3$ и $\delta\text{D} = -72,4$ для Западного и $\delta^{18}\text{O} = -10,7$ и $\delta\text{D} = -75,5$ для Восточного Грэнфьорда. На снежниках, в отличие от долины ледника Альдегонда, присутствует снег, выпавший в летний сезон и имеющий высокий изотопный состав ($\delta^{18}\text{O} = -8,2$, $\delta\text{D} = -53,7$ ‰). Пробы снега на ледниках в области аккумуляции меняются в следующих пределах, ‰: $\delta^{18}\text{O} = -8 \div -11$, $\delta\text{D} = -57 \div -75$. Проба погребённого льда в долине не отличается по изотопному составу от проб, полученных на леднике, что указывает на атмосферное происхождение погребённого льда ($\delta^{18}\text{O} = -9,0$, $\delta\text{D} = -63,2$ ‰). Озёра в долинах ледников отличаются по изотопному составу от атмосферных осадков (см. рис. 5, з), что может означать как высокий вклад испарения, так и вклад подземных вод в водный баланс озёр. Среднее значение изотопного состава воды для таких озёр составляет, ‰: $\delta^{18}\text{O} = -8,1$, $\delta\text{D} = -63,7$, $d_{\text{exc}} = 0,9$ и характеризуется очень низким d_{exc} . В свою очередь изотопный состав воды озера и р. Бретюрна, а также ручьев в долине свидетельствует об их ледниковом питании: среднее значение $\delta^{18}\text{O} = -10,4$, $\delta\text{D} = -72,5$, $d_{\text{exc}} = 10,8$ ‰.

Озеро Конгресс ($78^{\circ}01'$ с.ш., $13^{\circ}58'$ в.д.) представляет собой небольшой ($0,82 \text{ км}^2$) и глубокий ($37\text{--}52$ м) водоём во внутренней части долины Конгрессдален. Два горных хребта укрывают озеро от ветров. Обычно зимой уровень воды в озере снижается, и эти колебания уровня могут быть связаны с его разгрузкой по подземным карстовым полостям. В озеро стекают четыре небольших ручья, два из них — из области с небольшими ледниками [14]. Река Конгресс, вытекающая из озера, имеет длину 3,8 км; на её водосборе нет ледников, поэтому река не имеет прямого ледникового питания, что делает этот водоток исключительным [15].

Пробы воды на исследование изотопного состава отбирали непосредственно из оз. Конгресс, впадающих в него ручьев, вытекающей из озера реки и её притоков. Некоторые из притоков имеют подземное питание. Изотопный состав воды в истоке реки соответствует среднему значению изотопного состава воды в самом

озере. Кроме того, распределение значений изотопного состава озёрных и речных вод хорошо соответствует локальной линии метеорных вод (рис. 6, а). Среднее значение изотопного состава воды в озере и реке в различных точках в 2016 г. ($\delta^{18}\text{O} = -10,6$, $\delta\text{D} = -74,1$ ‰) ниже, чем в 2017 г. ($\delta^{18}\text{O} = -10,4$, $\delta\text{D} = -72,0$ ‰). Большая часть ручьёв, впадающих в реку и озеро, в 2017 г. пересохла, поэтому основной массив данных по притокам представлен исследованиями 2016 г. В частности, в 2017 г. в озеро впадали только два ручья, один из которых — сероводородный. Изотопный состав этого ручья в разные годы не претерпел изменений ($\delta^{18}\text{O} = -11,0$, $\delta\text{D} = -76,3$ ‰).

По данным анализа воды из притоков озера и реки можно выделить две группы (см. рис. 6, б): а) притоки предполагаемого атмосферного питания (ледник, осадки); б) подземные воды, характеризующиеся более высоким изотопным составом при низких значениях d_{exc} . Распределение изотопного состава вод притоков с атмосферным питанием хорошо совмещается с линией метеорных вод осадков, в то время как распределение притоков с подземным питанием представляет собой на рис. 6, б отдельную группу. Всего за 2016–2017 гг. обнаружено 13 притоков с атмосферным питанием и девять с подземным питанием. Один из притоков с подземным питанием отличается высоким значением $\delta^{18}\text{O}$ ($\delta^{18}\text{O} = -9,2$, $\delta\text{D} = -65,9$ ‰). Такой изотопный состав может быть обусловлен близостью места впадения притока в р. Конгресс к заливу Грэнфьорд, воды которого имеют более высокий изотопный состав. Изотопный анализ вод позволяет сделать некоторые выводы, касающиеся гидрологического режима оз. Конгресс:

1) изотопный состав озёрной воды менялся в течение двух летних сезонов отбора проб, что может быть связано с различным изотопным составом питающих озеро атмосферных осадков, а также с разной долей двух основных источников питания (атмосферного и подземного);

2) хотя некоторые источники имеют явное подземное питание, превалирует вклад атмосферного питания, на что указывает положение значения изотопного состава воды озера вблизи локальной линии метеорных вод (см. рис. 6, а);

3) пробы воды, отобранные в одно и то же время в разных частях озера, имеют незначительно, но статистически значимо различающи-

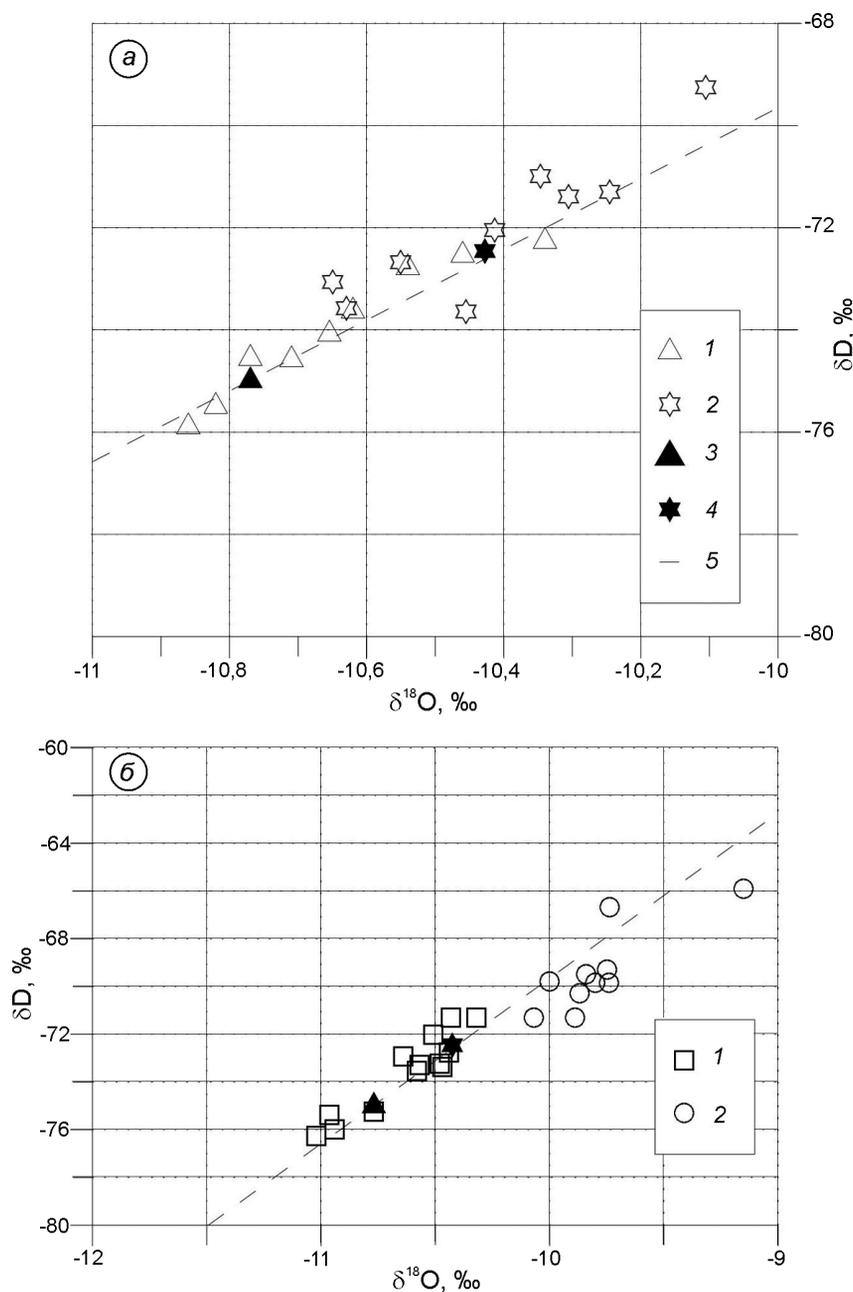


Рис. 6. Изотопный состав проб воды из долины оз. Конгресс.

a – пробы воды из озера и реки Конгресс: 1 – 2016 г.; 2 – 2017 г.; 3 – пробы из реки Конгресс в гидрологическом створе вблизи побережья за 2016 г.; 4 – аналогичные пробы за 2017 г.; 5 – локальная линия метеорных вод в Баренцбурге; *б* – притоки оз. Конгресс и их разделение по способу питания: 1 – атмосферное; 2 – подземное

Fig. 6. Isotopic composition of the water in the Lake Kongress valley.

a – water samples from the lake and the river that outflows from the lake: 1 – 2016; 2 – 2017; 3 – the isotopic composition of the Kongress river in the hydrological transect in 2016; 4 – the same as previous in 2017; 5 – the local meteoric water line; *b* – the tributaries of the lake and their classification in relation to the water source: 1 – atmospheric; 2 – ground

еся значения (см. рис. 6, *a*), что свидетельствует о неполном перемешивании воды в нём.

Сопоставление с результатами предыдущих исследований

В таблице приведены сводные данные по изотопному составу проб природных вод Шпицбергена, полученные нами и взятые из литературных источников. Так, в работе [16] есть данные по изотопному составу вертикального профиля наледи,

талой воды, базального льда, а также воды из небольшого термокарстового озера в долине ледников Восточный и Западный Грэнфьорд. Пробы были взяты в июле 2009 г., наледи пронумерованы от верхнего слоя к нижнему. В данном случае самый низкий изотопный состав характерен для ледниковой талой воды и воды из озера. Средние значения изотопного состава вод нескольких озёр в долине ледников Западный и Восточный Грэнфьорд в 2016 г. ($\delta^{18}\text{O} = -7,6$, $\delta\text{D} = -62,9$ ‰) выше, чем в термокарстовом озере в 2009 г. ($\delta^{18}\text{O} = -11,7$, $\delta\text{D} = -85,4$ ‰). При этом в 2017 г.

Сводные результаты изотопного анализа проб

Автор, ссылка	Образец	Концентрация изотопа кислорода-18 $\delta^{18}\text{O}$, ‰	Концентрация дейтерия δD , ‰	Экссесс дейтерия d_{exc} , ‰
Yde et al., 2012 [16]	<i>Лёд</i>			
	Налель 1, долина Восточного Грёнфьорда, 2009 г., июль	-9,66	-68	9,3
	Налель 2, долина Восточного Грёнфьорда, 2009 г., июль	-9,5	-67,2	8,8
	Налель 3, долина Восточного Грёнфьорда, 2009 г., июль	-9,5	-67,6	8,4
	Налель 4, долина Восточного Грёнфьорда, 2009 г., июль	-10,12	-71,9	9,1
Ваукмае et al., 1985 [17]	Налель 5, долина Восточного Грёнфьорда, 2009 г., июль	-9,47	-67,4	8,4
	Ледораздел Грёнфьорд-Фриггоф	-10,8 (среднее значение)	-	-
Yde et al., 2012 [16]	Периферийная нагель, долина Восточного Грёнфьорда, 2009 г., июль	-9,84	-70,5	8,2
	Базальный лёд, долина Восточного Грёнфьорда, 2009 г., июль	-9,67	-69,4	8
Ваукмае et al., 1985 [17]	Западное ледяное поле	-15,5 (среднее значение)	-	-
	Ледниковое плато Ломоносова	-14,2 (среднее значение)	-	-
Glasser, Hambrey, 2002 [21]	Ледниковое плато Амундсена	-11,0 (среднее значение)	-	-
	Поверхностный лёд, ледник Центральный Ловенбрин (Midtre Lovenbreen), 1999 г., 29–30 апреля	-11,94 (-10,1 ÷ -12,8)	-84,2 (-70 ÷ -90)	-
Johnson, Hansson, 1990 [20] Vasilchuk et al., 2015 [23, 24] Архипов и др., 2006 [22]	Наложённый лёд, ледник Стурейякюлен, о. Стурёя, 1980 г., июль-август	-11,85	-	-
	Лёд из позднеголоценовой ледяной жилы на поймае р. Адвентсэльва	-12,23 ÷ -15,4	-	-
	Лёд, снег и фирн с объектов Земли Норденшельда, 2002 г.	-13,5 ÷ -2,5	-95 ÷ -50	-
	Ледник Альгетонда, летние сезоны 2016–2017 гг.	-10,4 (среднее значение)	-73,6	-
	Ледник Западный Грёнфьорд, летние сезоны 2016–2017 гг.	-10,3 (среднее значение)	-72,4	-
Настоящая работа	Ледник Восточный Грёнфьорд, летние сезоны 2016–2017 гг.	-10,5 (среднее значение)	-74,4	-
	<i>Снег</i>			
Yde et al. 2008 [19]	Снежный шурф (ледник Лонгьер), 2004 г., апрель	-15,8±4,9	-	-
	Свежий снег (ледник Лонгьер), 2004 г.	-17,8±2,9	-	-
Glasser, Hambrey, 2002 [21]	Поверхностный снег, ледник Центральный Ловенбрин (Midtre Lovenbreen), 1999 г., 29–30 апреля	-12,81 (-6,8 ÷ 18,6)	-88,8 (-54 ÷ -126)	-
	Поверхностный снег, ледник Альгетонда, летние сезоны 2016–2017 гг.	-9,2 (среднее значение)	-64,7	-
Настоящая работа	Поверхностный снег, ледник Западный Грёнфьорд, летние сезоны 2016–2017 гг.	-9,9 (среднее значение)	-68,9	-
	Поверхностный снег, ледник Восточный Грёнфьорд, летние сезоны 2016–2017 гг.	-10,1 (среднее значение)	-71,1	-
<i>Водотоки</i>				
Yde et al., 2012 [16]	Ледниковый сток, Восточный Грёнфьорд, 2009 г., июль	-11,19	-78,5	11
	Поровая вода под наледью, долина Восточного Грёнфьорда, 2009 г., июль	-10,89	-77,5	9,6
Yde et al. 2008 [19]	Летний ледниковый сток (ледник Лонгьер)	-13,5	-	-
	Ледник Финстельвальдера, водооток, 1997 г., июль (77°28' с.ш., 15°18' в.д.)	-14,1 ÷ -12,8	-	-
Wadham et al. 2004 [18] Архипов и др., 2006 [22]	Природные воды объектов Земли Норденшельда, 2002 г.	-11 ÷ -2,5	-80 ÷ -45	-
	Водотоки на леднике Альгетонда, летние сезоны 2016–2017 гг.	-10,6 (среднее значение)	-74,2	-
Настоящая работа	Водотоки на леднике Западный Грёнфьорд, летние сезоны 2016–2017 гг.	-10,3 (среднее значение)	-72,4	-
	Водотоки на леднике Восточный Грёнфьорд, летние сезоны 2016–2017 гг.	-10,7 (среднее значение)	-75,5	-
<i>Озёра</i>				
Yde et al., 2012 [16]	Термокарстовое озеро, долина Восточного Грёнфьорда, 2009 г., июль	-11,74	-85,4	8,5
	Озеро Сварватнет (76,895° с.ш., 15,676° в.д.), 2013 г., июль	-9,6±0,1 (среднее значение)	-66±0,5	-
Арпре et al., 2017 [2]	Приток, впадающий в озеро, 2013 г., июль	-8,7±0,6 (среднее значение)	-61±5	-
	Озеро Конгресс, летние сезоны 2016–2017 гг.	-10,5 (среднее значение)	-73,1	-
Настоящая работа	Озёра в долине ледника Альгетонда, летние сезоны 2016–2017 гг.	-9,1 (среднее значение)	-66,5	6,4
	Озёра в долине ледников Западный и Восточный Грёнфьорд, летние сезоны 2016–2017 гг.	-8,1 (среднее значение)	-63,7	-
<i>Атмосферные осадки</i>				
Yde et al. 2008 [19] Настоящая работа	Дождевая вода, 2004 г., июль (ледник Лонгьер)	-8,3±3,9	-	-
	Атмосферные осадки в Баренцбурге за период с июля 2016 г. по апрель 2017 г.	-9,3 (среднее значение)	-65	-

изотопный состав воды маленького озера в долине Западного Грэнфьорда составил: $\delta^{18}\text{O} = -9,0$, $\delta\text{D} = -65,3$ ‰. Приведённые в работе [16] значения для ледниковой талой воды ($\delta^{18}\text{O} = -11,2$, $\delta\text{D} = -78,5$ ‰) также незначительно отличаются от полученных нами на леднике Восточный Грэнфьорд ($\delta^{18}\text{O} = -10,7$, $\delta\text{D} = -75,5$ ‰). Кроме того, значения изотопного состава пробы наледи, отобранной на леднике Западный Грэнфьорд летом 2017 г. ($\delta^{18}\text{O} = -9,2$, $\delta\text{D} = -65,0$ ‰), очень близки к таковым для верхних слоёв наледи ледника Восточный Грэнфьорд в 2009 г. ($\delta^{18}\text{O} = -9,7$, $\delta\text{D} = -68$ ‰) по содержанию изотопа ^{18}O .

В работе [17] приведены результаты анализа верхней части ледяного керна с ледораздела Грэнфьорд–Фриттьоф. Он изотопно более лёгкий ($\delta^{18}\text{O} = -10,8$ ‰) по сравнению с полученными нами значениями для льда на ледоразделе Восточный Грэнфьорд–Фриттьоф ($\delta^{18}\text{O} = -9,8$, $\delta\text{D} = -68,4$ ‰). Причиной этого могут быть процессы, действующие на верхний слой льда (например, таяние) и вызывающие изменения изотопного состава. В этой работе также есть данные для ледников Западное ледяное поле, Ледниковое плато Ломоносова и Ледниковое плато Амундсена. Предполагается, что различия средних значений $\delta^{18}\text{O}$ для снежно-фирновой толщи этих ледников могут быть обусловлены географическим положением, высотой мест отбора образцов, а также типом льдообразования. В случае ледораздела Грэнфьорд–Фриттьоф и ледникового плато Амундсена изотопный состав мог увеличиваться, так как осадки в течение десятков лет находились в слое инфильтрации с многократными фазовыми переходами. Сами вариации $\delta^{18}\text{O}$ твёрдых атмосферных осадков в толще холодной фирновой зоны сохраняются, но их значения могут повыситься за счёт инфильтрации талых и дождевых вод.

Ледник Финстельвальдера, данные по которому приведены в работе [18], расположен в южной части о. Западный Шпицберген. Пробы ледникового стока отбирали летом 1997 г. и имели более лёгкий изотопный состав ($\delta^{18}\text{O} = -14,1 \div -12,8$ ‰) по сравнению с пробойми 2016–2017 гг. из ледниковых стоков Западного и Восточного Грэнфьорда и Альдегонды. Также более лёгкий изотопный состав имеют: сток ледника Лонгиер, пробы из снежного шурфа на леднике и свежавывавший снег 2004 г. [19]. В работе [2] рассматривались результаты исследования

вод оз. Свартватнет и впадающего в него притока, расположенных в южной части о. Западный Шпицберген. Данные об изотопном составе воды хорошо согласуются с полученными нами результатами для озёр и притоков долин Альдегонда, Западный и Восточный Грэнфьорд и имеют более тяжёлый изотопный состав по сравнению с пробами воды оз. Конгресс ($\delta^{18}\text{O} = -10,5$, $\delta\text{D} = -73,1$ ‰).

Работа [20] посвящена анализу годовых слоёв в ледяном керне с ледника Стурёйякюлен на о. Стурёя (северная часть Шпицбергена, восточнее о. Северо-Восточная Земля). В ней приводятся данные по изотопному составу наложенного льда, которые показывают более низкие, чем в Грэнфьорде, значения. В то же время эти данные соответствуют результатам работы [21], в которой приводятся значения изотопного состава поверхностного льда с ледника Центральный Ловенбрин. Ледник располагается в заливе Конгсфьорд на севере архипелага Шпицберген, вблизи норвежской ГМС Нью Алесунн. Изотопный состав проб с ледников Центральный Ловенбрин и Стурёйякюлен близок по значениям с данными проб, взятых на Ледниковом плато Амундсена. Наблюдается их большая изотопная обогащённость по сравнению с образцами из Западного ледяного поля и Ледникового плато Ломоносова.

В работе [22] приведены данные об изотопном составе природных вод и льдов Земли Норденшельда – в перигляциальной области ледника Альдегонда, долинах Стенброхультдален, Линнея и Грёндален (см. таблицу). Авторы показали, что снег, фирн и лёд ледника Альдегонда характеризуются более низким изотопным составом, чем водоёмы в его перигляциальной области, что подтверждает результаты, полученные в 2016–2017 гг. В работах [23, 24] рассмотрены повторно-жильные льды в долине р. Адвентсельва. Их изотопный состав ниже, чем у объектов, рассмотренных в данной работе, и варьирует в диапазоне $\delta^{18}\text{O} = -15,4 \div -12,23$ ‰.

Выводы

В настоящей работе представлены первые результаты изотопных исследований атмосферных осадков, ледников и водотоков, полученные в результате экспедиционной работы Российской арктической экспедиции на Шпицберге-

не в 2016–2017 гг. Был измерен изотопный состав осадков с августа 2016 г. по апрель 2017 г. в пос. Баренцбург. Средний изотопный состав за указанный период составил, ‰: $\delta^{18}\text{O} = -9,3$, $\delta\text{D} = -65$ ‰. Локальная линия метеорных вод выражается уравнением $\delta\text{D} = 6,93\delta^{18}\text{O} - 0,35$. Изотопный анализ проб, отобранных на ледниках Альдегонда, Западный и Восточный Грёнфьорд, а также в их долинах, позволил установить характер питания объектов в этих районах. Средние значения изотопного состава для этих объектов составили, ‰: лёд – $\delta^{18}\text{O} = -10,4$ и $\delta\text{D} = -73,5$; снег – $\delta^{18}\text{O} = -9,7$ и $\delta\text{D} = -68,2$; водотоки – $\delta^{18}\text{O} = -10,5$ и $\delta\text{D} = -74,0$; озёра в долине – $\delta^{18}\text{O} = -8,6$ и $\delta\text{D} = -65,1$. Анализ проб воды из долины оз. Конгресс показал наличие 13 притоков с атмосферным и 9 с подземным питанием, а также небольшие вариации изотопного состава воды оз. Конгресс по данным за два летних сезона, ‰: 2016 г. – $\delta^{18}\text{O} = -10,6$ и $\delta\text{D} = -74,1$; 2017 г. – $\delta^{18}\text{O} = -10,4$ и $\delta\text{D} = -72,0$.

Таким образом, изотопный метод представляет собой достаточно мощный инструмент, ко-

торый может быть использован в комплексе с гидрологическими, гляциологическими, геофизическими и геохимическими методами для изучения окружающей среды полярных районов. Кроме того, сбор данных и мониторинговые измерения изотопного состава осадков на Шпицбергене важны для создания глобальной карты изотопного состава осадков, в ходе работ над которой отмечена необходимость в получении большего количества изотопных измерений именно для Арктического региона Земли [25].

Благодарности. Полевые работы выполнены в рамках экспедиции «Шпицберген-2017» Российской научной арктической экспедиции на архипелаге Шпицберген (РАЭ-Ш) ААНИИ. Собранные образцы хранились в химико-аналитической лаборатории РАЭ-Ш в пос. Баренцбург.

Acknowledgements. Fieldwork was conducted within the expedition «Spitsbergen-2017» organised by Russian Scientific Arctic Expedition on Spitsbergen Archipelago (RAE-S), AARI. Samples were stored at RAE-S analytical laboratory in Barentsburg.

Литература

1. Dansgaard W. Stable isotopes in precipitation // *Tellus*. 1964. V. 16. P. 436–468. doi: 10.3402/tellusa.v16i4.8993.
2. Arppe L., Kurki E., Wooller M.J., Luoto T.P., Zajaczkowski M., Ojala A.E. A 5500-year oxygen isotope record of high arctic environmental change from southern Spitsbergen // *The Holocene*. 2017. V. 27. № 12. P. 1948–1962. doi: 10.1177/0959683617715698.
3. Гляциология Шпицбергена / Ред. В.М. Котляков. М.: Наука, 1985. 200 с.
4. Екайкин А.А. Стабильные изотопы воды в гляциологии и палеогеографии / Ред. В.Я. Липенков. Санкт-Петербург: ААНИИ, 2016. 64 с.
5. Электронный ресурс: <https://rp5.ru/>.
6. Электронный ресурс: HYSPLIT <https://www.arl.noaa.gov/hysplit/hysplit/>.
7. Cisek M., Makuch P., Petelski T. Comparison of meteorological conditions in Svalbard fjords: Hornsund and Kongsfjorden // *Oceanologia*. 2017. V. 59. № 4. P. 413–421. doi: 10.1016/j.oceano.2017.06.004.
8. Электронный ресурс: МАГАТЭ – Международное Агентство по Атомной Энергии. International Atomic Energy Agency/World Meteorological Organization (IAEA/WMO) 2006. Global network of isotopes in precipitation. The GNIP database. Accessed on the internet <http://www.iaea.org/water> on 12 October 2010.

References

1. Dansgaard W. Stable isotopes in precipitation. *Tellus*. 1964, 16: 436–468. doi: 10.3402/tellusa.v16i4.8993.
2. Arppe L., Kurki E., Wooller M.J., Luoto T.P., Zajaczkowski M., Ojala A.E. A 5500-year oxygen isotope record of high arctic environmental change from southern Spitsbergen. *The Holocene*. 2017, 27 (12): 1948–1962. doi: 10.1177/0959683617715698.
3. *Glyatsiologiya Shpitsbergena*. Glaciology of Spitsbergen. Ed. V.M. Kotlyakov. Moscow: Nauka, 1985: 200 p. [In Russian].
4. Ekaykin A.A. *Stabilnye isotopy vody v gliatsiologii i paleogeografii*. Stable isotopes of water in glaciology and palaeogeography. Ed. V.Ya. Lipenkov. St.-Petersburg: AARI, 2016: 64 p. [In Russian].
5. <https://rp5.ru/>
6. HYSPLIT <https://www.arl.noaa.gov/hysplit/hysplit/>.
7. Cisek M., Makuch P., Petelski T. Comparison of meteorological conditions in Svalbard fjords: Hornsund and Kongsfjorden. *Oceanologia*. 2017, 59 (4): 413–421. doi: 10.1016/j.oceano.2017.06.004.
8. International Atomic Energy Agency/World Meteorological Organization (IAEA/WMO) 2006. Global network of isotopes in precipitation. The GNIP database. Accessed on the internet <http://www.iaea.org/water> on 12 October 2010.
9. Wetzel K. Isotopic peculiarities of meteoric water in polar regions. *Isotopenpraxis Isotopes in Environ-*

9. *Wetzel K.* Isotopic peculiarities of meteoric water in polar regions // *Isotopenpraxis Isotopes in Environmental and Health Studies*. 1990. V. 26. № 1. P. 11–13. doi: 10.1080/10256019008624211.
10. *Divine D.V., Sjolte J., Isaksson E., Meijer H.A.J., van de Wal R.S.W., Martma T., Pohjola V., Sturm C., Godtliabsen F.* Modelling the regional climate and isotopic composition of Svalbard precipitation using REMO_{iso}: a comparison with available GNIP and ice core data // *Hydrological Processes*. 2011. V. 25. № 24. P. 3748–3759. doi: 10.1002/hyp.8100.
11. *Кокун О.В.* Рельеф и отложения краевых зон ледников Западного Шпицбергена (на примере ледников Грэнфьорд и Альдегонда): Автореф. дис. на соиск. уч. степ. канд. геогр. наук. М.: МГУ, 2010. 24 с.
12. *Оледенение Шпицбергена (Свальбарда)* / Ред. Л.С. Троицкий. М: Наука, 1975. 276 с.
13. *Чернов Р.А., Васильева Т.В., Кудиков А.В.* Температурный режим поверхностного слоя ледника Восточный Грэнфьорд (Западный Шпицберген) // *Лёд и Снег*. 2015. Т. 55. № 3. С. 38–46. doi: 10.15356/2076-6734-2015-3-38-46.
14. *Guilizzoni P., Marchetto A., Lami A., Brauer A., Vigliotti L., Musazzi S., Langone L., Manca M., Lucchini F., Calanchi N., Dinelli E., Mordenti A.* Records of environmental and climatic changes during the late Holocene from Svalbard: palaeolimnology of Kongressvatnet // *Journ. of Paleolimnology*. 2006. V. 36. № 4. P. 325–351. doi: 10.1007/s10933-006-9002-0.
15. *Соловьянова И.Ю., Третьяков М.В.* Наблюдение за стоком взвешенных наносов рек бассейна залива Грэнфьорд // *Комплексные исследования Шпицбергена*. Вып. 4. Апатиты: Изд. КНЦ РАН, 2004. С. 230–236.
16. *Yde J., Hodson A., Solovjanova I., Steffensen J., Nørnberg P., Heinemeier J., Olsen J.* Chemical and isotopic characteristics of a glacier-derived naled in front of Austre Grønfjordbreen, Svalbard // *Polar Research*. 2012. V. 31. № 1. P. 17628. doi: 10.3402/polar.v31i0.17628.
17. *Vaykmyae R.A., Martma T.A., Punning Y.M., Tyugu K.R.* Variations in $\delta^{18}\text{O}$ and Cl^- in an ice core from Vestfonna Nordaustlandet // *Polar Geography*. 1985. V. 9. № 4. P. 329–333. doi: 10.1080/10889378509377263.
18. *Wadham J.L., Bottrell S., Tranter M., Raiswell R.* Stable isotope evidence for microbial sulphate reduction at the bed of a polythermal High Arctic glacier // *Earth and Planetary Science Letters*. 2004. V. 219. № 3–4. P. 341–355. doi: 10.1016/S0012-821X(03)00683-6.
19. *Yde J.C., Riger-Kusk M., Christiansen H.H., Knudsen N.T., Humlum O.* Hydrochemical characteristics of bulk meltwater from an entire ablation season, Longyearbreen, Svalbard // *Journ. of Glaciology*. 2008. V. 54. P. 259–272. doi: 10.3189/002214308784886234.
20. *mental and Health Studies*. 1990, 26 (1): 11–13. doi: 10.1080/10256019008624211.
10. *Divine D.V., Sjolte J., Isaksson E., Meijer H.A.J., van de Wal R.S.W., Martma T., Pohjola V., Sturm C., Godtliabsen F.* Modelling the regional climate and isotopic composition of Svalbard precipitation using REMO_{iso}: a comparison with available GNIP and ice core data. *Hydrological processes*. 2011, 25 (24): 3748–3759. doi: 10.1002/hyp.8100.
11. *Kokin O.V.* *Rel'ef i otlozheniya kraevyih zon lednikov Zapadnogo Shpitsbergena (na primere lednikov Gronford i Aldegonda)*. Relief and deposition of edge zones of West Svalbard glaciers (using the example of the Grenfjord and Aldegonda glaciers). PhD thesis Moscow: MGU, 2010. 24 p. [In Russian].
12. *Oledenenie Spitsbergena (Svalbarda)*. Glaciation of Spitsbergen (Svalbard). Ed. L.C. Troitskiy. Moscow: Nauka, 1975: 276 p. [In Russian].
13. *Chernov R.A., Vasileva T.V., Kudikov A.V.* Temperature regime of the surface layer of the East Grenfjord glacier (West Svalbard). *Led i Sneg*. Ice and Snow. 2015, 55 (3): 38–46. [In Russian]. doi: 10.15356/2076-6734-2015-3-38-46.
14. *Guilizzoni P., Marchetto A., Lami A., Brauer A., Vigliotti L., Musazzi S., Langone L., Manca M., Lucchini F., Calanchi N., Dinelli E., Mordenti A.* Records of environmental and climatic changes during the late Holocene from Svalbard: palaeolimnology of Kongressvatnet. *Journ. of Paleolimnology*. 2006, 36 (4): 325–351. doi: 10.1007/s10933-006-9002-0.
15. *Solovyanova I.Yu., Tretyakov M.V.* Monitoring the suspended sediment discharge of the rivers of the Grenfjord Basin. *Kompleksnye issledovaniya Shpitsbergena*. Complex investigations of Spitsbergen. Apatityi: Izdatel'stvo KNTS RAN. 2004, 4: 230–236. [In Russian].
16. *Yde J., Hodson A., Solovjanova I., Steffensen J., Nørnberg P., Heinemeier J., Olsen J.* Chemical and isotopic characteristics of a glacier-derived naled in front of Austre Grønfjordbreen, Svalbard. *Polar Research*. 2012, 31 (1): 17628. doi: 10.3402/polar.v31i0.17628.
17. *Vaykmyae R.A., Martma T.A., Punning Y.M., Tyugu K.R.* Variations in $\delta^{18}\text{O}$ and Cl^- in an ice core from Vestfonna Nordaustlandet. *Polar Geography*. 1985, 9 (4): 329–333. doi: 10.1080/10889378509377263.
18. *Wadham J.L., Bottrell S., Tranter M., Raiswell R.* Stable isotope evidence for microbial sulphate reduction at the bed of a polythermal High Arctic glacier. *Earth and Planetary Science Letters*. 2004, 219 (3–4): 341–355. doi: 10.1016/S0012-821X(03)00683-6.
19. *Yde J.C., Riger-Kusk M., Christiansen H.H., Knudsen N.T., Humlum O.* Hydrochemical characteristics of bulk meltwater from an entire ablation season, Longyearbreen, Svalbard. *Journ. of Glaciology*. 2008, 54: 259–272. doi: 10.3189/002214308784886234.

20. Jonsson S., Hansson M. Identification of annual layers in superimposed ice from Storöyjökulen in north-eastern Svalbard // *Geografiska Annaler: Series A. Physical Geography*. 1990. V. 72. № 1. P. 41–54. doi: 10.1080/04353676.1990.11880299.
21. Glasser N. F., Hambrey M. J. δD – $\delta^{18}O$ relationships on a polythermal valley glacier: Midtre Lovénbreen, Svalbard // *Polar Research*. 2002. V. 21. № 1. P. 123–131. doi: 10.3402/polar.v21i1.6478.
22. Архипов С.М., Хуббертен Х.-В., Ванштейн Б.Г., Мейер Х., Ананичева М.Д., Саватюгин Л.М., Прямоков С.М., Чернов Р.А., Стрелецкий Д.А. Геохимия природных вод и льдов Земли Норденшельда (о. Зап. Шпицберген) // МГИ. 2006. Вып. 100. С. 200–206.
23. Васильчук Ю.К., Буданцева Н.А., Васильчук А.К., Земскова А.М., Кристиансен Х., Чижова Ю.Н. Изменение содержания стабильных изотопов кислорода и водорода в повторно-жильных льдах Ямала и Свальбарда, сформировавшихся за последние 2 тысячи лет // *Криосфера Земли*. 2012. Вып. 16. № 1. С. 43–55.
24. Vasil'chuk Y.K., Budantseva N.A., Christiansen H.H., Chizhova J.N., Vasil'chuk A.C., Zemskova A.M. Oxygen stable isotope variation in Late Holocene ice wedges in Yamal Peninsula and Svalbard // *Geography. Environment. Sustainability*. 2015. V. 8. № 3. P. 36–54. doi: 10.24057/2071-9388-2015-8-3-36-54.
25. Bowen G. J., Revenaugh J. Interpolating the isotopic composition of modern meteoric precipitation // *Water Resources Research*. 2003. V. 39. № 10. doi: 10.1029/2003WR002086.
20. Jonsson S., Hansson M. Identification of annual layers in superimposed ice from Storöyjökulen in northeastern Svalbard. *Geografiska Annaler: Series A. Physical Geography*. 1990, 72 (1): 41–54. doi: 10.1080/04353676.1990.11880299
21. Glasser N. F., Hambrey M. J. δD – $\delta^{18}O$ relationships on a polythermal valley glacier: Midtre Lovénbreen, Svalbard. *Polar Research*. 2002, 21 (1): 123–131. doi: 10.3402/polar.v21i1.6478.
22. Arkhipov S.M., Hubberten H.W., Vanshtein B.G., Meyer H., Ananicheva M.D., Savatyugin L.M., Pryanikov S.M., Chernov R.A., Streletsky D.A. Geochemistry of natural water and ice objects on Nordenskiöld Land (Western Spitsbergen). *Materialy glaciologicheskikh issledovaniy*. Data of Glaciological Studies. 2006, 100: 200–206. [In Russian].
23. Vasil'chuk Yu.K., Budantseva N.A., Vasil'chuk A.C., Zemskova A.M., Christiansen H.H., Chizhova Ju.N. Oxygen and hydrogen stable isotope variation in ice-wedges in Yamal peninsula and Svalbard formed over the last 2 kyr. *Kriosfera Zemli*. Earth's Cryosphere. 2012, 16 (1): 43–55. [In Russian].
24. Vasil'chuk Y.K., Budantseva N.A., Christiansen H.H., Chizhova J.N., Vasil'chuk A.C., Zemskova A.M. Oxygen stable isotope variation in Late Holocene ice wedges in Yamal Peninsula and Svalbard. *Geography. Environment. Sustainability*. 2015, 8 (3): 36–54. doi: 10.24057/2071-9388-2015-8-3-36-54.
25. Bowen G.J., Revenaugh J. Interpolating the isotopic composition of modern meteoric precipitation. *Water Resources Research*. 2003, 39 (10). doi: 10.1029/2003WR002086.