

ИЗОТОПНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ АТМОСФЕРНЫХ ОСАДКОВ В ПРИЭЛЬБРУСЬЕ

© 2023 г. Ю. Н. Чиждова^{1,2,*}, В. Н. Михаленко², С. С. Кутузов²,
К. А. Шукуров³, А. В. Козачек⁴

¹ Институт геологии рудных месторождений, петрологии, минералогии и геохимии РАН, Москва, Россия

² Институт географии РАН, Москва, Россия

³ Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, Россия

⁴ Арктический и Антарктический научно-исследовательский институт, Санкт-Петербург, Россия

*e-mail: eacentr@yandex.ru

Поступила в редакцию 30.08.2022 г.

После доработки 25.10.2022 г.

Принята к публикации 06.03.2023 г.

Приведены результаты изучения изотопных характеристик осадков, выпадающих у подножия южного склона Эльбруса, Кавказ. Отбор осадков организован на станции Азау (абс. высота 2300 м) на ежедневной основе. Установлены основные источники осадков для Приэльбрусья с применением метода обратных траекторий движения воздушных масс. Значения $\delta^{18}\text{O}$ осадков содержат выраженную связь с температурой приземного слоя воздуха: $\Delta\delta^{18}\text{O}/\Delta T = 0.85\text{‰}/^\circ\text{C}$.

Ключевые слова: изотопный состав кислорода, изотопный состав водорода, атмосферные осадки, Кавказ, Эльбрус, реконструкция температур

DOI: 10.31857/S2076673423010052, **EDN:** GITROP

ВВЕДЕНИЕ

Высокогорные ледники архивируют в составе льда такую важную климатическую информацию, как температура воздуха, запыленность атмосферы и её газовый состав. Эти данные, представляющие климатический сигнал для средних и низких широт, дополняют глобальные реконструкции климата, выполненные по кернам Гренландии и Антарктиды. По сравнению со своими полярными аналогами горные буровые площадки характеризуются сравнительно мелкокомасштабной и сложной геометрией, близостью ледников к континентальным источникам воздушных масс, сложной картиной формирования осадков. Ледниковые керны в горах охватывают гораздо меньшие промежутки времени по сравнению с ледниковыми покровами, но за счёт более высокого снегонакопления позволяют изучать климатические изменения с годовым и даже сезонным разрешением.

Важной проблемой интерпретации климатической информации по ледниковым кернам считается реконструкция температур воздуха по изотопному составу кислорода льда. Несмотря на глобальные уравнения связи температуры воздуха с величинами $\delta^{18}\text{O}$ осадков (Dansgaard, 1964; Rozanski et al., 1992), в высокогорье характер свя-

зи может меняться, что связано и с разными источниками осадков, и со сложной топографией горных ледников. С рассогласованием изотопной записи по керну и прямых температурных наблюдений столкнулись на альпийском леднике Коле Гнифетти (4450 м) из-за значительной потери части снега в зимнее время в результате ветрового сноса. Негативный эффект неравномерной аккумуляции или потери части выпадающих на ледник осадков, приводящий к ухудшению связи $\delta^{18}\text{O}$ — T , в какой-то мере может быть преодолен осреднением отдельных временных серий по керну продолжительностью в 1.5 и 10 лет; коэффициенты корреляции значений $\delta^{18}\text{O}$ с T возрастали от 0.48 до 0.67 и 0.79 соответственно (Bohleber et al., 2018). Применение соотношения $\delta^{18}\text{O}$, $\delta^2\text{H}$ и показателя дейтериевый эксцесс ($d_{\text{ex}} = \delta^2\text{H} - 8 \times \delta^{18}\text{O}$) дополняет температурную запись по ледниковому льду знаниями об источниках происхождения осадков, условиях в источниках пара (Ciais, Jouzel, 1994; Vimeux et al., 2001; Stenni et al., 2010) и при выпадении осадков, таких как подоблачное испарение, а также процессов внутри снежной толщи, приводящих к преобразованию первичной изотопной записи. Интерпретация значений $\delta^{18}\text{O}$ и $\delta^2\text{H}$ ледниковых кернов в идеале должна учитывать все эти факторы, хотя на прак-

тике это не всегда возможно. Первым шагом на этом пути считается изучение атмосферных осадков, выпадающих либо непосредственно на леднике, либо на ближайшей к нему метеостанции. Организация круглогодичного отбора проб осадков на таких участках бурения, как Западное плато или Восточная вершина (Михаленко и др., 2005; Козачек и др., 2015; Mikhalenko et al., 2015; Kutuzov et al., 2019; Чижова и др., 2019) технически невозможна. Такая работа реализована на станции Азау у подножия южного склона Эльбруса. Цель данной работы — изучение изотопных характеристик атмосферных осадков для того, чтобы установить зависимость значений $\delta^{18}\text{O}$ от температуры в момент выпадения осадков и приблизиться к пониманию процессов, формирующих изотопные характеристики снежного покрова и ледникового льда Эльбруса.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Массив Эльбруса — самый крупный узел оледенения Большого Кавказа. В настоящее время площадь ледников сокращается. В период с 1999 до 2012 г. площадь ледников сократилась на 4%, а с 1997 по 2017 г. — на 10.8% (Kutuzov et al., 2019). Анализ многолетних изменений температуры воздуха в регионе (Козачек и др., 2015) показывает, что для зимних температур воздуха (ноябрь—апрель) характерна большая межгодовая изменчивость, чем для летних (май—октябрь), а современные изменения климата прежде всего выражаются в летнем потеплении.

Для изучения связи изотопного состава атмосферных осадков с местной температурой воздуха в период с 01.05.2019 по 27.09.2021 г. организован отбор осадков на станции Азау, расположенной у подножия Эльбруса на высоте 2300 м. Отбор проводился один раз в день в 9:00 по московскому времени. Температура воздуха фиксировалась на метеорологической станции в пос. Терскол (станция Росгидромета № 4334250). Пробы отбирались в пробоотборник, в случае твердых осадков растапливались, переливались в пробирки, герметизировались лентой парафилм. Анализ изотопного состава кислорода и водорода выполнен в лаборатории климата и окружающей среды Арктического и антарктического научно-исследовательского института (ААНИИ) на изотопном анализаторе Picarro L2130-i. Погрешность измерений составила 0.04 для величин $\delta^{18}\text{O}$ и 0.5 для величин $\delta^2\text{H}$. Значения калиброваны в шкале VSMOW—VSLAP. Всего проанализировано 238 образцов.

Для установления основных особенностей дальнего переноса воздуха и возможных источников водяного пара, выпадающего в виде осадков на Эльбрусе, восстановлены обратные траекто-

рии движения воздушных частиц с применением траекторной модели NOAA HYSPLIT_4 (Draxler, Hess, 1998; Stein et al., 2015) и сеточных полей реанализа метеопараметров NCEP/NCAR Reanalysis с разрешением $2.5^\circ \times 2.5^\circ$ (Kalnay et al., 1996; Kistler et al., 2001). Обратные траектории восстанавливали на 120 часов (5 сут.), что обусловлено средним временем нахождения водяного пара в атмосфере (Wallace, Hobbs, 2006). Рассчитывались обратные траектории для воздушных частиц, прибывавших к станции Азау (43.2659° с.ш., 42.4799° в.д.) в период с 12.01.2019 по 27.09.2021 г. во все дни, когда на станции наблюдались осадки. Расчёт выполнен для трёх слоев толщиной 200 м, центрированных на уровнях 2500, 3500 и 5000 м над ур. моря, или соответственно, на высотах 200, 1200 и 2700 м над станцией Азау. В пределах каждого слоя для каждого часа дня с осадками рассчитывались три траектории — для самого уровня и для высот ± 100 м от него. Для исследуемого периода для каждого из уровней был рассчитан массив из 19756 обратных траекторий. На основе полученных массивов для каждого из уровней с помощью методики (Shukurov, Chkhetiani, 2017) восстанавливались сезонные поля региональной вероятности переноса воздушной частицы, P [%], которая характеризует повторяемость переноса воздушных масс, связанных с выпадением осадков на станции Азау (разрешение полей $2.5^\circ \times 2.5^\circ$).

РЕЗУЛЬТАТЫ

Значения $\delta^{18}\text{O}$ и $\delta^2\text{H}$ атмосферных осадков варьируют от 0.52 до -28.22‰ и от 16.3 до -224.1‰ соответственно, обнаруживая закономерную сезонность с высокими значениями $\delta^{18}\text{O}$ и $\delta^2\text{H}$ летом и низкими — зимой (рис. 1). Дейтериевый эксцесс варьирует в широких пределах от 24.8 до -14.6‰ . Минимальные значения $\delta^{18}\text{O}$ и $\delta^2\text{H}$ осадков зафиксированы в феврале 2020 г.

Сезонные вариации значений $\delta^{18}\text{O}$ и $\delta^2\text{H}$ соответствуют годовому ходу температуры воздуха на станции Терскол. Связь изотопного состава кислорода со среднесуточными температурами воздуха в день отбора выражается линейным уравнением $\delta^{18}\text{O} = 0.825 t - 12.7\text{‰}$, $R^2 = 0.69$ (рис. 2). При применении ледниковых кернов для палеоклиматических реконструкций важно оценить, насколько изотопные параметры осадков связаны со среднемесячными температурами воздуха. При переходе к оценке связи осредненных за месяц среднеарифметических значений $\delta^{18}\text{O}$ осадков со среднемесячной температурой воздуха, коэффициенты $\delta^{18}\text{O}/T$ практически не меняются, а

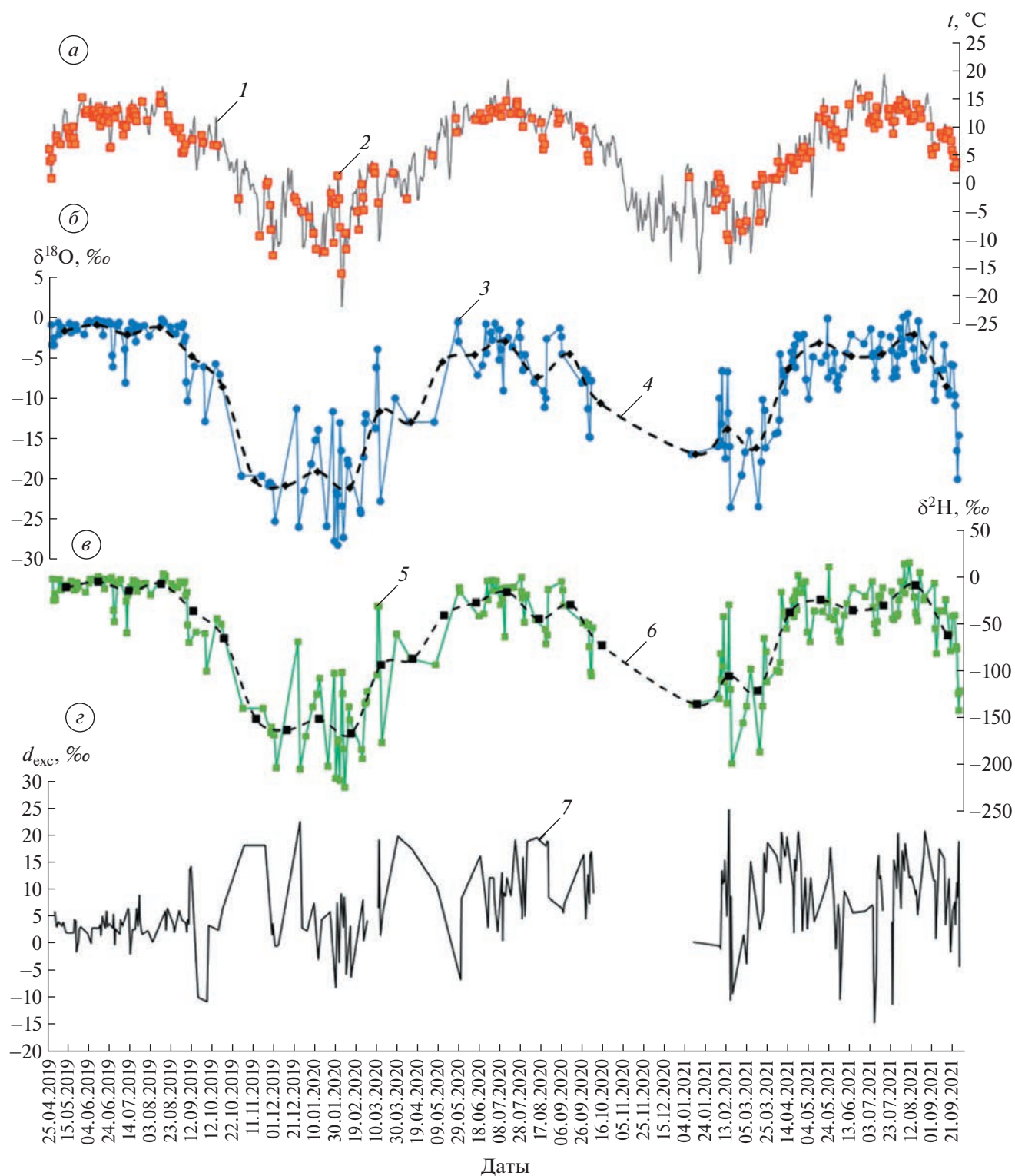


Рис. 1. Вариации температуры воздуха на метеостанции Терскол (а), значений $\delta^{18}\text{O}$ (б), $\delta^2\text{H}$ (в) и d-excess (г) осадков, отобранных на поляне Азау за период наблюдений: 1 – среднесуточные температуры воздуха, 2 – температуры воздуха в день отбора, 3 – значения $\delta^{18}\text{O}$ осадков, 4 – среднемесячные значения $\delta^{18}\text{O}$ осадков, 5 – значения $\delta^2\text{H}$ осадков, 6 – среднемесячные значения $\delta^2\text{H}$ осадков, 7 – дейтериевый эксцесс.

Fig. 1. The variations of air temperature at Terskol weather station (a), values of $\delta^{18}\text{O}$ (б), $\delta^2\text{H}$ (в) and d-excess (г) of precipitation at Azau station for the observation period: 1 – average daily air temperatures, 2 – air temperatures on the day of sampling, 3 – $\delta^{18}\text{O}$ values of precipitation, 4 – monthly average $\delta^{18}\text{O}$ values of precipitation, 5 – $\delta^2\text{H}$ values of precipitation, 6 – monthly average $\delta^2\text{H}$ values of precipitation, 7 – deuterium excess.

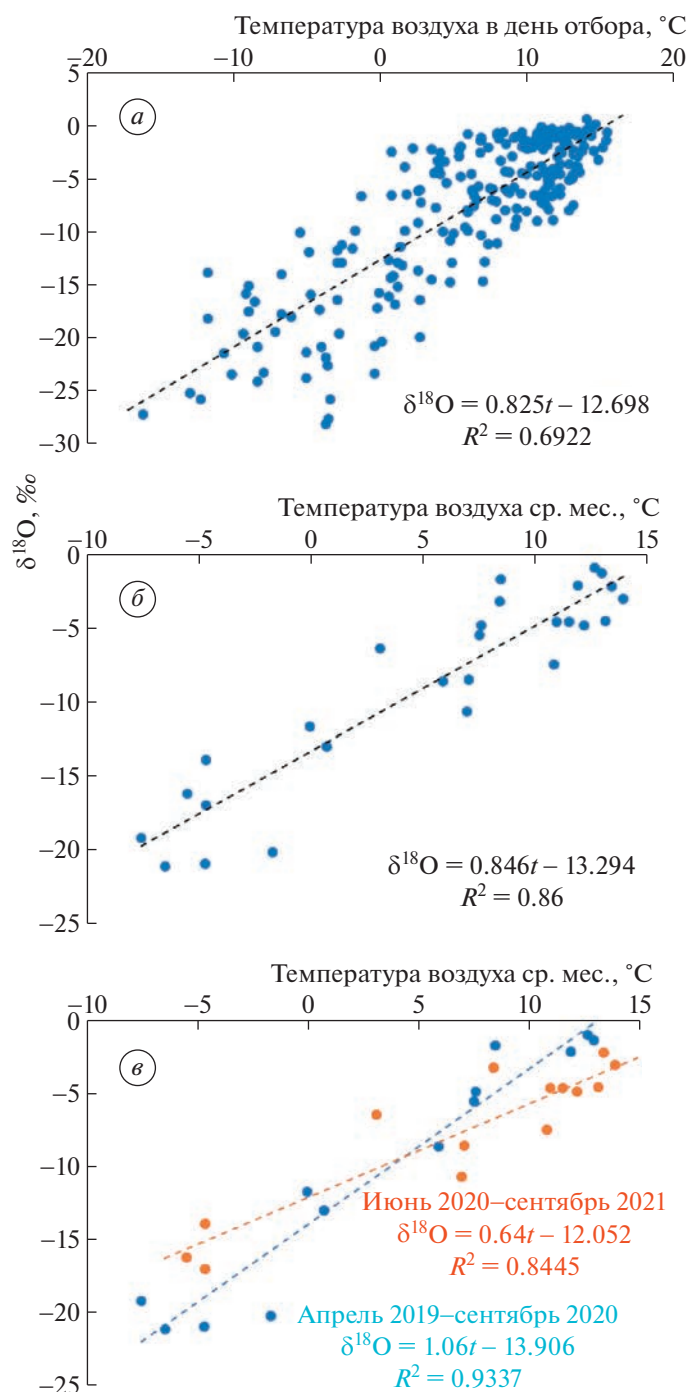


Рис. 2. Характер связи значений $\delta^{18}\text{O}$ осадков на станции Азау с приземной температурой воздуха на станции Терскол для всех индивидуальных проб осадков за период наблюдений (а), осредненных до среднемесячных величин (б) и для среднемесячных величин двух периодов (в).

Fig. 2. The relationship between the $\delta^{18}\text{O}$ values of precipitation at the Azau station with surface air temperature at Terskol station for all individual samples of precipitation for the observation period (a), averaged to monthly averages (b) and for monthly averages of two periods (c).

достоверность линейной аппроксимации возрастает ($\delta^{18}\text{O} = 0.85t - 13.3\text{‰}$, $R^2 = 0.86$). То есть в целом за два года связь с температурой выражается коэффициентом $\Delta\delta^{18}\text{O}/\Delta T = 0.85\text{‰}/^\circ\text{C}$.

В то же время метеорологические параметры отдельных сезонов менялись в течение всего периода наблюдений, в основном это касалось температурных условий зимы: средние (-5.2°C) и

минимальные (-16°C) температуры воздуха, при которых выпадали осадки зимой 2020 г. были ниже, чем зимой 2021 г. (-3.5 и -10 соответственно). Изотопные параметры атмосферных осадков также различаются — среднее за зимние месяцы с января по март значение $\delta^{18}\text{O}$ в 2020 г. составило -18‰ , а минимальное -28.2‰ , в 2021 г. среднее за зимние месяцы значение $\delta^{18}\text{O}$ составило -14.66‰ , минимальное -23.59‰ . Связь величин $\delta^{18}\text{O}$ осадков с температурой воздуха отличается для этих двух сезонов (см. рис. 1). Выделены два временных интервала — первый период с 05.2019 по 05.2020 г., второй — с 06.2020 по 09.2021 г. (см. рис. 2), применяя в качестве разделителя начало летнего сезона. Для первого периода связь значений $\delta^{18}\text{O}$ с температурами приземного воздуха выражается уравнением $\delta^{18}\text{O} = 1.06 t - 13.9\text{‰}$ ($R^2 = 0.93$), для второго — $\delta^{18}\text{O} = 0.64 t - 12.05\text{‰}$, ($R^2 = 0.84$).

Все полученные значения $\delta^{18}\text{O}$ и $\delta^2\text{H}$ аппроксимируются уравнением $\delta^2\text{H} = 8 \delta^{18}\text{O} + 7.06$ ($R^2 = 0.98$), близким к глобальной линии метеорных вод. Средняя величина дейтериевого эксцесса по всем образцам осадков составила $6.82 \pm \pm 5.99\text{‰}$. Ранее для района Эльбруса и Центрального Кавказа отмечались в целом высокие ($>10\text{‰}$) значения дейтериевого эксцесса в снежных осадках и снежном покрове (Михаленко и др., 2005; Vasil'chuk et al., 2020).

Восстановленные обратные траектории характеризуют общие черты воздушного переноса, обеспечивающего поступление влагонесущих воздушных масс в район Эльбруса. Эти черты демонстрируют сезонность, выраженную в смене источника влагонесущих воздушных масс от зимы к лету и увеличении удаленности источников (средней длины траектории движения воздушных масс) от лета к зиме. В целом, анализ 5-суточных обратных траекторий показал, что осадки на Эльбрусе зимой связаны с преобладающим переносом воздушных масс с Атлантики (рис. 3, а–в), летом — с доминированием переноса из районов центральной Европы, со Средиземного и Черного морей (см. рис. 3, ж–и). Средиземноморско-черноморский регион во все сезоны — район, из которого перенос воздуха к Эльбрусу наиболее вероятен. Несмотря на то, что на летний сезон приходится наибольшее число траекторий, область переноса на всех уровнях летом минимальна (см. рис. 3, ж–и), что связано с уменьшением средней скорости переноса воздуха в этот сезон вследствие ослабления широтного градиента температуры воздуха в Северном полушарии. С ростом зонального температурного контраста в переходные периоды и особенно зимой скорость движения воздушных частиц нарастает, что выражается в увеличении зоны переноса весной (см.

рис. 3, г–е), осенью (см. рис. 3, к–м) и зимой относительно лета.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Возможные источники осадков и дейтериевый эксцесс. Важный фактор, определяющий изотопные параметры атмосферных осадков — район происхождения влаги. Условия в источнике пара, такие как относительная влажность и температура поверхности моря, влияют на величину дейтериевого эксцесса (Pfal, Sodemann, 2014). Кроме того, удаленность источника пара от места выпадения осадков также влияет на изотопные характеристики осадков. В большинстве случаев изотопные параметры осадков формируются согласно уравнению Рэлея и связаны с последовательным истощением воздушных масс по пути их движения. Это сопровождается уменьшением значений $\delta^{18}\text{O}$ и $\delta^2\text{H}$ выпадающих осадков и незначительным увеличением дейтериевого эксцесса (Gat, 2000).

Восстановленные обратные траектории движения воздушных масс в летний сезон указывают на то, что наиболее вероятный источник осадков — это центр Европы, области восточной части Средиземного моря, акватория Черного моря и ближайшие к нему районы. Средиземное и Черное моря считаются источниками пара для осадков с высокими величинами d-excess в Южной Европе, Альпах и на Кавказе (Gat, Carmi, 1970). Ещё одним источником водяного пара с высоким дейтериевым эксцессом — рециклинг влаги, когда с поверхности земли повторно испаряется влага, выпавшая в виде атмосферных осадков. Этот пар смешивается с приходящими в районе Эльбруса воздушными массами, в результате чего выпадающие осадки содержат более высокие значения d_{exc} . Ранее для Эльбруса отмечались осадки с высокими d_{exc} , большинство снежных шурфов и неглубоких кернов на южном склоне Эльбруса также содержат средние величины d_{exc} выше 10‰ . Это хорошо заметно на диаграмме $\delta^{18}\text{O}$ – $\delta^2\text{H}$ (рис. 4), на которой точки, характеризующие поверхностный снег и ледяной керн с Западного плато (Михаленко и др., 2005), расположены выше линии метеорных вод. В исследовании только 30% осадков характеризовались d_{exc} выше 10‰ (см. рис. 4). Основной причиной понижения величины d_{exc} осадков — испарение, происходящее либо в облаке, либо в подоблачном слое, пока капли дождя не достигнут земли. Подоблачное испарение может играть большую роль в летние месяцы, когда в приземном слое воздуха часто отмечаются условия низкой относительной влажности и высоких температур воздуха.

Для индивидуальных осадков на станции Азау и экстремально низкие, и экстремально высокие

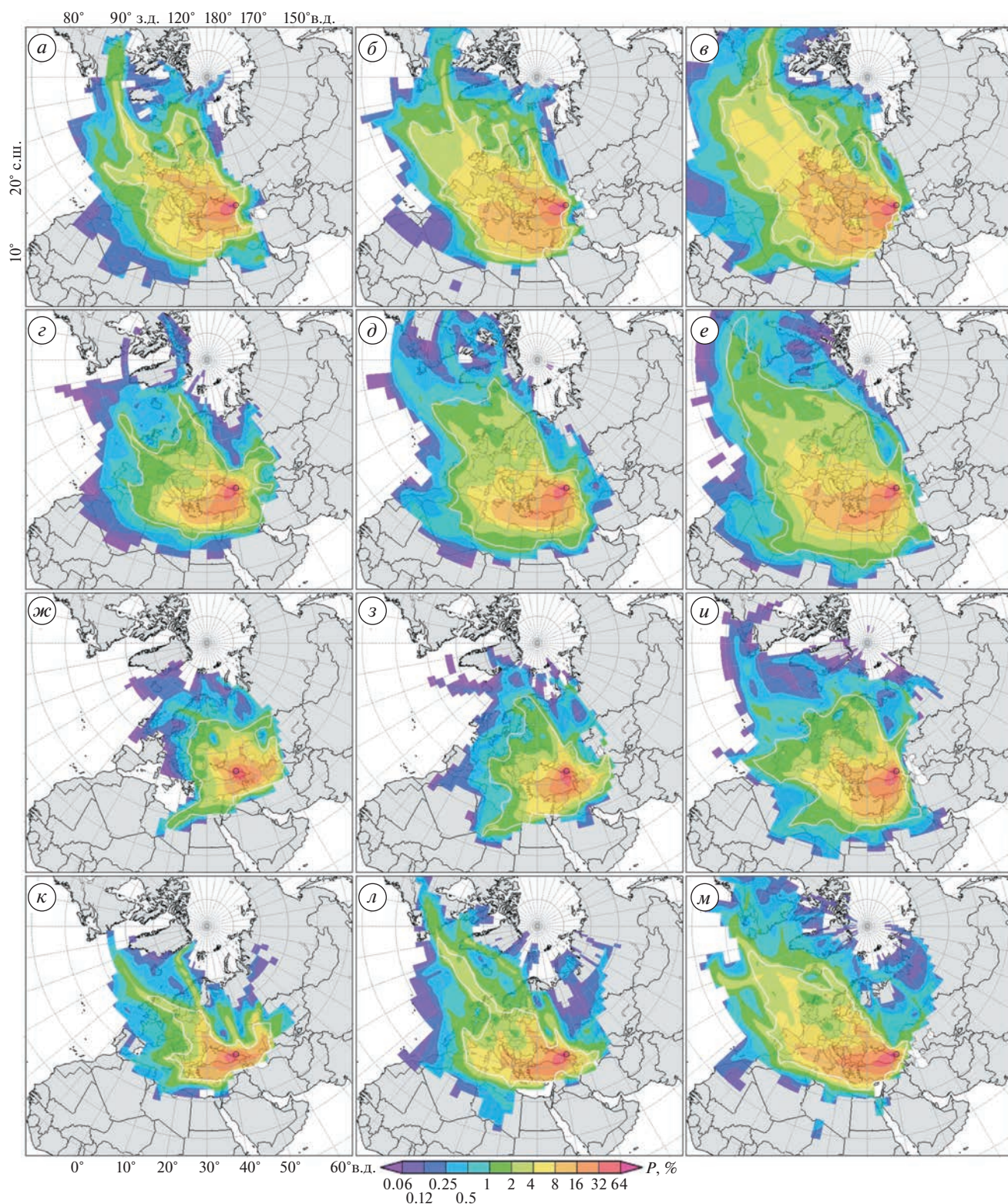


Рис. 3. Средняя сезонная вероятность переноса воздушной частицы над поверхностью зимой (а, б, в), весной (г, д, е), летом (ж, з, и) и осенью (к, л, м) на уровнях 2500, 3500 и 5000 м (слева направо). Белой линией ограничена область ячеек, в которые попадало не менее 50 независимых обратных траекторий.

Fig. 3. Average seasonal probability of air particle transfer over the surface during winter (a, б, в), spring (г, д, е), summer (ж, з, и) and autumn (к, л, м) at levels 2500, 3500 and 5000 m (left to right). The area of cells containing at least 50 independent back trajectories is bounded by a white line.

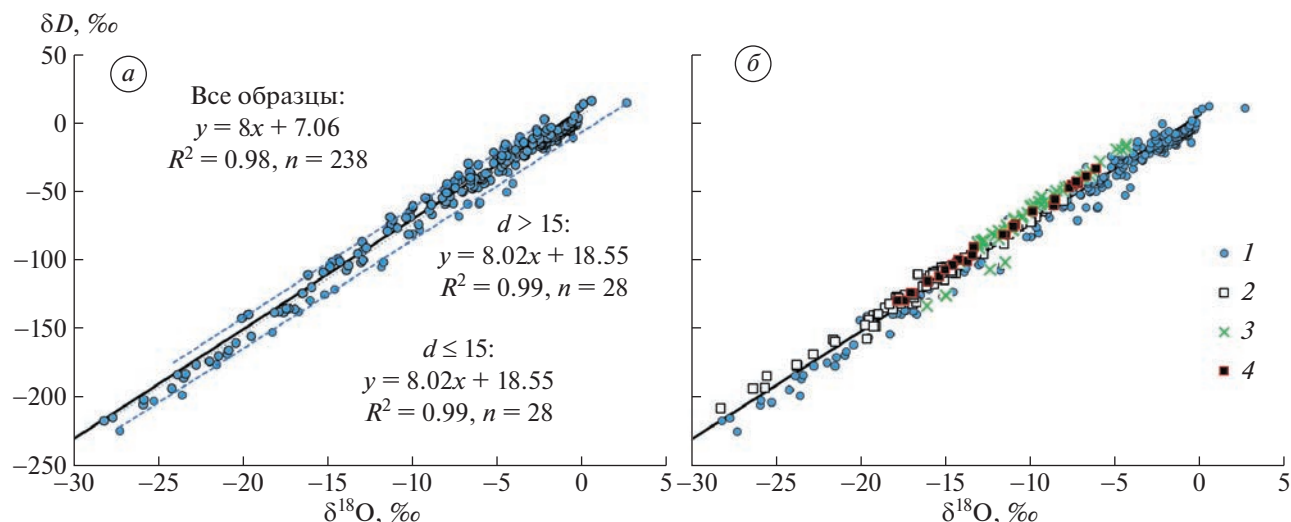


Рис. 4. Соотношение $\delta^{18}\text{O}$ – $\delta^2\text{H}$ для всех выпавших осадков на ст. Азау (а) и изотопные параметры снега и льда на склоне Эльбруса (б): 1 – осадки на станции Азау, 2 – ледниковый лёд на Западном плато Эльбруса, 3 – свежеснег (9–11.09.2010) на южном склоне Эльбруса в диапазоне высот 3000–4900 м, 4 – ледниковый лёд на Восточной Вершине Эльбруса.

Fig. 4. The $\delta^{18}\text{O}$ – $\delta^2\text{H}$ relationship for precipitation at Azau station (a) and isotope parameters of snow and ice on the Elbrus slope (b): 1 – precipitation at Azau station, 2 – glacial ice on the Western plateau of Elbrus, 3 – freshly snow (9–11.09.2010) on the southern slope of Elbrus in the altitude range of 3000–4900 m, 4 – glacial ice on the Eastern peak of Elbrus.

величины d_{exc} , зафиксированы в течение всего периода наблюдений без видимой связи с сезоном выпадения. Тем не менее, при осреднении всех полученных значений по сезонам (табл. 1), заметно, что для зимних месяцев значения d_{exc} ниже, чем для других месяцев года. Общий характер перемещения воздушных масс для зимнего периода (см. рис. 4) свидетельствует о преобладающем переносе с Атлантики, для этого источника пара характерны значения d_{exc} в зимние месяцы $<10\text{‰}$. С другой стороны, интенсивное рэлеевское истощение вдоль траектории может приводить к повышению величин d_{exc} осадков из этого источника.

Ближайшей к району исследований станцией, на которой проводились систематические наблюдения за изотопным составом осадков – станция в Бакуриани (абс. высота 1665 м), данные по которой с 2008 по 2018 г. включены в базу данных GNIP (WMO Code 3752400). Среднегодовое значение $\delta^{18}\text{O}$ осадков, полученное за 10 лет наблюдений на этой станции, составляет -10.4‰ (среднемесячные величины $\delta^{18}\text{O}$ осадков варьируют от -22.03 до 1.73‰), а среднегодовая величина d_{exc} составила 12.8‰ . При осреднении полученных значений $\delta^{18}\text{O}$ и $\delta^2\text{H}$ индивидуальных событий выпадения осадков до среднемесячных величин, а затем до среднегодовых, значения $\delta^{18}\text{O}$ и d_{exc} на

Таблица 1. Среднесезонные и среднегодовые значения $\delta^{18}\text{O}$, $\delta^2\text{H}$ и d -excess осадков на станции Азау и на ближайшей станции GNIP в Бакуриани ($41^\circ 43' 59.99''$ с.ш., $43^\circ 31' 0''$ в.д.)

Показатели	Декабрь–февраль	Март–май	Июнь–август	Сентябрь–ноябрь	Год
Азау					
$\delta^{18}\text{O}, \text{‰}$	-18.69 ± 1.22	-7.02 ± 4.92	-3.4 ± 0.14	-11.9 ± 5.49	-10.8 ± 6
$\delta^2\text{H}, \text{‰}$	-147 ± 10.2	-47.4 ± 37.7	-20.2 ± 1.1	-87 ± 42.5	-79.7 ± 50
d -excess, ‰	2.53 ± 1.2	8.81 ± 6.2	7.17 ± 1.65	8.3 ± 1.6	6.4 ± 3.1
Бакуриани					
$\delta^{18}\text{O}, \text{‰}$	-16.05 ± 0.43	-10.33 ± 1.44	-3.8 ± 0.65	-11.2 ± 2.3	-10.4 ± 4.1
$\delta^2\text{H}, \text{‰}$	-116.1 ± 3.36	-71.1 ± 11.2	-20.7 ± 5.3	-76.7 ± 20.4	-71.2 ± 32.2
d -excess, ‰	12.3 ± 1.6	11.2 ± 1.1	12.8 ± 0.3	14.8 ± 1.05	12.8 ± 1.4

поляне Азау составили -10.8 и 6.4‰ соответственно. В то время как среднемесячные значения $\delta^{18}\text{O}$ и $\delta^2\text{H}$ осадков зимнего периода на поляне Азау значительно ниже, чем в Бакуриани, в летний период наблюдается обратная картина — значения $\delta^{18}\text{O}$ и $\delta^2\text{H}$ осадков на поляне Азау значительно выше (см. табл. 1). Величины дейтериевого эксцесса на поляне Азау во все месяцы года, за исключением апреля, ниже, чем на Бакуриани. В летние месяцы высокие величины d_{exc} осадков на станции Бакуриани говорят о местном источнике влаги. На поляне Азау осадки должны также содержать высокие d_{exc} благодаря местному источнику и вкладу рециклинга влаги. Однако летние осадки на станции Азау имеют высокие $\delta^{18}\text{O}$ и относительные низкие d_{exc} . Эти особенности объяснены двумя процессами: происхождением пара из районов Средиземного и Черного морей и вкладом рециклинга влаги, в результате чего увеличиваются значения d_{exc} водяного пара; в результате последующего подоблачного испарения в каплях дождя возрастают значения $\delta^{18}\text{O}$ и уменьшаются d_{exc} .

В зимние месяцы разница между значениями $\delta^{18}\text{O}$ осадков на поляне Азау и Бакуриани может свидетельствовать о нормальном высотном эффекте (для января—марта $-0.3\text{‰}/100$ м), однако труднообъяснимым остаются низкие значения d_{exc} осадков зимнего периода на станции Азау. Близкое положение станции Бакуриани к району исследования позволяет предполагать общие черты воздушного переноса и происхождение осадков на этих станциях. Отличием считается значительная орографическая преграда Главного Кавказского хребта и разное высотное положение станций. Возможно, именно эти факторы играют определяющую роль в формировании осадков в Приэльбрусье.

Половина случаев выпадения осадков на станции Азау с величинами $d_{\text{exc}} < 0\text{‰}$ приходится на осадки зимнего периода. Отрицательные величины d_{exc} также характерны для осадков, выпадавших в 09.2019, 06—07.2021 и 02.2021 гг. (от -10.68 до -9.9‰). Эти осадки связаны с поступлением воздушных масс из центральной Европы, районов Средиземного моря и частично Северной Африки. Для 5-суточных обратных траекторий на всех уровнях движения воздушных частиц, связанных с эпизодами выпадения осадков с d_{exc} около -10‰ , характерна пониженная скорость движения воздушных частиц вдоль траекторий, что проявляется в меньшей протяженности обратных траекторий и относительно близком расположении потенциальных источников воздушных масс (рис. 5 для 3500 м). В целом траектории в дни с d_{exc} около -10‰ локализованы вблизи Средиземного моря, причем в теплое время года (27.09.2019,

03.06.2021 и 06.07.2021) над Южной Европой, а в холодное время года — над Средиземным морем и над Ближним Востоком (16.02.2021). Обратные траектории в дни с экстремально низкими d_{exc} в течение всех 5 суток до прибытия к Эльбрусу целиком располагались в континентальной зоне переноса, не достигая Атлантики, что говорит о низких скоростях движения воздушных частиц. Таким образом, осадки с низкими величинами d_{exc} связаны не с источниками и путями поступления влаги, а с процессами, происходящими при конденсации в малоподвижном воздушном потоке.

Атмосферные осадки в высокогорье имеют сложную картину формирования, связанную, с одной стороны, с быстрой сменой воздушных масс, а с другой — со сложными процессами конвекции и турбулентности, возникающими на горных склонах в том числе в суточном ритме (Kelsey et al., 2018). Описанных случаев выпадения атмосферных осадков с отрицательными величинами d_{exc} немного и в основном они связаны с испарением капель дождя, однако значения $d_{\text{exc}} < -10\text{‰}$ водяного пара в воздухе отмечались для инверсионных слоев атмосферы с низким содержанием водяного пара и в пограничном слое (Sodemann et al., 2017; Salmon et al., 2019).

Наиболее вероятная причина выпадения осадков с низкими величинами d_{exc} — подоблачное испарение водяного пара. На данный момент нет возможности оценить, происходили ли процессы внутриоблачного испарения и вертикальной стратификации водяного пара, это остается за пределами настоящего рассмотрения.

На высотах более 3000 м на склонах Эльбруса также зафиксированы единичные случаи выпадения осадков с низкими величинами d_{exc} , например, снегопад в сентябре 2010 г. (см. рис. 5). Опробование поверхностного свежевывапавшего снега на разных высотах показало, что свежевывапавший снег характеризуется значениями d_{exc} от 12 до 24‰, при этом для 4 образцов установлены значения d_{exc} от -2.2 до -7.3‰ . Возможно, и на больших абсолютных высотах в отдельных случаях могут наблюдаться те же процессы динамического изменения изотопных характеристик водяного пара, происходящих внутри облака.

Эти процессы могут искажать связь долина—вершина и понижать точность палеотемпературных реконструкций по ледниковым кернам.

Температурная зависимость. Впервые высокая степень корреляции между средневзвешенным изотопным составом кислорода осадков умеренного климата и среднегодовой температурой воздуха в месте отбора установлена В. Дансгором (Dansgaard, 1964). Глобальная зависимость величин $\delta^{18}\text{O}$ от среднегодовой приземной температу-

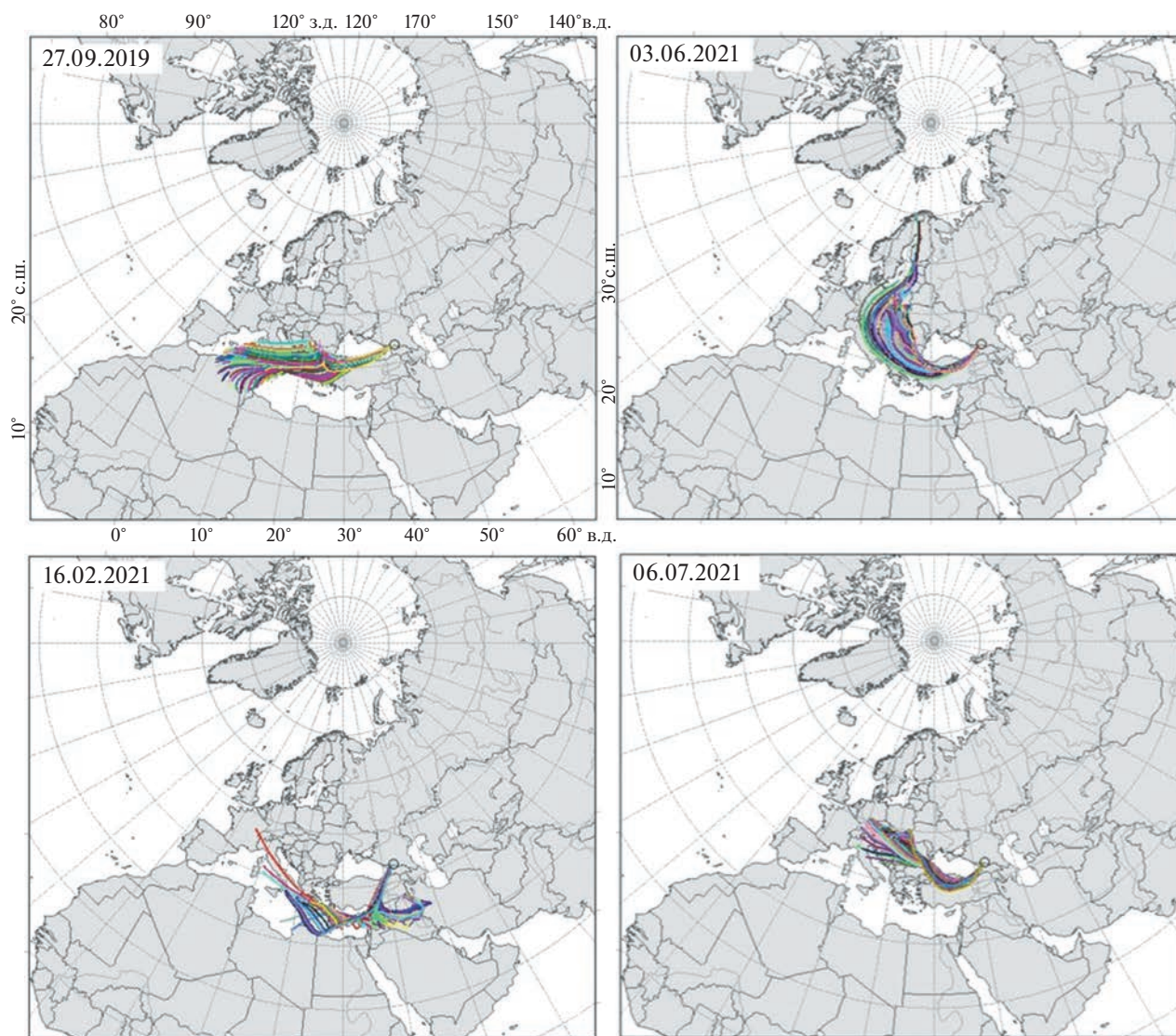


Рис. 5. Восстановленные обратные траектории (уровень 3500 м) движения воздушных масс для случаев выпадения осадков с величиной $d_{\text{exc}} < -10\text{‰}$.

Fig. 5. Back trajectories (level 3500 m) of air mass movement for cases of precipitation with $d_{\text{exc}} < -10\text{‰}$.

ры выражается как $\delta^{18}\text{O} = 0.69 T - 13.6\text{‰}$. Температурный коэффициент $\delta^{18}\text{O}/T \approx 0.7$ хорошо согласуется с предположениями, сделанными на основе экспериментальных и теоретических работ, и был подтвержден многочисленными эмпирическими данными для средних и высоких широт (Johnsen et al., 1989; Rozanski et al., 1992; Tian et al., 2003). Связь наиболее сильна в высоких широтах и хуже проявляется в средних широтах и экваториальных районах (Dansgaard, 1964). Очевидно, что температурный коэффициент может меняться в зависимости от расположения района наблюдения и ряда метеорологических факторов. Для корректных палеоклиматических реконструкций необходимо оценить этот температурный коэф-

фициент в конкретном регионе в интересующее время.

Применение зависимости $\Delta(\delta^{18}\text{O})/\Delta T$, полученной для осадков на станции Азау, для палеотемпературной интерпретации данных ледниковых кернов, полученных на абс. высотах более 4000 м, предполагает введения поправки на высотный изотопный эффект. Прямые наблюдения за температурой, выполненные на склоне Эльбруса в 2010 г. с применением автоматической метеостанции, показали, что средний высотный градиент температуры воздуха составляет $0.4^\circ\text{C}/100\text{ м}$ (Торопов и др., 2016). Ранее на леднике Гарабаши установлен высотный изотопный эффект для свежеснега, составивший в среднем $0.3\text{‰}/100\text{ м}$ (Васильчук и др., 2005), что

соответствует падению температуры с высотой на 0.4°C на 100 м.

С учётом этого, уравнение связи $\delta^{18}\text{O}$ — T , полученное для станции Азау, трансформируется в уравнение для высоты 4000 м вида $\delta^{18}\text{O} = 0.85 t - 17.8\text{‰}$, то есть изменение касается только величины свободного члена в уравнении регрессии. Высотный изотопный эффект не всегда проявляется, более того, зачастую для горных склонов характерно проявление обратного высотного эффекта (Jing et al., 2022), поэтому точное определение изотопного сдвига между осадками в долине и на высокогорных площадках бурения остается дискуссионным. Однако сам характер связи, выраженный отношением $\Delta(\delta^{18}\text{O})/\Delta T = 0.85\text{‰}/^{\circ}\text{C}$, может быть применен для палеореконструкций по ледниковым кернам Эльбруса. Подобный подход применен в исследованиях ледяного керна Чонгсе на Тибетском плато (Pang et al., 2020). Установленная для осадков величина $\Delta(\delta^{18}\text{O})/\Delta T = 1.61 \pm 0.22\text{‰}/^{\circ}\text{C}$ применена для реконструкции температур по значениям $\delta^{18}\text{O}$ ледникового керна. Сама величина $\Delta(\delta^{18}\text{O})/\Delta T$ для Чонгсе намного выше большинства наклонов $\Delta(\delta^{18}\text{O})/\Delta T$, наблюдаемых в регионах средних и высоких широт (0.6 – $0.7\text{‰}/^{\circ}\text{C}$) (Dansgaard, 1964; Rozanski et al., 1992), но сравнима с данными, полученными для других ледяных кернов высокогорного Памира (Tian et al., 2006). Возможно, на температурную зависимость могут влиять такие факторы, как изменения сезонного распределения осадков, смещение основных источников влаги, влияние локальной рециркуляции влаги, а также разный высотный уровень разгрузки воздушных масс. Высокий коэффициент $\Delta(\delta^{18}\text{O})/\Delta T$, равный $1.7\text{‰}/^{\circ}\text{C}$, получен в результате изучения ледникового керна Колле Гнифетти в Альпах (Keck, 2001). Для ледника Фишернхорн в Бернских Альпах сообщались значения $\Delta(\delta^{18}\text{O})/\Delta T = 1.1$ – $1.45\text{‰}/^{\circ}\text{C}$ (Rozanski et al., 1997; Schotterer et al., 1997). В качестве гипотезы для объяснения высоких коэффициентов $\Delta(\delta^{18}\text{O})/\Delta T$ (от установленного 1.7 до возможного $\sim 3\text{‰}/^{\circ}\text{C}$) для высокогорных районов Альп отмечалось охлаждение водяного пара на последних порциях рэлеевской конденсации при подъеме в горах и увеличение коэффициентов изотопного фракционирования при переходе от системы пар–вода к пар–лед (Keck, 2001).

Разный характер связи значений $\delta^{18}\text{O}$ осадков станции Азау с температурой воздуха, установленный для двух периодов (первый период с 05.2019 по 05.2020 г., второй – с 06.2020 по 09.2021 г.), обусловлен различиями в температуре воздуха и количестве выпавших осадков (970 и 1518 мм соответственно). Кроме того, в эти два периода от-

мечается разная связь с такими глобальными циркуляционными процессами, как Североатлантическое колебание (NAO).

Сильные положительные фазы индекса, как правило, связаны с температурами выше среднего по всей северной Европе и с температурами ниже средних в Гренландии и часто по всей южной Европе и на Ближнем Востоке. Они также связаны с количеством осадков выше среднего над Северной Европой и Скандинавией зимой и с осадками ниже среднего над Южной и Центральной Европой. Условно принимая положение района Эльбруса в Южной Европе, следует ожидать обратной корреляции между индексами NAO и температурами (количеством осадков) на станции Азау.

В сезон 2019/20 г. обнаруживается обратная корреляция среднемесячных температур воздуха и индекса NAO (рис. 6, в). В этот же сезон, согласно рассчитанной средней сезонной вероятности переноса P по массиву из 7695 обратных траекторий, отмечается дальний перенос воздушных масс и преобладающее влияние Атлантики (см. рис. 6, а). В сезон 2020/21 г. (9505 обратных траекторий) влияние Атлантики не так выражено, перемещение воздуха происходило из центральных районов Европы, из северной Африки, центральных районов европейской территории России (см. рис. 6, б). Такой характер переноса и большое количество выпавших осадков привело к тому, что для сезона 2020/21 г. отсутствует корреляция среднемесячных температур воздуха с индексом NAO (см. рис. 6, г). В оба сезона корреляции индекса с количеством выпавших осадков не наблюдается.

Полученный коэффициент $\Delta(\delta^{18}\text{O})/\Delta T = 1.06\text{‰}/^{\circ}\text{C}$ для периода с 05.2019 по 05.2020 г., связан со значительным обеднением воздушных масс к тому моменту, когда они достигали Кавказа. И меньшее количество осадков, выпавших за сезон, и большая протяженность траекторий движения воздушных масс (см. рис. 6) свидетельствуют в пользу повышения коэффициента: когда концентрация водяного пара низкая, его конденсация сопровождается более выраженными изотопными эффектами, особенно в условиях отрицательных температур воздуха, что приводит к более высокой чувствительности $\delta^{18}\text{O}$ — T . Различие коэффициентов связи $\Delta(\delta^{18}\text{O})/\Delta T$ для выделенных временных периодов говорит о том, что характер связи чутко реагирует на изменения метеорологических условий.

Благодаря различиям этих двух лет установленная зависимость $\Delta(\delta^{18}\text{O})/\Delta T = 0.85\text{‰}/^{\circ}\text{C}$ отражает осреднение, выполненное для периодов с разным метеорологическим паттерном и в первом приближении может применяться для палеореконструкций. Применяя установленное урав-

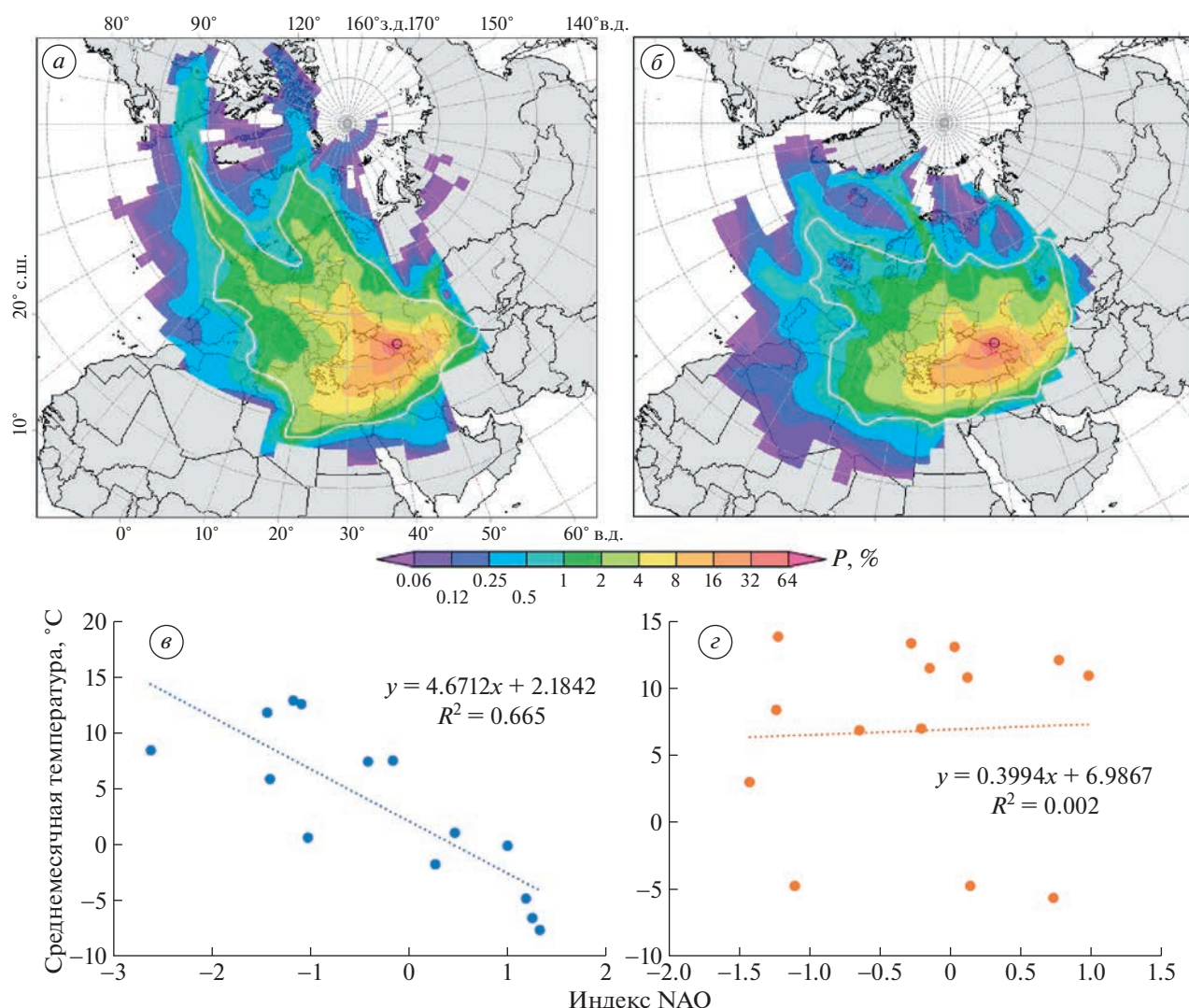


Рис. 6. Средняя вероятность переноса воздушной частицы на уровне 2500 м в период с мая 2019 по май 2020 г. (а) и с июня 2020 по сентябрь 2021 (б) и соответствующая этим периодам связь температуры воздуха с индексом Североатлантического колебания (в–г).

Fig. 6. The average probability of air particle transfer at a level of 2500 m in the period from May of 2019 to May of 2020 (a) and from June of 2020 to September of 2021 (b) and the relationship between air temperature and the North Atlantic Oscillation index for these periods (v–z).

нение регрессии и решая обратную задачу расчёта температур воздуха по величине $\delta^{18}\text{O}$ осадков, получаем среднюю абсолютную ошибку расчёта 3.2°C и коэффициент детерминации 0.67. Это те объективные ограничения реконструкции температур, которые обусловлены нарушениями связи $\delta^{18}\text{O}$ –Т из-за процессов, сопровождающих конденсацию. Изучая ледниковые керны, палеоинформация в которых в значительной степени естественным образом усреднена, сталкиваемся не только с вопросами точности реконструкции температур, но и с потерей связи $\delta^{18}\text{O}$ –Т (Козачек и др., 2015) в результате неравномерной аккумуляции.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Значения $\delta^{18}\text{O}$ и $\delta^2\text{H}$ атмосферных осадков, отобранных с 05.2019 по 09.2021 г. на станции Азау в Приэльбрусье, варьируют от 0.52‰ до -28.22‰ и от 16.3‰ до -224.1‰ соответственно, обнаруживая закономерную сезонность – высокие значения $\delta^{18}\text{O}$ и $\delta^2\text{H}$ летом и низкие – зимой. Дейтериевый эксцесс варьирует в очень широких пределах от 24.8‰ до -27.4‰ . Осадки в Приэльбрусье зимой связаны с преобладающим переносом из Атлантики, летом – с преобладанием переноса из районов Центральной Европы, Средиземного и Чёрного морей. Средиземное море во все сезоны является районом, откуда про-

исходит перенос воздуха и содержащейся в нём влаги к Эльбрусу.

Все полученные значения $\delta^{18}\text{O}$ и $\delta^2\text{H}$ аппроксимируются уравнением $\delta^2\text{H} = 8.02 \delta^{18}\text{O} + 7.0$ ($R^2 = 0.98$), близким к глобальной линии метеорных вод. Средняя величина дейтериевого эксцесса при осреднении по всем образцам составила $6.82 \pm 5.99\text{‰}$.

В целом за два года наблюдений связь значений $\delta^{18}\text{O}$ осадков с температурой приземного слоя воздуха выражается коэффициентом $\Delta(\delta^{18}\text{O})/\Delta T = 0.85\text{‰}/^\circ\text{C}$. Учитывая различные метеорологические условия, характерные для двух сезонов наблюдений, общая погрешность реконструкции температур воздуха по величине $\delta^{18}\text{O}$ осадков составила $\pm 3.2^\circ\text{C}$. Это та объективная ошибка, которая обусловлена нарушениями связи $\delta^{18}\text{O}$ – T ввиду процессов, сопровождающих конденсацию (внутриоблачное испарение, орographic осадки, смешение разных воздушных масс, разные источники воздушных масс). При исследовании связи по таким палеоархивам как ледниковые керны с Западного плато Эльбруса и Восточной вершины, помимо учета высотного изотопного эффекта, требуется поиск дополнительных маркеров для привязки изотопной записи по льду к сезонам аккумуляции. И хотя сезонные вариации $\delta^{18}\text{O}$ или $\delta^2\text{H}$ применяются и по настоящее время для подсчета годовых слоёв, поиск новых дополнительных маркеров для выделения слоев летней/зимней аккумуляции в керне остается актуальной задачей.

Благодарности. Работа выполнена в рамках мегагранта (Соглашение № 075-15-2021-599 от 08.06.2021) “Палеоэкологические реконструкции как ключ к пониманию прошлых, текущих и будущих изменений климата и окружающей среды в России”. Обзор работ по изотопному составу осадков в горных районах выполнен в рамках государственного задания Института географии РАН № FMGE-2019-0004. Траекторный анализ выполнялся в рамках Госзаданий ИФА им. А.М. Обухова РАН.

Acknowledgements. Study supported by the Megagrant project (agreement № 075-15-202-599, 8.06.2021) “Paleoecological Reconstructions as a Key to Understanding Past, Current, and Future Climate and Environmental Changes in Russia.” The review of the work on precipitation isotopic composition in mountain regions was supported within the framework of State Assignment № FMGE-2019-0004 for the RAS Institute of Geography. The trajectory analysis was carried out within the framework of the State Assignments of the RAS Obukhov Institute of Atmospheric Physics.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Васильчук Ю.К., Чижова Ю.Н., Папеш В., Буданцева Н.А. Высотный изотопный эффект в снеге на леднике Гарабаши в Приэльбрусье // Криосфера Земли. 2005. Т. 9 (4). С. 72–81.
- Козачек А.В., Екайкин А.А., Михаленко В.Н., Липенков В.Я., Кутузов С.С. Изотопный состав ледяных кернов, полученных на Западном плато г. Эльбрус // Лёд и Снег. 2015. Т. 55. № 4. С. 35–49.
- Михаленко В.Н., Кутузов С.С., Лаврентьев И.И., Кунахович М.Г., Томпсон Л.Г. Исследования западного ледникового плато Эльбруса: результаты и перспективы // МГИ. 2005. Т. 99. С. 185–190.
- Торопов П.А., Михаленко В.Н., Кутузов С.С., Морозова П.А., Шестакова А.А. Температурный и радиационный режим ледников на склонах Эльбруса в период абляции за последние 65 лет // Лёд и Снег. 2016. Т. 56. № 1. С. 5–19.
- Чижова Ю.Н., Михаленко В.Н., Васильчук Ю.К., Буданцева Н.А., Козачек А.В., Кутузов С.С., Лаврентьев И.И. Изотопный состав кислорода снежно-фирновой толщи на Восточной вершине Эльбруса // Лёд и Снег. 2019. Т. 59. № 3. С. 293–305. <https://doi.org/10.15356/2076-6734-2019-3-426>
- Bohleber P., Erhardt T., Spaulding N., Hoffmann H., Fischer H., Mayewski P. Temperature and mineral dust variability recorded in two low-accumulation Alpine ice cores over the last millennium // Climate of the Past. 2018. V. 14. P. 21–37. <https://doi.org/10.5194/cp-14-21-2018>
- Ciais P., Jouzel J. Deuterium and oxygen 18 in precipitation: An isotopic model including mixed cloud processes // Geophys. Research Letters. 1994. V. 99. P. 16793–16803.
- Dansgaard W. Stable isotopes in precipitation // Tellus. 1964. V. 16. № 4. P. 436–468.
- Draxler R.R., Hess G.D. An overview of the HYSPLIT_4 modeling system of trajectories, dispersion, and deposition // Austral. Meteorol. Magasin. 1998. V. 47. P. 295–308.
- Gat J.R. Atmospheric water balance – the isotopic perspective // Hydrological Processes. 2000. V. 14. P. 1357–1369.
- Gat J., Carmi I. Evolution of the Isotopic Composition of Atmospheric Waters in the Mediterranean Sea Area // Geophys. Research Letters. 1970. V. 75. P. 3039–3048. <https://doi.org/10.1029/JC075i015p03039>
- Jing Z., Yu W., Lewis S., Thompson L.G., Xu J., Zhang J., Xu B., Wu G., Ma Y., Wang Y., Guo R. Inverse altitude effect disputes the theoretical foundation of stable isotope paleoaltimetry // Nature Communication. 2022. V. 13. P. 4371. <https://doi.org/10.1038/s41467-022-32172-9>
- Kalnay E., Kanamitsu M., Kistler R., Collins W., Deaven D., Gandin L., Iredell M., Saha S., White G., Woollen J., Zhu Y., Leetmaa A., Reynolds R. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project // Bull. Amer. Meteorol. Society. 1996. V. 77. P. 437–471.
- Keck L. Climate significance of stable isotope records from Alpine ice cores: Combined Faculties for the Natural Sciences and for Mathematics. Dissertation for the de-

- gree of Doctor of Natural Sciences. Heidelberg, 2001. 141 p.
- Kistler R., Kalnay E., Collins W., Saha S., White G., Woollen J., Chelliah M., Ebisuzaki W., Kanamitsu M., Kousky V., Van den Dool H., Jenne R., Fiorino M. The NCEP–NCAR 50-Year Reanalysis: Monthly Means CD-ROM and Documentation // *Bull. Amer. Meteorol. Society*. 2001. V. 82 №. 2. P. 247–268.
- Kutuzov S., Legrand M., Preunkert S., Ginot P., Mikhailenko V., Shukurov K., Polyukhov A., Toropov P. The Elbrus (Caucasus, Russia) ice core record – Part 2: history of desert dust deposition // *Atmospheric Chemistry and Physics*. 2019. V. 19. P. 14133–14148. <https://doi.org/10.5194/acp-19-14133-2019>
- Mikhaleiko V., Sokratov S., Kutuzov S., Ginot P., Legrand M., Preunkert S., Lavrentiev I., Kozachek A., Ekaykin A., Fain X., Lim S., Schotterer U., Lipenkov V., Toropov P. Investigation of a deep ice core from the Elbrus western plateau, the Caucasus, Russia // *The Cryosphere*. 2015. V. 9. P. 2253–2270. <https://doi.org/10.5194/tc-9-2253-2015>
- Pfahl S., Sodemann H. What controls deuterium excess in global precipitation? // *Climate of the Past*. 2014. V. 10. P. 771–781. <https://doi.org/10.5194/cp-10-771-2014>
- Rozanski K., Arguas-Arguas L., Gonfiantini R. Relation between long-term trends of Oxygen-18 isotope composition of precipitation and climate // *Science*. 1992. V. 258. № 5084. P. 981–985. <https://doi.org/10.1126/science.258.5084.981>
- Rozanski K., Johnsen S.J., Schotterer U., Thompson, L.G. Reconstruction of past climates from stable isotope records of palaeo-precipitation preserved in continental archives // *Journ. of the Hydrological Sciences*. 1997. V. 42. P. 725745. <https://doi.org/10.1080/02626669709492069>
- Salmon O.E., Welp L.R., Baldwin M.E., Hajny K.D., Stirm B.H., Shepson P.B. Vertical profile observations of water vapor deuterium excess in the lower troposphere // *Atmospheric Chemistry and Physics*. 2019. V. 19. P. 11525–11543. <https://doi.org/10.5194/acp-19-11525-2019>
- Schotterer U., Fröhlich K., Gäggeler H.W., Sandjordi S., Stichler W. Isotope Records from Mongolian and Alpine Ice Cores as Climate Indicators // *Climatic Change*. 1997. V. 36. P. 519–530.
- Shukurov K.A., Chkhetiani O.G. Probability of transport of air parcels from the arid lands in the Southern Russia to Moscow region // *Proc. SPIE*. 2017. V. 10466. P. 104663V. <https://doi.org/10.1117/12.2287932>
- Sodemann H., Aemisegger F., Pfahl S., Bitter M., Corsmeier U., Feuerle T., Graf P., Hankers R., Hsiao G., Schulz H., Wieser A., Wernli H. The stable isotopic composition of water vapour above Corsica during the HyMeX SOP1 campaign: Insight into vertical mixing processes from lower-tropospheric survey flights // *Atmospheric Chemistry and Physics*. 2017. V. 17. P. 6125–6151. <https://doi.org/10.5194/acp-17-6125-2017>
- Stein A.F., Draxler R.R., Rolph G.D., Stunder B.J.B., Cohen M.D., Ngan F. NOAA's HYSPLIT atmospheric transport and dispersion modeling system // *Bull. Amer. Meteorol. Society*. 2015. V. 96. P. 2059–2077.
- Stenni B., Masson-Delmotte V., Selmo E., Oerter H., Meyer H., Röthlisberger R., Jouzel J., Cattani O., Falourd S., Fischer H., Hoffmann G., Iacumin P., Johnsen S., Minster B., Udisti R. The deuterium excess records of EPICA Dome C and Dronning Maud Land ice cores (East Antarctica) // *Quaternary Science Rev.* 2010. V. 29. P. 146–159.
- Tian L., Yao T., Li Z., MacClune K., Wu G., Xu B. Recent rapid warming trend revealed from the isotopic record in Muztagata ice core, eastern Pamirs // *Journ. of Geophys. Research*. 2006. V. 111. P. D13103. <https://doi.org/10.1029/2006JD006249>
- Vasil'chuk Yu., Chizhova Ju., Frolova N., Budantseva N., Kireeva M., Oleynikov A., Tokarev I., Rets E., Vasil'chuk A. A variation of stable isotope composition of snow with altitude on the Elbrus Mountain, Central Caucasus // *Geography, Environment, Sustainability*. 2020. V. 13. № 1. P. 172–182. <https://doi.org/10.24057/2071-9388-2018-22>
- Vimeux F., Masson V., Delaygue G., Jouzel J., Petit J.R., Stievenard M. A 420,000 year deuterium excess record from East Antarctica: Information on past changes in the origin of precipitation at Vostok // *Journ. of Geophys. Research. Atmosphere*. 2001. V. 106. № D23. P. 31863–31873.
- Wallace J., Hobbs P. *Atmospheric Science: An Introductory Survey*. Academic, San Diego, California. 2006. 488 p.

Citation: Chizhova Ju.N., Mikhailenko V.N., Kutuzov S.S., Shukurov K.A., Kozachek A.V. Isotopic signature of precipitation in the Elbrus region. *Led i Sneg. Ice and Snow*. 2023, 63 (1): 33–47 [In Russian]. doi 10.31857/S2076673423010052

Isotopic Signature of Precipitation in the Elbrus Region

Ju. N. Chizhova^{a,b,#}, V. N. Mikhailenko^b, S. S. Kutuzov^b, K. A. Shukurov^c, A. V. Kozachek^d

^a Institute of Geology of Ore Deposits, Petrography, Mineralogy and Geochemistry, Russian Academy of Science, Moscow, Russia

^b Institute of Geography, Russian Academy of Science, Moscow, Russia

^c A.M. Obukhov Institute of Atmospheric Physics, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

^d Arctic and Antarctic Research Institute, St. Petersburg, Russia

#e-mail: eacentr@yandex.ru

The aim of the work was to study the isotopic characteristics of precipitation to establish the dependence of $\delta^{18}\text{O}$ values on temperature at the time of precipitation and to get closer to understanding the processes that form the isotopic signature of the Elbrus snow cover and glacial ice. The sampling of precipitation was organized at Azau station, located at the foot of Elbrus at an altitude of 2300 m for the period from May 01.2019 to September 27.2021. The sampling was carried out once a day at 9:00 Moscow time. The air temperature was recorded at the meteorological station in the Terskol village (Roshydromet station No. 4334250). To study the main features of long-range air transport and possible sources of moisture, 5-day back trajectories were reconstructed using the NOAA HYSPLIT_4 trajectory model. The results showed that precipitation in the Elbrus region in winter was associated with the prevailing transfer from the Atlantic, in summer – with the predominance of transfer from the regions of Central Europe, the Mediterranean and Black Seas. The Mediterranean Sea in all seasons was the area from which the air and moisture were transferred to Elbrus. The values of $\delta^{18}\text{O}$ and $\delta^2\text{H}$ of precipitation varied from 0.52 to -28.22‰ and from 16.3 to -224.1‰ , respectively, revealing regular seasonality with high values of $\delta^{18}\text{O}$ and $\delta^2\text{H}$ in summer and low in winter. The deuterium excess varied over a wide range from 24.8 to -14.6‰ . All obtained values of $\delta^{18}\text{O}$ and $\delta^2\text{H}$ were approximated by the equation $\delta^2\text{H} = 8\delta^{18}\text{O} + 7.06$ ($R^2 = 0.98$), which was close to the global meteoric water line. In general, for 2 years of observations, the relationship between the $\delta^{18}\text{O}$ values of precipitation and the temperature of the surface air layer was expressed as $0.85\text{‰}/^\circ\text{C}$. Total mean absolute error in the reconstruction of air temperatures from the $\delta^{18}\text{O}$ value of precipitation was 3.2°C due to objective reasons and also differences in meteorological conditions of two years of observations.

Keywords: oxygen isotope composition, hydrogen isotope composition, precipitation, Caucasus, Elbrus, temperature reconstruction

REFERENCES

- Vasil'chuk Yu.K., Chizhova Yu.N., Papesh V., Budantseva N.A. Altitude isotope effect in the snow on the Garabashi glacier in the Elbrus region. *Kriosfera Zemli. Earth's Cryosphere*. 2005, 9 (4): 72–81 [In Russian].
- Kozachek A.V., Ekaykin A.A., Mikhaleiko V.N., Lipenkov V.Ya., Kutuzov S.S. Isotopic composition of ice cores obtained on the Western Plateau of Elbrus. *Led i Sneg. Ice and snow*. 2015, 55 (4): 35–49 [In Russian].
- Mikhaleiko V.N., Kutuzov S.S., Lavrentiev I.I., Kunakhovich M.G., Thompson L.G. Studies of the western glacial plateau of Elbrus: results and prospects. *Materialy glyatsiologicheskikh issledovaniy. Data of Glaciological Studies*. 2005, 99: 185–190 [In Russian].
- Toropov P.A., Mikhaleiko V.N., Kutuzov S.S., Morozova P.A., Shestakova A.A. Temperature and radiation regime of glaciers on the slopes of Elbrus during the ablation period over the past 65 years. *Led i Sneg. Ice and Snow*. 2016, 56 (1): 5–19 [In Russian].
- Chizhova Yu.N., Mikhaleiko V.N., Vasil'chuk Yu.K., Budantseva N.A., Kozachek A.V., Kutuzov S.S., Lavrentiev I.I. Isotopic composition of oxygen in snow-and-firn thickness on the Eastern peak of Elbrus, the Caucasus. *Led i Sneg. Ice and Snow*. 2019, 59 (3): 293–305 [In Russian].
<https://doi.org/10.15356/2076-6734-2019-3-426>
- Bohleber P., Erhardt T., Spaulding N., Hoffmann H., Fischer H., Mayewski P. Temperature and mineral dust variability recorded in two low-accumulation Alpine ice cores over the last millennium. *Climate of the Past*. 2018, 14: 21–37.
<https://doi.org/10.5194/cp-14-21-2018>.
- Ciais P., Jouzel J. Deuterium and oxygen 18 in precipitation: An isotopic model including mixed cloud processes. *Geophys. Research Letters*. 1994, 99: 16793–16803.
- Dansgaard W. Stable isotopes in precipitation. *Tellus*. 1964, 16 (4): 436–468.
- Draxler R.R., Hess G.D. An overview of the HYSPLIT_4 modeling system of trajectories, dispersion, and deposition. *Austral. Meteorol. Magasin*. 1998, 47: 295–308.
- Gat J. R. Atmospheric water balance – the isotopic perspective. *Hydrological Processes*. 2000, 14: 1357–1369.
- Gat J., Carmi I. Evolution of the Isotopic Composition of Atmospheric Waters in the Mediterranean Sea Area. *Geophys. Research Letters*. 1970, 75: 3039–3048.
<https://doi.org/10.1029/JC075i015p03039>.
- Jing Z., Yu W., Lewis S., Thompson L.G., Xu J., Zhang J., Xu B., Wu G., Ma Y., Wang Y., Guo R. Inverse altitude effect disputes the theoretical foundation of stable isotope paleoaltimetry. *Nature Communication*. 2022, 13: 4371.
<https://doi.org/10.1038/s41467-022-32172-9>
- Kalnay E., Kanamitsu M., Kistler R., Collins W., Deaven D., Gandin L., Iredell M., Saha S., White G., Woollen J., Zhu Y., Leetmaa A., Reynolds R. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project. *Bull. Amer. Meteorol. Society*. 1996, 77: 437–471.
- Keck L. Climate significance of stable isotope records from Alpine ice cores: Combined Faculties for the Natural Sciences and for Mathematics. Dissertation for the degree of Doctor of Natural Sciences. Heidelberg, 2001. 141 p.
- Kistler R., Kalnay E., Collins W., Saha S., White G., Woollen J., Chelliah M., Ebisuzaki W., Kanamitsu M., Kousky V., Van den Dool H., Jenne R., Fiorino M. The NCEP–NCAR 50-Year Reanalysis: Monthly Means CD-ROM and Documentation. *Bull. Amer. Meteorol. Society*. 2001, 82 (2): 247–268.
- Kutuzov S., Legrand M., Preunkert S., Ginot P., Mikhaleiko V., Shukurov K., Polyukhov A., Toropov P. The Elbrus (Caucasus, Russia) ice core record – Part 2: History of desert dust deposition. *Atmospheric Chemistry and Physics*. 2019, 19: 14133–14148.
<https://doi.org/10.5194/acp-19-14133-2019>
- Mikhaleiko V., Sokratov S., Kutuzov S., Ginot P., Legrand M., Preunkert S., Lavrentiev I., Kozachek A., Ekay-

- kin A., Faïn X., Lim S., Schotterer U., Lipenkov V., Toropov P. Investigation of a deep ice core from the Elbrus western plateau, the Caucasus, Russia. *The Cryosphere*. 2015, 9: 2253–2270.
<https://doi.org/10.5194/tc-9-2253-2015>.
- Pfahl S., Sodemann H. What controls deuterium excess in global precipitation? *Climate of the Past*. 2014, 10: 771–781.
<https://doi.org/10.5194/cp-10-771-2014>, 2014.
- Rozanski K., Arguas-Arguas L., Gonfiantini R. Relation between long-term trends of Oxygen-18 isotope composition of precipitation and climate. *Science*. 1992, 258 (5084): 981–985.
<https://doi.org/10.1126/science.258.5084.981>
- Rozanski K., Johnsen S.J., Schotterer U., Thompson, L.G. Reconstruction of past climates from stable isotope records of palaeo-precipitation preserved in continental archives. *Journ. of the Hydrol. Sciences* 1997, 42: 725745.
<https://doi.org/10.1080/02626669709492069>
- Salmon O.E., Welp L.R., Baldwin M.E., Hajny K.D., Stirm B.H., Shepson P.B. Vertical profile observations of water vapor deuterium excess in the lower troposphere. *Atmospheric Chemistry and Physics*. 2019, 19: 11525–11543.
<https://doi.org/10.5194/acp-19-11525-2019>, 2019.
- Schotterer U., Fröhlich K., Gäggeler H.W., Sandjordi S., Stichler W. Isotope Records from Mongolian and Alpine Ice Cores as Climate Indicators. *Climatic Change*. 1997, 36: 519–530.
- Shukurov K.A., Chkhetiani O.G. Probability of transport of air parcels from the arid lands in the Southern Russia to Moscow region. *Proc. SPIE* 2017, 10466: 104663V.
<https://doi.org/10.1117/12.2287932>
- Sodemann H., Aemisegger F., Pfahl S., Bitter M., Corsmeier U., Feuerle T., Graf P., Hankers R., Hsiao G., Schulz H., Wieser A., Wernli H. The stable isotopic composition of water vapour above Corsica during the HyMeX SOP1 campaign: Insight into vertical mixing processes from lower-tropospheric survey flights. *Atmospheric Chemistry and Physics*. 2017, 17: 6125–6151.
<https://doi.org/10.5194/acp-17-6125-2017>.
- Stein A.F., Draxler R.R., Rolph G.D., Stunder B.J.B., Cohen M.D., Ngan F. NOAA's HYSPLIT atmospheric transport and dispersion modeling system. *Bull. Amer. Meteorol. Society*. 2015, 96: 2059–2077.
- Stenni B., Masson-Delmotte V., Selmo E., Oerter H., Meyer H., Röthlisberger R., Jouzel J., Cattani O., Falourd S., Fischer H., Hoffmann G., Iacumin P., Johnsen S., Minster B., Udisti R. The deuterium excess records of EPICA Dome C and Dronning Maud Land ice cores (East Antarctica). *Quaternary Science Rev.* 2010, 29: 146–159.
- Tian L., Yao T., Li Z., MacClune K., Wu G., Xu B. Recent rapid warming trend revealed from the isotopic record in Muztagata ice core, eastern Pamirs. *Journ. of Geophys. Research*. 2006, 111: D13103.
<https://doi.org/10.1029/2000JD006249>
- Vasil'chuk Yu., Chizhova Ju., Frolova N., Budantseva N., Kireeva M., Oleynikov A., Tokarev I., Rets E., Vasil'chuk A. A variation of stable isotope composition of snow with altitude on the Elbrus Mountain, Central Caucasus. *Geography, Environment, Sustainability*. 2020, 13 (1): 172–182.
<https://doi.org/10.24057/2071-9388-2018-22>
- Vimeux F., Masson V., Delaygue G., Jouzel J., Petit J.R., Stievenard M. A 420,000 year deuterium excess record from East Antarctica: Information on past changes in the origin of precipitation at Vostok. *Journ. of Geophys. Research*. 2001, 106 (D23): 31863–31873.
- Wallace J., Hobbs P. *Atmospheric Science: An Introductory Survey*. Academic, San Diego, Calif. 2006, 488.