

<https://doi.org/10.30758/0555-2648-2021-67-4-368-381>  
УДК 551.583.2



ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

ORIGINAL ARTICLE

## СВЯЗЬ ИЗОТОПНОГО СОСТАВА РАЗНЫХ ТИПОВ ОСАДКОВ В ЦЕНТРАЛЬНОЙ АНТАРКТИДЕ С ТЕМПЕРАТУРОЙ ВОЗДУХА

Н.А. ТЕБЕНЬКОВА<sup>1\*</sup>, А.А. ЕКАЙКИН<sup>1,2</sup>, Т. ЛЭППЛЕ<sup>3</sup>, Д. НОТЦ<sup>4,5</sup>,  
А.В. КОЗАЧЕК<sup>1</sup>, А.Н. ВЕРЕС<sup>1</sup>

<sup>1</sup> — ГНЦ РФ Арктический и антарктический научно-исследовательский институт, Санкт-Петербург, Россия

<sup>2</sup> — Институт наук о Земле, Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

<sup>3</sup> — Институт полярных и морских исследований им. Альфреда Вегенера, Потсдам, Германия

<sup>4</sup> — Гамбургский университет, Гамбург, Германия

<sup>5</sup> — Институт метеорологии Макса Планка, Гамбург, Германия

\*natebenkova@aari.ru

### Резюме

Изучение изотопного состава ледяных кернов дает нам ценную информацию о климате прошлого. Для правильной интерпретации данных, полученных из ледяных кернов, необходимо понимать процесс формирования изотопного сигнала в атмосферных осадках. В этой работе исследована зависимость изотопного состава трех основных для Центральной Антарктиды типов осадков — ледяных игл, изморози и снега — от приземной температуры воздуха. Использованы образцы, отобранные в районе российской внутриконтинентальной станции Восток в период с 1998 по 2020 г. Коэффициенты линейной регрессии между концентрацией дейтерия ( $\delta D$ ) и температурой различаются статистически незначимо для всех типов осадков в пределах годового цикла:  $2,93 \pm 0,51 \text{‰} \cdot \text{°C}^{-1}$  для ледяных игл,  $2,32 \pm 1,34 \text{‰} \cdot \text{°C}^{-1}$  для снега и  $2,52 \pm 0,35 \text{‰} \cdot \text{°C}^{-1}$  для изморози. Сделан анализ сезонной изменчивости изотопно-температурной зависимости для ледяных игл. Для зимнего периода связь между изотопным составом и температурой воздуха не обнаружена. Летом наблюдается наибольший наклон изотопно-температурной зависимости, равный  $5,34 \pm 3,11 \text{‰} \cdot \text{°C}^{-1}$ , наклон для осеннего периода равен  $2,1 \pm 1,3 \text{‰} \cdot \text{°C}^{-1}$ , тогда как для весеннего периода мы не располагаем достаточным количеством данных для анализа. В исследовании не использовались осадки, отобранные во время метелей, поскольку было установлено, что метель привносит снег с другим изотопным составом в образец.

**Ключевые слова:** изморозь, ледяные иглы, снег, стабильные изотопы воды, станция Восток, Центральная Антарктида.

**Для цитирования:** Тебенькова Н.А., Екайкин А.А., Лэппле Т., Нотц Д., Козачек А.В., Верес А.Н. Связь изотопного состава разных типов осадков в Центральной Антарктиде с температурой воздуха // Проблемы Арктики и Антарктики. 2021. Т. 67. № 4. С. 368–381. <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2021-67-4-368-381>.

Поступила 02.11.2021

После переработки 24.11.2021

Принята 29.11.2021

## DEPENDENCE OF THE ISOTOPIC COMPOSITION OF DIFFERENT PRECIPITATION TYPES ON AIR TEMPERATURE IN CENTRAL ANTARCTICA

NATALIA A. TEBENKOVA<sup>1\*</sup>, ALEXEY A. EKAYKIN<sup>1,2</sup>, THOMAS LAEPPLÉ<sup>3</sup>, DIRK NOTZ<sup>4,5</sup>,  
ANNA V. KOZACHEK<sup>1</sup>, ARINA N. VERES<sup>1</sup>

<sup>1</sup> — State Scientific Center of the Russian Federation Arctic and Antarctic Research Institute, St. Petersburg, Russia

<sup>2</sup> — Institute of Earth Sciences, St. Petersburg State University, St. Petersburg, Russia

<sup>3</sup> — Alfred-Wegener-Institut für Polar- und Meeresforschung, Potsdam, Germany

<sup>4</sup> — The University of Hamburg, Hamburg, Germany

<sup>5</sup> — Max Planck Institute for Meteorology, Hamburg, Germany

\*natebenkova@aari.ru

### Summary

Water isotopes are key proxies to reconstruct past climatic conditions on our planet based on Antarctic ice core data. The accuracy of climate reconstructions depends on understanding the whole range of the processes involved in the formation of precipitation isotopic composition. The isotopic composition of precipitation in Central Antarctica has been studied in a number of works, but the difference between the isotopic composition of different types of precipitation has not yet been fully described.

There are three main type of precipitation in Central Antarctica: snow, ice needles and hoar. The aim of this work is to establish the dependence of isotopic composition of different precipitation types on temperature. Precipitation samples were collected at Vostok station in Central Antarctica from 1998 to 2020 and further analyzed for  $\delta^{18}\text{O}$  and  $\delta\text{D}$ . For each precipitation event we have meteorological data, averaged over the time of precipitation fallout.

Mean values of  $\delta\text{D}$  for each precipitation type were defined as follows:  $-444 \pm 6.5$  ‰ for diamond dust,  $-480 \pm 6$  ‰ for hoar and  $-95 \pm 11$  ‰ for snow. The seasonal variability of the temperature dependence of the isotopic composition was studied using the example of ice needles. According to our data, the dependence is insignificant in winter, but this needs to be confirmed by an extended dataset. The largest slope of the isotope-temperature dependence regression line is observed for the summer period and is equal to  $5.34 \pm 3.11$  ‰ $\cdot$ °C<sup>-1</sup>, the autumn season has a slope of  $2.1 \pm 1.3$  ‰ $\cdot$ °C<sup>-1</sup>, while for the spring period we do not have enough data for analysis. There is an insignificant difference in the slopes of the isotope-temperature dependence for different types of precipitation:  $2.93 \pm 0.51$  ‰ $\cdot$ °C<sup>-1</sup> for ice needles,  $2.32 \pm 1.34$  ‰ $\cdot$ °C<sup>-1</sup> for snow and  $2.52 \pm 0.35$  ‰ $\cdot$ °C<sup>-1</sup> for hoar. We studied the effect of blizzards on the isotopic composition of samples and concluded that one should avoid using data collected during a blizzard to study the differences in the formation of the isotopic signal for different types of precipitation.

This work brings us closer to understanding how isotopic composition is formed in each type of precipitation and what information it provides. This will contribute to a more accurate interpretation of the isotope signal from ice cores.

**Keywords:** Central Antarctica, ice needles, hoar, precipitation, snow, stable water isotopes, Vostok station.

**For Citation:** Tebenkova N.A., Ekaykin A.A., Laepple T., Notz D., Kozachek A.V., Veres A.N. Dependence of the isotopic composition of different precipitation types on air temperature in Central Antarctica. *Problemy Arktiki i Antarktiki*. Arctic and Antarctic Research. 2021, 67 (4): 368–381. [In Russian]. <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2021-67-4-368-381>.

Received 02.11.2021

Revised 24.11.2021

Accepted 29.11.2021

### ВВЕДЕНИЕ

Изучение стабильных изотопов воды в поверхностном снеге и в глубоких ледяных ядрах дает ценную информацию о климате прошлого и настоящего. Изотопный

состав осадков связан с климатическими условиями в источнике водяного пара и в области конденсации, где выпадают осадки. Концентрации D,  $^{18}\text{O}$  и  $^{17}\text{O}$  в образцах атмосферных осадков дают косвенную информацию о температуре воздуха, влажности, о движении воздушных масс. Атмосферные осадки аккумулируются на ледяных щитах в течение долгого времени, так мы получаем возможность изучать климат прошлого. Чтобы получить больше информации с помощью изотопного метода, рассчитываются дополнительные параметры — «эксцесс дейтерия» (dxs) и  $^{17}\text{O}$ -excess.

Dxs вычисляется по формуле  $\text{dxs} = \delta\text{D} - 8 \cdot \delta^{18}\text{O}$ . На этот параметр основное влияние оказывает влажность воздуха в источнике влаги, влияние температуры сказывается значительно меньше [1]. Значения dxs используют для реконструкции температуры воздуха и влажности в месте образования водяного пара, а также как индикатор сохранности образца — если при хранении образец подвергался частичному испарению, это можно довольно явно увидеть благодаря пониженным значениям dxs. Второй параметр — это  $^{17}\text{O}$ -excess ( $^{17}\text{O}$ -excess /  $10^6 = \ln(\delta^{17}\text{O} / 1000 + 1) - 0,528 \cdot \ln(\delta^{18}\text{O} / 1000 + 1)$ ).  $^{17}\text{O}$ -excess сильно реагирует на изменения в условиях формирования влаги над океаном и практически не зависит от температуры.  $^{17}\text{O}$ -excess используется для реконструкции условий формирования водяного пара над океаном [2]. Параметр dxs выражается в промилле, а  $^{17}\text{O}$ -excess — в частях на миллион (ppm).

Климатические условия Центральной Антарктиды определяются ее внутриконтинентальным, высокоширотным и высокогорным положением. Из-за возвышенности и удаленности этой местности от океана циклоны здесь наблюдаются редко, в результате чего большую часть времени преобладает холодная континентальная антарктическая воздушная масса. Холодные и засушливые условия в Центральной Антарктиде влияют на количество и тип осадков. Осадки делятся на 3 типа: выпадающие из облаков — снег, выпадающие из ясного неба — ледяные иглы (также называемые «алмазной пылью») и осаждающиеся из воздуха — изморозь. Эти типы осадков образуются в разных условиях. Ледяные иглы образуются при ясном или малооблачном небе при температурной инверсии, когда нисходящий воздух охлаждается и воздух становится перенасыщенным водой [3]. Снег образуется в основном при циклоническом типе погоды. Сильные снегопады в Центральной Антарктиде случаются редко, поскольку воздушные массы теряют большую часть влаги, не достигнув центра материка. Изморозь образуется на различных поверхностях благодаря поверхностному охлаждению вышележащего воздуха ниже точки росы. Это происходит из-за адвекции более теплого воздуха на более холодную поверхность или из-за радиационного охлаждения. Первой и пока единственной работой, в которой было проведено исследование изотопного состава различных типов осадков в Центральной Антарктиде, является работа [4]. Авторы показали, что разные типы осадков отражают разные процессы конечной конденсации, и зафиксировали более низкое содержание  $\delta^{18}\text{O}$  и более высокие значения dxs для изморози по сравнению с иглами снега и льда. Однако они не смогли установить, является ли это изотопное истощение результатом более низких температур конденсации во время образования изморози или следствием пониженного содержания тяжелых изотопов в водяном паре, из которого она конденсируется. Также они показали разницу между изотопно-температурной зависимостью зимой и летом. Выводы, сделанные в работе [4], основаны на данных станции Конкордия, климатические условия которой типичны для Центральной Антарктиды.

В данной работе мы изучили связь изотопного состава разных типов осадков с температурой воздуха в другом районе Центральной Антарктиды. Мы исследовали годовой ход изотопного состава и особенности изотопно-температурной зависимости для каждого типа осадков, а также сезонную изменчивость изотопно-температурной зависимости.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

### Отбор проб снежных осадков на станции Восток

Образцы для исследования были отобраны на станции Восток в течение зимнего и летнего сезона 45-й Российской антарктической экспедиции (РАЭ) с декабря 1999 по декабрь 2000 г., 62–63-й РАЭ с декабря 2016 г. по февраль 2018 г. и в течение летних сезонов 44-й (1998–1999 гг.), 52-й (2006–2007 гг.), 64-й (2018–2019 гг.) и 65-й (2019–2020 гг.) РАЭ. Всего отобрано и проанализировано на  $\delta^{18}\text{O}$  и  $\delta\text{D}$  278 проб, из которых 205 проб также проанализированы на  $\delta^{17}\text{O}$ . Пробы отбирались из коллектора (снежной ловушки) на высоте 1–1,5 м (рис. 1). В случае, когда выпадение осадков сопровождалось метелью или поземком, соответствующая информация добавлялась к описанию данного образца, так как переметенный снег может иметь другой изотопный состав.

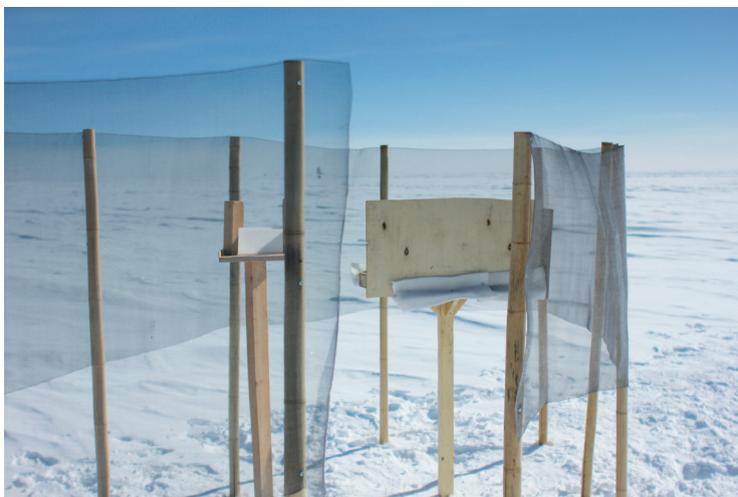


Рис. 1. Снежная ловушка для атмосферных осадков на станции Восток

Fig. 1. The trap to collect snow precipitation at Vostok station

### Метеорологические данные

Метеорологические данные взяты из метеорологических таблиц «КМ-1» и из полевых дневников участников экспедиций. Метеорологические данные и значения изотопного состава образцов собраны в одну базу данных. Она содержит значения метеорологических параметров, осредненные за время выпадения осадков, — средней, максимальной и минимальной температуры, атмосферного давления, скорости и направления ветра, влажности, количества осадков, типа облаков и покрытия. Тип осадков определялся гляциологом, который отбирал образцы, и метеорологом, который следил за погодой. Если во время выпадения осадков была метель или поземок, это отмечалось в названии образца. Иногда одновременно наблюдались два

или три типа осадков, в таком случае название образца включало в себя оба типа, например — ледяные иглы и снег с поземком. Все образцы были разделены по типу осадков (с учетом метелей и поземков), итоговая база данных содержит 19 категорий осадков. Для изучения особенностей формирования изотопного состава каждого из трех видов осадков использовались только «чистые» образцы без примеси других типов осадков, во время выпадения которых не наблюдалось метели или поземка. В итоге для дальнейшего анализа использовались 52 образца ледяных игл, 50 образцов изморози и 14 образцов снега.

Для дальнейшего анализа база данных была разделена на 4 сезона. Из-за полярной ночи, низких температур и почти полного отсутствия испарения мы выделили особенно длинный зимний сезон, включающий в себя 6 месяцев (с апреля по сентябрь); каждый из остальных сезонов включает по 2 месяца (октябрь и ноябрь — весна, декабрь и январь — лето, февраль и март — осень).

### Методика измерений

Созданная нами база данных изотопного состава образцов содержит результаты исследований, выполненных в разных лабораториях. Образцы за 1998–2007 гг. измерены в Лаборатории наук о климате и окружающей среде (Сакле, Франция) и в Институте Нильса Бора (Копенгагенский университет, Дания). Для изотопных измерений использовался масс-спектрометрический метод, измерения проводились на масс-спектрометре Finnigan MAT 250; воспроизводимость результатов составила 0,6–0,8 ‰ для  $\delta D$  и 0,05 ‰ для  $\delta^{18}O$  (1 $\sigma$ ), что достаточно для целей этого исследования. Образцы 2016–2020 гг. измерены в Лаборатории изменений климата и окружающей среды Арктического и антарктического научно-исследовательского института (ЛИКОС ААНИИ, Санкт-Петербург, Россия). Измерения проводились на лазерных анализаторах Picarro L2120-i и Picarro L2140-i. Эти анализаторы используют метод спектроскопии внутривибрационного спада сигнала во времени (cavity ring-down spectroscopy — CRDS). Изотопный анализатор воды Picarro L2140-i позволяет измерять  $\delta^{18}O$ ,  $\delta^{17}O$  и  $\delta D$ , в то время как Picarro L2120-i измеряет только  $\delta^{18}O$  и  $\delta D$ .

Для всех измерений в ЛИКОС использовался рабочий стандарт VOS, изготовленный из поверхностного антарктического снега, собранного в районе станции Восток. Этот стандарт был откалиброван относительно стандартов Международного агентства по атомной энергии (МАГАТЭ) — VSMOW-2, GISP, SLAP-2. Для измерения  $\delta^{18}O$  и  $\delta D$  использовался метод, при котором после каждых 5 проб измеряется стандарт. Воспроизводимость результатов, оцененная повторным измерением 10 % случайно выбранных образцов, составила 0,05 ‰ для  $\delta^{18}O$  и 0,5 ‰ для  $\delta D$ .  $\delta^{17}O$  измерялся по другой методике. В каждую серию измерений входило только 5 образцов, продолжительность измерений которых составляла 3 дня. В данном исследовании будут использоваться только данные по  $\delta^{18}O$  и  $\delta D$ . Анализ результатов измерения  $^{17}O$ -excess будет выполнен в другой работе.

### РЕЗУЛЬТАТЫ

#### Исследование влияния метели на изотопный состав образцов

Созданная нами база данных содержит 278 проб атмосферных осадков, из которых только 116 проб являются «чистыми» пробами одного типа осадков без примесей других типов осадков и без влияния поземка или метели. Чтобы понять, какие образцы мы можем использовать для изучения изотопно-температурной за-

висимости осадков, в первую очередь мы изучили влияние переметенного снега на изотопный состав отобранных образцов. Для этого мы рассмотрели уравнения изотопно-температурной зависимости для образцов ледяных игл, собранных во время метели или поземка, и для «чистых» ледяных игл. Наклоны этих кривых равны  $2,93 \pm 0,25$  (в качестве погрешности указана одна стандартная ошибка среднего) для чистых ледяных игл,  $3,22 \pm 0,27$  для ледяных игл, отобранных во время поземка,  $3,54 \pm 0,3$  для ледяных игл, отобранных во время метели,  $3,89 \pm 0,39$  для ледяных игл, отобранных во время поземка и метели. Можно заметить, что метель оказывает существенное влияние на наклон изотопно-температурной зависимости. В отличие от поземка, при метели перенос снега происходит на высоте глаз наблюдателя, т. е. теоретически этот снег может быть занесен в ловушку для осадков. Таким образом, метель может повлиять на изотопный состав образца из-за переноса снега с другим изотопным составом. Поэтому было принято решение при дальнейшем анализе не использовать образцы, которые были собраны во время метели.

### Распределение и количество осадков на станции Восток

В центральной части Антарктиды наблюдается чрезвычайно низкое годовое количество осадков. Осадки бывают в основном в виде ледяных игл и изморози, значительно реже выпадает снег (рис. 2).

На рис. 2 представлено распределение всех типов осадков за исследуемый период с 1998 по 2020 г., построенное на основе отобранных проб. Для построения диаграммы использованы те образцы, которые содержат только один вид осадков. На рисунке указаны: частота выпадения каждого типа осадков (в процентах), суммарное количество осадков за исследуемый период (в мм водного эквивалента) и количество событий выпадений осадков. Почти в половине случаев выпадений осадков (около 45 %) наблюдаются ледяные иглы, 43 % всех дней с осадками наблюдается изморозь. Снегопады фиксируются в 12 % случаев выпадений осадков. Однако, если сравнивать количество осадков, эти соотношения меняются. За один снегопад выпадает большее количество осадков в мм водного эквивалента, чем за одно событие выпадения ледяных игл или образования изморози, поэтому вклад снега в общий объем атмосферных осадков за год составляет около 40 %. Ледяные иглы сохраняют ту же долю около 40–50 % ввиду того, что они выпадают часто. Для

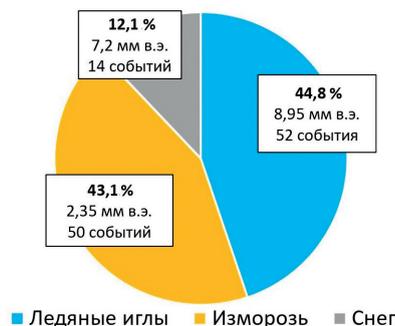


Рис. 2. Распределение и суммарное количество (в мм водного эквивалента — мм в. э.) разных типов осадков в пробах, отобранных за период 1998–2020 гг.

Fig. 2. Distribution and amount (in mm water equivalent — mm w. e.) of different precipitation types at Vostok during the 1998–2020 period

образования изморози нужны особые условия, скорость роста изморози довольно низкая, поэтому в общем годовом объеме осадков на него приходится небольшая доля, в среднем около 13 %. Эти проценты меняются из года в год — например, в 2000 г. объем изморози в водном эквиваленте был равен объему выпавшего снега. Ввиду того что изморозь формируется в малых количествах, ее точный объем трудно измерить. В метеорологических таблицах о количестве образовавшейся изморози зачастую нет никакой информации, поэтому количественные данные об изморози требуют проверки, в то время как информация о частоте образования изморози (количестве дней, когда наблюдалась изморозь) более достоверна и надежна.

### Годовой ход температуры и изотопного состава

На рис. 3 представлен годовой ход изотопного состава разных типов осадков, построенный на основе отобранных образцов, и годовой ход приземной температуры воздуха в дни, когда отбирались осадки. Изотопный состав атмосферных осадков значимо коррелирует с температурой воздуха. Среднесуточная температура воздуха на высоте 2 м изменяется от  $-77,2$  °C зимой до  $-22,9$  °C летом. Такой годовой ход температуры типичен для Центральной Антарктиды. Резкое повышение температуры в весенний сезон следует за резким ростом инсоляции, а максимум температуры наблюдается, как правило, в первой декаде января вскоре после пика инсоляции в конце декабря. Зимой отсутствие коротковолнового излучения от Солнца приводит к отрицательному радиационному балансу.

Как видно из рис. 3, значения  $\delta D$  изменяются в диапазоне от  $-561,1$  до  $-277,4$  ‰, (значения  $\delta^{18}O$ , которые здесь не показаны, — в пределах от  $-75$  до  $-34,4$  ‰). Для каждого типа осадков рассчитаны средние значения изотопного состава:  $\delta D = -444,2 \pm 6,5$  ‰ для ледяных игл,  $\delta D = -480,0 \pm 5,7$  ‰ для изморози и  $\delta D = -395,2 \pm 10,7$  ‰ для снега (в качестве погрешности указана 1 стандартная ошибка среднего). Полученные нами данные свидетельствуют о том, что снег имеет более высокие значения изотопного состава, чем ледяные иглы и изморозь. (Заметим, что зимой удалось отобрать всего

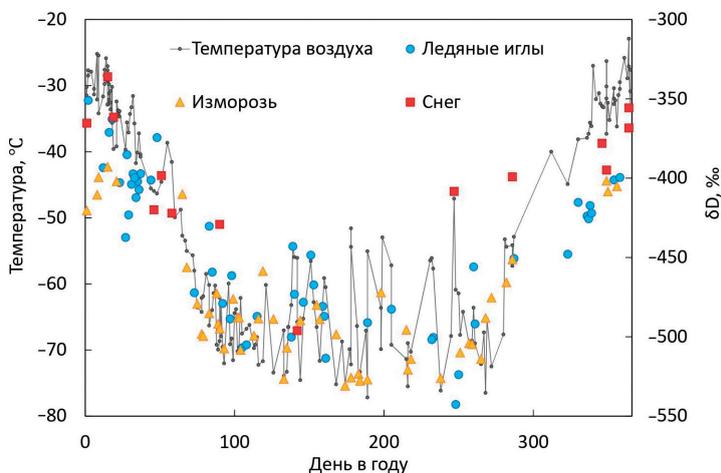


Рис. 3. Годовой ход изотопного состава осадков и приземной температуры воздуха в дни, когда отбирались осадки

Fig. 3. Seasonal cycle of isotopic composition of precipitation and near-surface air temperature on the days when precipitation was collected

одну пробу снега, в то время как образцы ледяных игл и изморози распределены более равномерно по всем сезонам года.) В целом изотопный состав изморози самый низкий, поскольку она, как правило, выпадает при более низких значениях приземной температуры.

## ОБСУЖДЕНИЕ

### Локальная линия метеорных вод

Еще на заре развития изотопного метода было обнаружено, что содержание дейтерия (D) и  $^{18}\text{O}$  в атмосферных осадках связаны линейной зависимостью [5]. Во время изотопного фракционирования при фазовых переходах молекулы  $\text{HD}^{16}\text{O}$  и  $\text{H}_2^{18}\text{O}$  ведут себя схожим образом, есть лишь небольшая разница в значениях равновесных и кинетических коэффициентов фракционирования. Зависимость концентрации дейтерия от концентрации  $^{18}\text{O}$ , построенная по данным атмосферных осадков со всего мира, называется глобальной линией метеорных вод ( $\delta\text{D} = 8 \cdot \delta^{18}\text{O} + 10$ ). Однако, строго говоря, зависимость между  $\delta\text{D}$  и  $\delta^{18}\text{O}$  нелинейна, и в областях с низкой температурой конденсации и, соответственно, с низкими значениями изотопного состава наклон этой линии становится меньше (рис. 4).

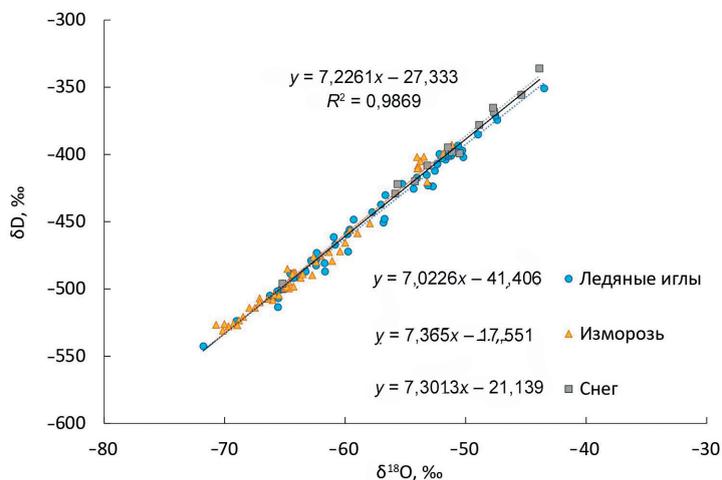


Рис. 4. Локальная линия метеорных вод для разных типов осадков на станции Восток  
Fig. 4. Local meteoric water line for different precipitation types at Vostok station

Результаты, представленные на рис. 4, показывают, что локальная линия метеорных вод для станции Восток с 1998 по 2020 г. имеет уравнение  $\delta\text{D} = 7,23 \cdot \delta^{18}\text{O} - 27$  ( $R^2 = 0,987$ ) для всех типов осадков. Такие малые значения наклонов характерны для высокоширотных районов; уменьшение наклона линейной регрессии  $\delta\text{D}$  ( $\delta^{18}\text{O}$ ) при движении от прибрежной части Антарктиды к внутренним областям находит отражение в соответствующем увеличении значения  $\text{d}\text{x}\text{s}$  [4]. Самый большой наклон зависимости  $\delta\text{D}$  ( $\delta^{18}\text{O}$ ) наблюдается для изморози, он равен  $7,36 \pm 0,15$  ( $1\sigma$ ). Для ледяных игл наклон этой зависимости равен  $7,02 \pm 0,13$ , для снега он равен  $7,3 \pm 0,23$ . Очевидно, что наблюдаемые различия статистически не значимы. Действительно, можно было бы ожидать, что наименьшее значение наклона будет наблюдаться для изморози, которая формируется при наиболее низкой температуре воздуха. В работе [4] локальная линия метеорных вод описывается уравнением  $\delta\text{D} = 6,5 \cdot \delta^{18}\text{O} - 68,8$  ( $R^2$

= 0,98), т. е. наклон ее существенно меньше того, что мы наблюдаем в данном исследовании. Это неожиданный результат, учитывая, что средняя годовая температура воздуха на Конкордии на 1–2 °С выше, чем на Востоке.

### Сезонные особенности изотопно-температурной зависимости

Поскольку в нашей базе содержатся данные для двух полных годовых циклов (2000 и 2017) и данные за летние сезоны с 1998 по 2020 г., мы имеем возможность изучить сезонную изменчивость зависимости изотопного состава от температуры воздуха. Следует отметить, что мы используем температуру воздуха на высоте 2 м.

Самый большой объем данных имеется для ледяных игл. На рис. 5 показана изотопно-температурная зависимость для разных сезонов, для построения графика использовались 52 образца, содержащие только ледяные иглы, без примесей других типов осадков.

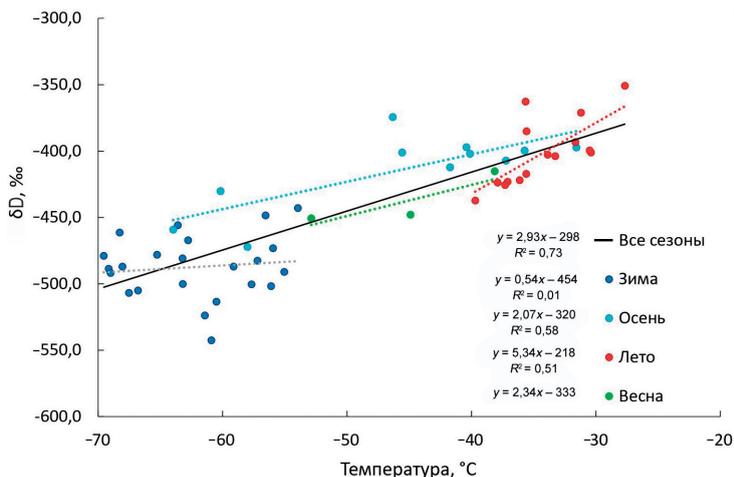


Рис. 5. Сезонная изменчивость зависимости изотопного состава ледяных игл от приземной температуры воздуха

Fig. 5. The dependence of the isotopic composition of diamond dust on the air temperature for 4 different seasons

На рис. 5 разными цветами обозначены ледяные иглы, отобранные в разные сезоны. По 23 образцам ледяных игл, отобранных зимой, не было обнаружено зависимости между изотопным составом и температурой, коэффициент детерминации  $R^2 = 0,01$ . Это неожиданный результат, поскольку именно зимой межсуточная изменчивость температуры очень велика (рис. 3) и мы могли бы ожидать отражения этих температурных колебаний в изотопном составе ледяных игл. Единственным на данный момент объяснением отсутствия такой связи является тот факт, что в данной работе мы используем приземную (на высоте 2 м) температуру воздуха, тогда как изотопный состав физически связан с эффективной температурой конденсации, которая для ледяных игл приблизительно равна средней взвешенной температуре воздуха в слое инверсии, но ближе к температуре его наиболее теплого верхнего слоя. К сожалению, на станции Восток не проводятся аэрологические наблюдения, поэтому мы не имеем возможности сопоставить изотопный состав ледяных игл с температурой в слое инверсии. Однако известно, что именно в зимний сезон различие между температурой на верхней и нижней границе инверсии максимально и может достигать 30–40 °С [6], тогда как летом оно практически равно нулю.

Для весеннего периода мы наблюдаем коэффициент детерминации 0,77, который не является значимым, так как весенняя выборка состоит лишь из трех образцов. Летняя выборка содержит 15 проб, наклон изотопно-температурной кривой равен  $5,34 \pm 3,11$ , это самый большой наклон среди всех сезонов, корреляция изотопного состава и температуры для этой выборки значима. Изотопно-температурная кривая за осенний период имеет наклон  $2,1 \pm 1,3$  по 11 образцам, корреляция значима. Черная линия на графике — линейная регрессия, построенная для всех сезонов вместе, наклон этой линии равен  $2,93 \pm 0,51$ , коэффициент детерминации значим и равен 0,73. Наклоны линий регрессии зависимости изотопного состава ледяных игл от приземной температуры по сезонам различаются незначимо. Разница в наклонах может быть вызвана сезонным ходом интенсивности инверсии, достигающей своего максимума в зимний период, также разница в наклонах может быть обусловлена изменением траекторий движения воздушных масс.

Межсезонные изменения в изотопно-температурной зависимости отмечены и в других исследованиях, но без разделения образцов по типам осадков. В работе [7] представлены следующие наклоны изотопно-температурной зависимости  $\delta^{18}\text{O}(T)$  для прибрежной станции Ноймайер:  $0,58 \pm 0,03$  ( $R^2 = 0,86$ ) для весны,  $0,68 \pm 0,06$  ( $R^2 = 0,71$ ) для лета,  $0,63 \pm 0,04$  ( $R^2 = 0,83$ ) для осени,  $0,48 \pm 0,03$  ( $R^2 = 0,75$ ) для зимы. Эти результаты подтверждают, что самые высокие значения наклона наблюдаются летом. Авторы работы [7] объясняют высокие летние наклоны смещением источника водяного пара к ближайшим прибрежным районам.

Для снега и изморози у нас недостаточно данных для изучения внутригодовой изменчивости. В нашей базе данных есть 14 образцов снега без примесей других типов осадков и поземка. Наклон изотопно-температурной зависимости для снежных образцов равен  $2,32 \pm 1,34$ , коэффициент детерминации равен 0,54 (рис. 6), а для изморози  $2,52 \pm 0,35$  ( $R^2 = 0,54$ ).

В целом все три значения наклонов линий регрессии изотопно-температурной зависимости несущественно отличаются друг от друга. Для ледяных игл наклон равен  $2,93 \pm 0,51$ , для изморози  $2,52 \pm 0,35$ , для снега  $2,32 \pm 1,34$ . Практическое со-

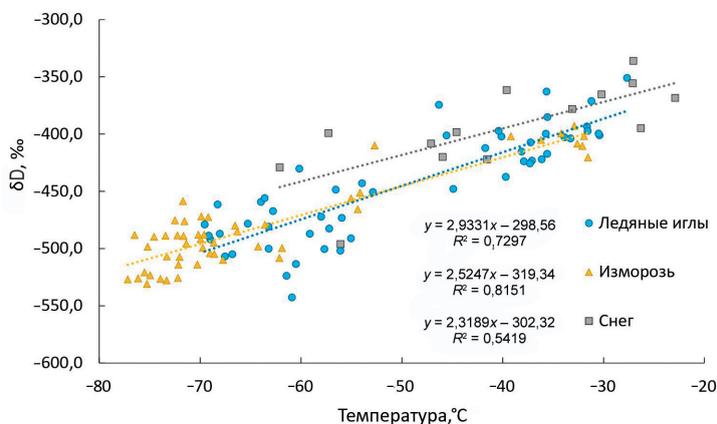


Рис. 6. Изотопно-температурная зависимость для ледяных игл, изморози и снега по всем сезонам года

Fig. 6. The isotope-temperature relationship for diamond dust, hoar and snow based on data from all the seasons

впадение значений наклонов в уравнениях линейной регрессии для ледяных игл и изморози может навести на мысль, что температуры конденсации для этих двух типов осадков близки. Но это не единственный фактор, что влияет на изотопный состав, — значительное влияние будет оказывать также начальный изотопный состав влаги, участвующей в образовании разных типов осадков.

Также на рис. 6 интересно отметить, что изотопный состав снежных осадков выше при той же температуре, чем изотопный состав двух других типов осадков. Это может свидетельствовать о том, что для снега эффективная температура конденсации (которая приблизительно равна температуре на нижней границе облачности) выше, чем для ледяных игл и изморози [6].

### **Сравнение зависимости изотопного состава атмосферных осадков от температуры на станции Восток с другими станциями в Антарктиде**

В предыдущих разделах мы описали зависимость  $\delta D$  (Т) для разных типов осадков и для разных временных промежутков. Для сравнения с другими исследованиями мы построили зависимость  $\delta^{18}O$  (Т) для разных типов осадков и для всех осадков вместе. Зависимость  $\delta^{18}O$  (Т) на Востоке для всех типов осадков по имеющимся у нас данным имеет наклон  $0,41 \text{ ‰ } ^\circ\text{C}^{-1}$  ( $R^2 = 0,8$ ,  $n = 198$ ). Этот наклон близок к тому, что был получен на станции Конкордия (Купол С) в работе [8] за 2008–2011 гг.:  $0,46 \text{ ‰ } ^\circ\text{C}^{-1}$  ( $R^2 = 0,65$ ,  $n = 1111$ ), и к тому, что получен на станции Конкордия в работе [4] за 2008–2010 гг.:  $0,49 \pm 0,02 \text{ ‰ } ^\circ\text{C}^{-1}$  ( $R^2 = 0,63$ ,  $n = 500$ ). В работе [9] для станции Восток получен наклон  $0,35 \text{ ‰ } ^\circ\text{C}^{-1}$  по образцам, которые отбирались в 1999–2000 гг. На станции Фуджи в работе [10] наклон изотопно-температурной зависимости равен  $0,78 \text{ ‰ } ^\circ\text{C}^{-1}$  ( $R^2 = 0,78$ ), он заметно больше, чем тот, что получен в текущей работе. Близ станции Ноймайер (прибрежная станция) наклон изотопно-температурной зависимости равен  $0,58 \text{ ‰ } ^\circ\text{C}^{-1}$  ( $R^2 = 0,89$ ) [11]. Разброс между значениями наклона изотопно-температурной зависимости на разных станциях связан с тем, что воздушные массы формируются в разных местах и имеют различные пути дистилляции, также влияние оказывают локальные климатические условия, например колебания между приземной температурой и температурой в слое инверсии. Значения наклонов изотопно-температурной зависимости для станций Восток и Конкордия схожи, как и климатические условия на этих станциях. Разница в значениях наклона со станцией Ноймайер объясняется ее прибрежным положением, так как в образовании осадков на прибрежных станциях большое участие принимает местная влага, также там больше доля осадков из облаков.

Также зависимость  $\delta^{18}O$  (Т) была построена отдельно для каждого вида осадков, отобранных на станции Восток. В исследовании, проведенном на станции Конкордия [4] в течение 2008–2010 гг., тоже была исследована изотопно-температурная зависимость для ледяных игл, изморози и снега отдельно. Согласно нашим расчетам, наклон изотопно-температурной зависимости для ледяных игл равен  $0,42 \text{ ‰ } ^\circ\text{C}^{-1}$  ( $R^2 = 0,73$ ,  $n = 52$ ), на станции Конкордия наклон для ледяных игл равен  $0,47 \pm 0,03$  ( $R^2 = 0,71$ ,  $n = 105$ ). Наклон изотопно-температурной зависимости для ледяных игл в обеих работах довольно схож и его значение является самым большим в сравнении с другими типами осадков. Наклон изотопно-температурной зависимости для изморози на станции Восток равен  $0,33 \text{ ‰ } ^\circ\text{C}^{-1}$  ( $R^2 = 0,78$ ,  $n = 50$ ), на станции Конкордия он равен  $0,48 \pm 0,04 \text{ ‰ } ^\circ\text{C}^{-1}$  ( $R^2 = 0,44$ ,  $n = 159$ ). Интересно отметить, что, в то время как самый высокий коэффициент детерминации в нашей работе принадлежит выборке,

состоящей из образцов изморози, в работе [4] эта выборка имеет самый низкий коэффициент детерминации. Наклон изотопно-температурной зависимости для снега на станции Восток равен  $0,3 \text{ ‰ } ^\circ\text{C}^{-1}$  ( $R^2 = 0,45$ ,  $n = 14$ ), на станции Конкордия он равен  $0,45 \pm 0,04 \text{ ‰ } ^\circ\text{C}^{-1}$  ( $R^2 = 0,60$ ,  $n = 98$ ). Самое малое значение наклона из всех типов осадков в обоих исследованиях получено для образцов снега. Для нашего исследования образцы собирались неравномерно по сезонам, и у нас недостаточно данных для снега (всего 14 образцов), что влияет на наклон изотопно-температурной зависимости для этого типа осадков и ее достоверность, что может быть причиной разницы между значением наклона изотопно-температурной зависимости для снега на станции Восток и для снега на станции Конкордия.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе был исследован изотопный состав атмосферных осадков на станции Восток за 1998–2020 гг. Для каждого типа осадков рассчитаны средние значения изотопного состава:  $\delta D = -444,2 \pm 6,5 \text{ ‰}$  для ледяных игл,  $\delta D = -480,0 \pm 5,7 \text{ ‰}$  для изморози и  $\delta D = -395,2 \pm 10,7 \text{ ‰}$  для снега. Зависимость  $\delta D$  ( $\delta^{18}\text{O}$ ) описывается уравнением  $y = 7,23 \cdot x - 27$ . Изотопный состав осадков значимо коррелирует с приземной температурой воздуха. Для каждого типа осадков была изучена зависимость изотопного состава от приземной температуры, наклоны линий регрессий этих зависимостей различаются незначимо:  $2,93 \pm 0,51$  для ледяных игл,  $2,32 \pm 1,34$  для снега и  $2,52 \pm 0,35$  для изморози. Сезонная изменчивость изотопно-температурной зависимости исследована на примере ледяных игл. Зимой, по нашим данным, взаимосвязь между изотопным составом осадков и температурой воздуха не наблюдается. Требуется дополнительные данные, чтобы подтвердить отсутствие корреляции между изотопным составом осадков и температурой поверхности. Летний сезон имеет самый большой наклон изотопно-температурной зависимости, он равен  $5,34 \pm 3,11$ . Наклон для осеннего периода равен  $2,1 \pm 1,3$ , для весеннего периода у нас недостаточно данных для анализа. Также было обнаружено, что изотопный состав образцов, отобранных во время метели, отличается от изотопного состава образцов, содержащих чистые осадки. Эти образцы было решено исключить из дальнейшего анализа.

В дальнейшем планируется использовать моделирование для реконструкции начальных климатических условий и реанализ для более детального изучения истории формирования изотопного состава некоторых образцов. Также особое внимание будет уделено параметрам  $\delta x_s$  и  $^{17}\text{O}$ -excess для изучения условий в источнике влаги. Понимание того, как формируется изотопный состав разных типов осадков, поможет сделать интерпретацию данных ледяных кернов более корректной.

**Конфликт интересов.** Конфликт интересов отсутствует.

**Финансирование.** Данная работа была поддержана Российским научным фондом, грант № 21-17-00246.

**Благодарности.** Авторы статьи благодарны руководству РАЭ за логистическое обеспечение гляциологических исследований в районе станции Восток, а также всем участникам 44-й, 45-й, 52-й, 62–65-й РАЭ за участие в полевых работах, особую благодарность выражаем Виктору Перскому и Виталию Заровчатскому за сбор осадков в 2000 и 2017 гг.

Мы также благодарим сотрудников LSCE, Института Нильса Бора за выполнение масс-спектрометрических измерений изотопного состава образцов. И благодарим

весь коллектив лаборатории ЛИКОС ААНИИ за поддержку и чудесную рабочую атмосферу.

**Competing interests.** The authors have no competing interests.

**Funding.** This work is financed by Russian Science Foundation grant 21-17-00246.

**Acknowledgments.** The authors are grateful to the administration of Russian Antarctic Expedition (RAE) for logistical support of the glaciological program at Vostok, as well as to all the participants of the 44th, 45th, 52nd, 62nd–65th RAE field seasons for assistance in field works, in particular to Viktor Perskyi and to Vitalyi Zarovchatskyi for collecting the snow samples in 2000 and 2017, respectively.

We also thank the staff of LSCE (France), Niels Bohr Institute (Denmark) for the mass-spectrometric measurements of the isotopic content in the snow samples. Many thanks the staff of CERL AARI for support and good working vibe.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Dansgaard W. Stable isotopes in precipitation // *Tellus*. 1964. V. 16 (4). P. 436–468.
2. Uemura R., Barkan E., Abe O., Luz B. Triple isotope composition of oxygen in atmospheric water vapor // *Geophysical Research Letters*. 2010. V. 37 (4). L04402. doi:10.1029/2009GL041960.
3. Ricaud P., Bazile E., Guasta M.D., Lanconelli C., Grigioni P., Mahjoub A. Genesis of diamond dust, ice fog and thick cloud episodes observed and modelled above Dome C, Antarctica // *Atmospheric Chemistry and Physics*. 2017. V. 17 (8). P. 5221–5237. doi:10.5194/acp-17-5221-2017.
4. Stenni B., Scarchilli C., Masson-Delmotte V., Schlosser E., Ciardini V., Dreossi G., Grigioni P., Bonazza M., Cagnati A., Karlicek D., Risi C., Udisti R., Valt M. Three-year monitoring of stable isotopes of precipitation at Concordia Station, East Antarctica // *The Cryosphere*. 2016. V. 10 (5). P. 2415–2428. doi:10.5194/tc-10-2415-2016.
5. Craig H. Isotopic variations in meteoric waters // *Science*. 1961. V. 133. P. 1702–1703.
6. Ekaykin A.A., Lipenkov V.Y., Kuzmina I.N., Petit J.R., Masson-Delmotte V., Johnsen S.J. The changes in isotope composition and accumulation of snow at Vostok station, East Antarctica, over the past 200 years // *Annals of Glaciology*. 2004. V. 39. P. 569–575.
7. Bagheri Dastgerdi S., Behrens M., Bonne J.L., Hörhold M., Lohmann G., Schlosser E., Werner M. Continuous monitoring of surface water vapour isotopic compositions at Neumayer Station III, East Antarctica // *The Cryosphere*. 2021. V. 15. P. 4745–4767. <https://doi.org/10.5194/tc-15-4745-2021>.
8. Casado M., Landais A., Picard G., Münch T., Laepple T., Stenni B., Giuliano Dreossi G., Ekaykin A., Arnaud L., Genthon C., Touzeau A., Masson-Delmotte V., Jouzel J. Archival processes of the water stable isotope signal in East Antarctic ice cores // *The Cryosphere*. 2018. V. 12. P. 1745–1766. <https://doi.org/10.5194/tc-12-1745-2018>.
9. Landais A., Barkan E., Vimeux F., Masson-Delmotte V., Luz B. Combined analysis of water stable isotopes ( $\text{H}_2^{16}\text{O}$ ,  $\text{H}_2^{17}\text{O}$ ,  $\text{H}_2^{218}\text{O}$ ,  $\text{HD}^{16}\text{O}$ ) in ice cores // *Physics of Ice Core Records II* / Hondoh T., ed. Hokkaido: Hokkaido Univ., 2009. P. 315–327. doi:10.3189/2012JoG11J237.
10. Fujita K., Abe O. Stable isotopes in daily precipitation at Dome Fuji, East Antarctica // *Geophysical research letters*. 2006. V. 33 (18). L18503. doi:10.1029/2006GL026936.
11. Schlosser E., Reijmer C., Oerter H., Graf W. The influence of precipitation origin on the  $\delta^{18}\text{O}$  – T relationship at Neumayer Station, Ekströmsen, Antarctica // *Annals of Glaciology*. 2004. V. 39. P. 41–48. <https://doi.org/10.3189/172756404781814276>, 2004.

### REFERENCES

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

2. Uemura R., Barkan E., Abe O., Luz B. Triple isotope composition of oxygen in atmospheric water vapor. *Geophysical Research Letters*. 2010, 37 (4): L04402. doi:10.1029/2009GL041960.
3. Ricaud P., Bazile E., Guasta M.D., Lanconelli C., Grigioni P., Mahjoub A. Genesis of diamond dust, ice fog and thick cloud episodes observed and modelled above Dome C, Antarctica. *Atmospheric Chemistry and Physics*. 2017, 17 (8): 5221–5237. doi:10.5194/acp-17-5221-2017.
4. Stenni B., Scarchilli C., Masson-Delmotte V., Schlosser E., Ciardini V., Dreossi G., Grigioni P., Bonazza M., Cagnati A., Karlicek D., Risi C., Udisti R., Valt M. Three-year monitoring of stable isotopes of precipitation at Concordia Station, East Antarctica. *The Cryosphere*. 2016, 10 (5): 2415–2428. doi:10.5194/tc-10-2415-2016.
5. Craig H. Isotopic variations in meteoric waters. *Science*. 1961, 133: 1702–1703.
6. Ekaykin A. A., Lipenkov V. Y., Kuzmina I. N., Petit J. R., Masson-Delmotte V., Johnsen S.J. The changes in isotope composition and accumulation of snow at Vostok station, East Antarctica, over the past 200 years. *Annals of Glaciology*. 2004, 39: 569–575.
7. Bagheri Dastgerdi S., Behrens M., Bonne J.L., Hörhold M., Lohmann G., Schlosser E., Werner M. Continuous monitoring of surface water vapour isotopic compositions at Neumayer Station III, East Antarctica. *The Cryosphere*. 2021, 15 (10): 4745–4767. <https://doi.org/10.5194/tc-15-4745-2021>.
8. Casado M., Landais A., Picard G., Münch T., Laepple T., Stenni B., Giuliano Dreossi G., Ekaykin A., Arnaud L., Genthon C., Touzeau A., Masson-Delmotte V., Jouzel J. Archival processes of the water stable isotope signal in East Antarctic ice cores. *The Cryosphere*. 2018, 12 (5): 1745–1766. <https://doi.org/10.5194/tc-12-1745-2018>.
9. Landais A., Barkan E., Vimeux F., Masson-Delmotte V., Luz B. Combined analysis of water stable isotopes ( $\text{H}_2^{16}\text{O}$ ,  $\text{H}_2^{17}\text{O}$ ,  $\text{H}^{218}\text{O}$ ,  $\text{HD}^{16}\text{O}$ ) in ice cores. *Physics of Ice Core Records II*. Hondoh T., ed. Hokkaido: Hokkaido Univ., 2009: 315–327. doi:10.3189/2012JoG11J237.
10. Fujita K., Abe O. Stable isotopes in daily precipitation at Dome Fuji, East Antarctica. *Geophysical research letters*. 2006, 33 (18): L18503. doi:10.1029/2006GL026936.
11. Schlosser E., Reijmer C., Oerter H., Graf W. The influence of precipitation origin on the  $\delta^{18}\text{O}$ –T relationship at Neumayer Station, Ekströmen, Antarctica. *Annals of Glaciology*. 2004, 39: 41–48. <https://doi.org/10.3189/172756404781814276>, 2004.