

УДК 556.114
DOI 10.17513/use.38171

ИЗОТОПНЫЙ СОСТАВ АТМОСФЕРНЫХ ОСАДКОВ В БАССЕЙНЕ РЕКИ ТАЛДУРА (ЮЖНО-ЧУЙСКИЙ ХРЕБЕТ, АЛТАЙ)

Банцев Д.В., Овсепян А.А., Каспин М.О.,
Бакшеева Т.В., Горбунова Ю.А., Чебыкина Е.П.

ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет», Санкт-Петербург,
e-mail: annahit2002@mail.ru

В статье приведены результаты изотопного анализа (определение относительных концентраций стабильных изотопов кислород-18 и водород-2 в воде) состава атмосферных осадков на территории Южно-Чуйского хребта (Центральный Алтай) в летний период 2023 г. Были определены средневзвешенные значения изотопного состава осадков на разных высотных уровнях. Высотный эффект уменьшения изотопного состава наблюдался для отдельных событий осадков, но по средневзвешенным значениям данный эффект не выражен, что может быть связано с формированием осадков на едином уровне конденсации. Предположительно из-за особенностей локальной циркуляции в долине р. Талдура наблюдаются признаки обратного высотного эффекта. По полученным значениям изотопного состава атмосферных осадков была построена локальная линия метеорных вод (ЛЛМВ), которая имеет вид $\delta^2\text{H} = 7,51 \delta^{18}\text{O} + 4,13$. Полученные изотопные характеристики сравнивались с модельными данными IsoMAP, представленными в открытом доступе. Сравнение показало, что модельные значения в целом хорошо соотносятся с изотопным составом летних событийных осадков, полученным в результате данного исследования. Таким образом, данные IsoMAP можно использовать для предварительной оценки факторов формирования стока рек Центрального Алтая в дальнейших изотопно-гидрологических работах.

Ключевые слова: атмосферные осадки, Алтай, стабильные изотопы, изотопный состав

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФ, проект № 23-27-00173 «Оценка вклада различных источников питания в сток ледниковых рек Юго-Восточного Алтая по данным изотопных индикаторов».

ISOTOPIC COMPOSITION OF PRECIPITATION IN THE TALDURA RIVER BASIN (THE SOUTH CHUYA RIDGE, ALTAI)

Bantsev D.V., Ovsepyan A.A., Kaspin M.O.,
Baksheeva T.V., Gorbunova Yu.A., Chebykina E.P.

Saint Petersburg State University, Saint Petersburg, e-mail: annahit2002@mail.ru

The article presents the results of isotope analysis (determination of the relative concentrations of stable isotopes oxygen 18 and hydrogen 2 in water) of precipitation in the South Chuya Ridge (Central Altai) in the summer of 2023. Weighted average values of the isotopic composition of precipitation at different altitude levels were determined. The altitudinal effect of a decrease in isotopic composition was observed for individual precipitation events, but according to the weighted average values, this effect is not pronounced, which may be due to the formation of precipitation at a single condensation level. Presumably, due to the peculiarities of local circulation in the valley of the Taldura River, signs of a reverse altitude effect are observed. Based on the obtained values of the isotopic composition of precipitation, a local meteoric water line (LMWL) was constructed, which has the form $\delta^2\text{H} = 7.51 \delta^{18}\text{O} + 4.13$. The obtained isotopic characteristics were compared with IsoMAP model data presented in the public domain. The comparison showed that the model values generally correlate well with the isotopic compositions of summer event precipitation obtained as a result of this study. Thus, the IsoMAP data can be used for a preliminary assessment of the factors responsible for the formation of river runoff in Central Altai in further isotope-hydrological researches.

Keywords: precipitation, Altai, stable isotopes, isotopic composition

The work was carried out with the financial support of the Russian Science Foundation, project No. 23-27-00173 "Assessment of the contribution of various food sources to the runoff of glacial rivers of South-Eastern Altai according to isotope indicator data".

Исследования содержания стабильных изотопов кислорода и дейтерия в воде являются одним из передовых направлений в науках о Земле. Данные об изотопном составе атмосферных осадков позволяют получить информацию об условиях формирования стока, а также оценить вклад осадков в питание различных гидрологических объектов.

Помимо анализа ледяных кернов, изотопными исследованиями территория Ал-

тая затронута недостаточно. Изотопный состав событийных осадков определялся в предгорьях Алтая и на территории Северо-Чуйского хребта [1–3].

Непосредственно на территории Южно-Чуйского хребта изотопных исследований атмосферных осадков не было, что подтверждает нехватку информации в данном районе и необходимость проведения работ.

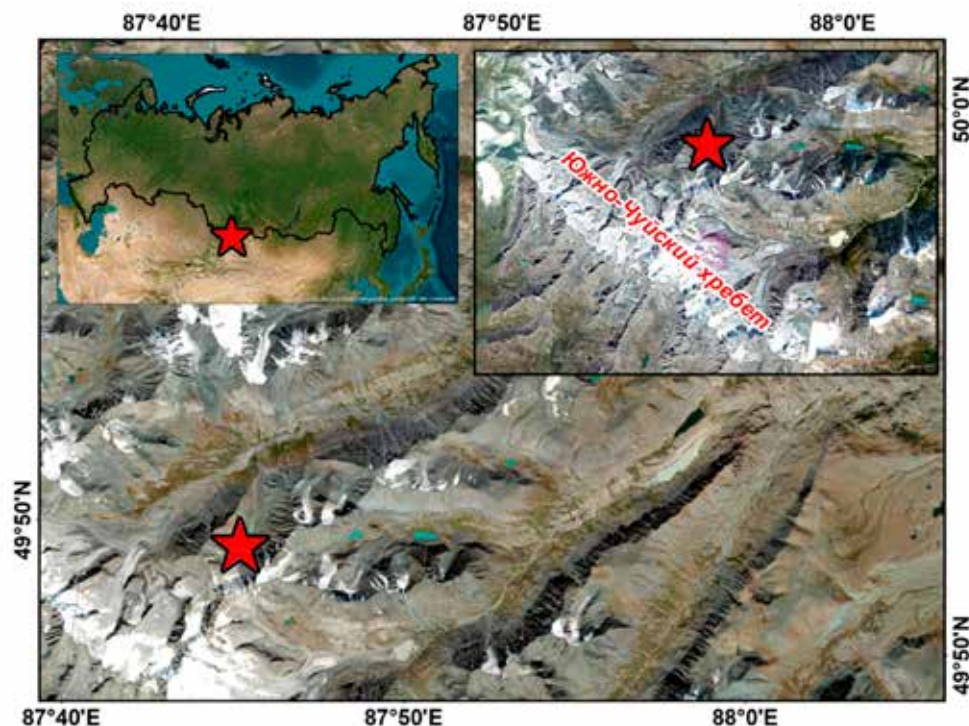


Рис. 1. Географическое положение района исследования

В основе исследования лежит получение парных изотопных характеристик ($\delta^{18}\text{O}$ - $\delta^2\text{H}$) событийных осадков в долине р. Талдура, отобранных при полевых работах в июле – августе 2023 г. Целью работы являлась оценка изменения изотопного состава летних событийных осадков в бассейне реки Талдура на разных высотных уровнях, а также сравнение полученных полевых данных с модельными данными IsoMAP с портала OIPC [4–6].

Южно-Чуйский хребет (рис. 1) находится в юго-восточной части Центрального Алтая и простирается на 120 км с запада на восток. Средние высоты хребта варьируются в пределах 3400–3800 м, наивысшей точкой является гора Ирбисту, расположенная на высоте 3967 м [7].

Для территории характерен криоаридный климат. В высокогорных районах наблюдается отрицательная среднегодовая температура (-6 – -7°C). Средняя температура самого теплого месяца (июля) в высокогорных районах составляет 6 – 10°C . Самым холодным месяцем является январь. Переход температуры через 0°C в высокогорье весной в среднем происходит в конце мая, а осенью – в сентябре. Годовое количество осадков в Центральном Алтае составляет 400 – 600 мм. С апреля по октябрь выпадает 70 – 85% от годовой суммы осадков. Месяч-

ный максимум наблюдается обычно в июне-июле [8].

Экспедиционные работы проводились в долине р. Талдура, где объектом исследования являлись осадки, выпадающие в бассейне данной реки.

Материалы и методы исследования

Пробы событийных осадков на изотопный анализ отобраны в долине р. Талдура в период с 5 июля 2023 г. по 4 августа 2023 г. Всего было организовано 4 пункта сбора: 2 в верхнем и нижнем течении р. Талдура и 2 – в долине ледника Некрасова. В последнем пробы были получены в двух местах: непосредственно с ледника Некрасова и на морене в 1 км от его края (рис. 2).

Период наблюдений в пунктах сбора проб, их высота и количество проб показаны в табл. 1.

Образцы отбирались из портативного осадкомера в герметичные пробирки емкостью 50 мл. Отбор осадков происходил по срокам: в 8, 12, 16 и 20 ч. Поскольку испарение искажает изотопный состав воды, при хранении и транспортировке проб было важно его минимизировать, в связи с чем все пробы герметизировались специальной пленкой PARAFILM, а в лабораториях хранились в замороженном виде.

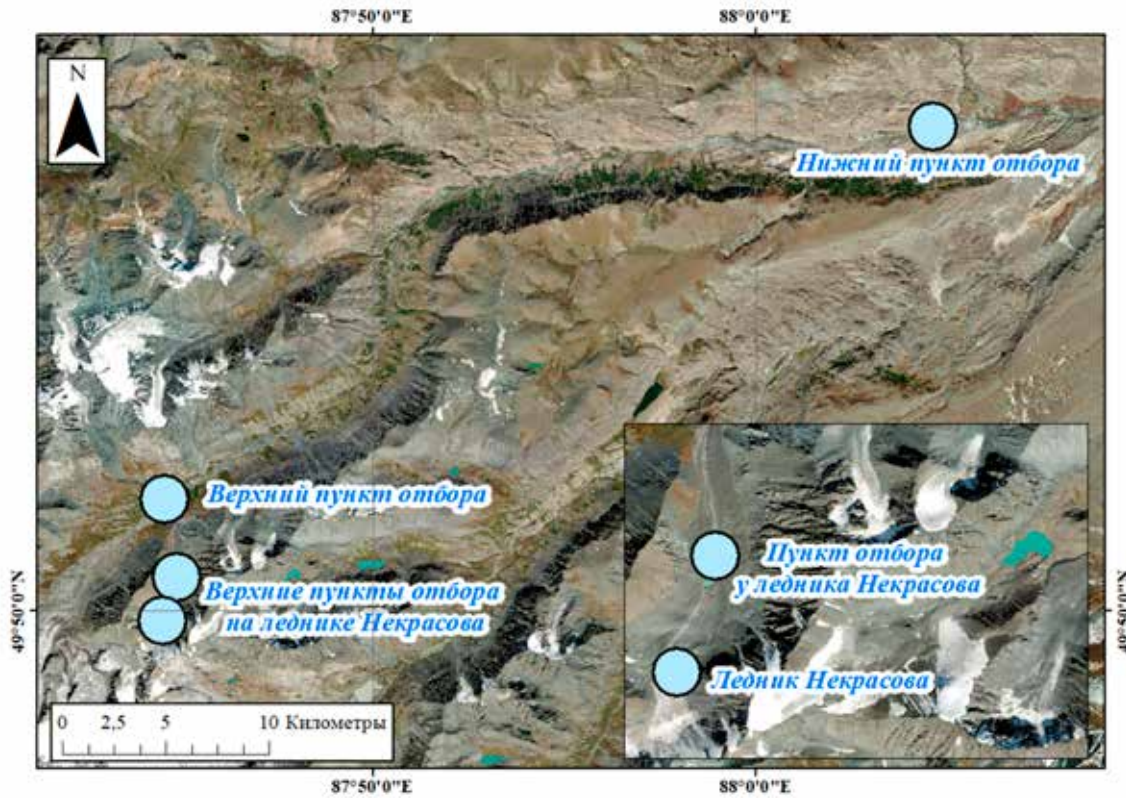


Рис. 2. Расположение пунктов отбора осадков

Таблица 1

Период отбора проб и высота для пунктов проведения экспедиционных исследований

Пункт	Высота, м	Период	Число проб	Сумма осадков, мм
Верхний пункт отбора р. Талдура	2456	08.07.2023 – 04.08.2023	17	33
Нижний пункт отбора р. Талдура	1908	10.07.2023 – 23.07.2023	7	21
Пункт отбора у ледника Некрасова	2770	10.07.2023 – 04.08.2023	8	47
Пункт отбора на леднике Некрасова	2995	16.07.2023 – 04.08.2023	6	45

Чтобы выразить изотопный состав образца относительно VSMOW-2, использовалась формула

$$\delta = \frac{R_{обр} + R_{ст}}{R_{ст}} \cdot 1000, \quad (1)$$

где δ – относительное содержание ($\delta^{18}O$, δ^2H); $R_{обр}$ – абсолютная концентрация ^{18}O и 2H в образце;

$R_{ст}$ – абсолютная концентрация ^{18}O и 2H в стандарте.

По формуле (2) для каждой пробы рассчитывался d-excess для оценки сохранности образца. Близкие к нулю или отри-

цательные значения d-excess показывают влияние испарения на изотопный состав и, следовательно, служат маркером испорченности образца.

$$d\text{-excess} = \delta^2H - 8 \delta^{18}O. \quad (2)$$

Всего для характеристики изотопного состава атмосферных осадков было отобрано 38 проб. Из общего количества в работе рассматриваются 29 проб, поскольку у 9 отрицательный или близкий к 0 d-excess. Как правило, низкие значения d-excess наблюдались в пробах, когда количество осадков было меньше 1–2 мм и такое незначительное количество воды в осадкомере подвер-

галось испарению, что сильно искажало изотопный состав пробы.

Анализ парных изотопных характеристик производился в Лаборатории изменения климата и окружающей среды ААНИИ на газовых анализаторах Picarro L2130-i и Picarro L2140-i. За стандарт бралась дистиллированная водопроводная вода Санкт-Петербурга со следующими характеристиками относительно «V-SMOW2»: $-9,79\%$ по $\delta^{18}\text{O}$ и $-75,47\%$ по δD относительно стандарта МАГАТЭ «V-SMOW2». Точность измерений составляет $0,05\%$ для $\delta^{18}\text{O}$ и $0,5\%$ для $\delta^2\text{H}$.

Для определения условий образования осадков используют глобальную (ГЛМВ) и локальную линию метеорных вод (ЛЛМВ). ГЛМВ представляет собой уравнение, характеризующее взаимоотношения между $\delta^{18}\text{O}$ и $\delta^2\text{H}$ для всех осадков, а ЛЛМВ – для осадков в определенном районе [9].

Уравнение строится на линейной зависимости содержания дейтерия и кислорода-18 и имеет следующий вид:

$$\delta^2\text{H} = 8\delta^{18}\text{O} + 10.$$

Поскольку данных об изотопном составе атмосферных осадков крайне недостаточно, информацию об изменении $\delta^{18}\text{O}$ и $\delta^2\text{H}$ в осадках можно также получить с помощью косвенных методов, одним из которых является интерполирование данных IsoMAP, основанных на метеостанциях сети GNIP (Global Network of Isotopes in Precipitation). Использование связанного с данной сетью онлайн-калькулятора OPIC позволяет определить ежемесячные и годовые значения изотопного состава атмосферных осадков для различных территорий [4–6]. Поэтому с помощью географических координат и высот для каждого пункта были рассчитаны значения $\delta^{18}\text{O}$ и δD за июль.

Для наибольшей точности расчетов в работе использовалось средневзвешенное по количеству осадков значение $\delta^{18}\text{O}$ проб

по каждому пункту отбора, получаемое из следующей формулы:

$$\bar{x} = \frac{\sum x_i \cdot f_i}{\sum f_i},$$

где x_i – значение изотопного состава, f_i – вес пробы.

Результаты исследования и их обсуждение

В табл. 2 представлены средние значения $\delta^{18}\text{O}$ по данным полевых исследований в долине р. Талдура за 2023 г.

Данные $\delta^{18}\text{O}$, полученные по результатам отбора проб осадков, изменяются от $8,3\%$ до $10,4\%$. Средневзвешенный изотопный состав $\delta^{18}\text{O}$ для всех пунктов составляет $9,5\%$. Наиболее изотопно легкими являются осадки нижнего пункта отбора р. Талдура, наиболее изотопно тяжелыми – осадки верхнего пункта отбора р. Талдура.

По результатам изотопного анализа обильнейших летних осадков можно сделать несколько выводов. Во-первых, в летних осадках 2023 г. в долине р. Талдура не выражен высотный эффект изменения изотопного состава осадков: уменьшение значений $\delta^{18}\text{O}$ с увеличением высоты не наблюдается. Отсутствие высотного эффекта можно объяснить выпадением осадков из единого уровня конденсации при отсутствии подъема воздушной массы вверх по долине или склонам. Во-вторых, признаки обратного высотного эффекта (наименьшие значения $\delta^{18}\text{O}$ на нижнем гидрологическом посту), возможно, связаны с различными источниками влаги и турбулентным перемешиванием воздушных масс на орографических барьерах [10].

При том, что средневзвешенный изотопный состав на леднике Некрасова тяжелее, чем на 225 м ниже (пункт отбора у ледника Некрасова), если рассматривать отдельные события осадков на этих двух пунктах отбора (табл. 3), то в некоторые дни высотный эффект наблюдался.

Таблица 2

Средние изотопные характеристики по группам проб

	Диапазон значений $\delta^{18}\text{O}$, ‰	Среднее $\delta^{18}\text{O}$, ‰	Число проб
Верхний пункт отбора р. Талдура	$-6,0 \div -12,8$	$-8,3$	10
Нижний пункт отбора р. Талдура	$-6,7 \div -12,2$	$-10,4$	5
Пункт отбора у ледника Некрасова	$-4,3 \div -13,6$	$-9,8$	8
Пункт отбора на леднике Некрасова	$-5,4 \div -14,1$	$-9,3$	6

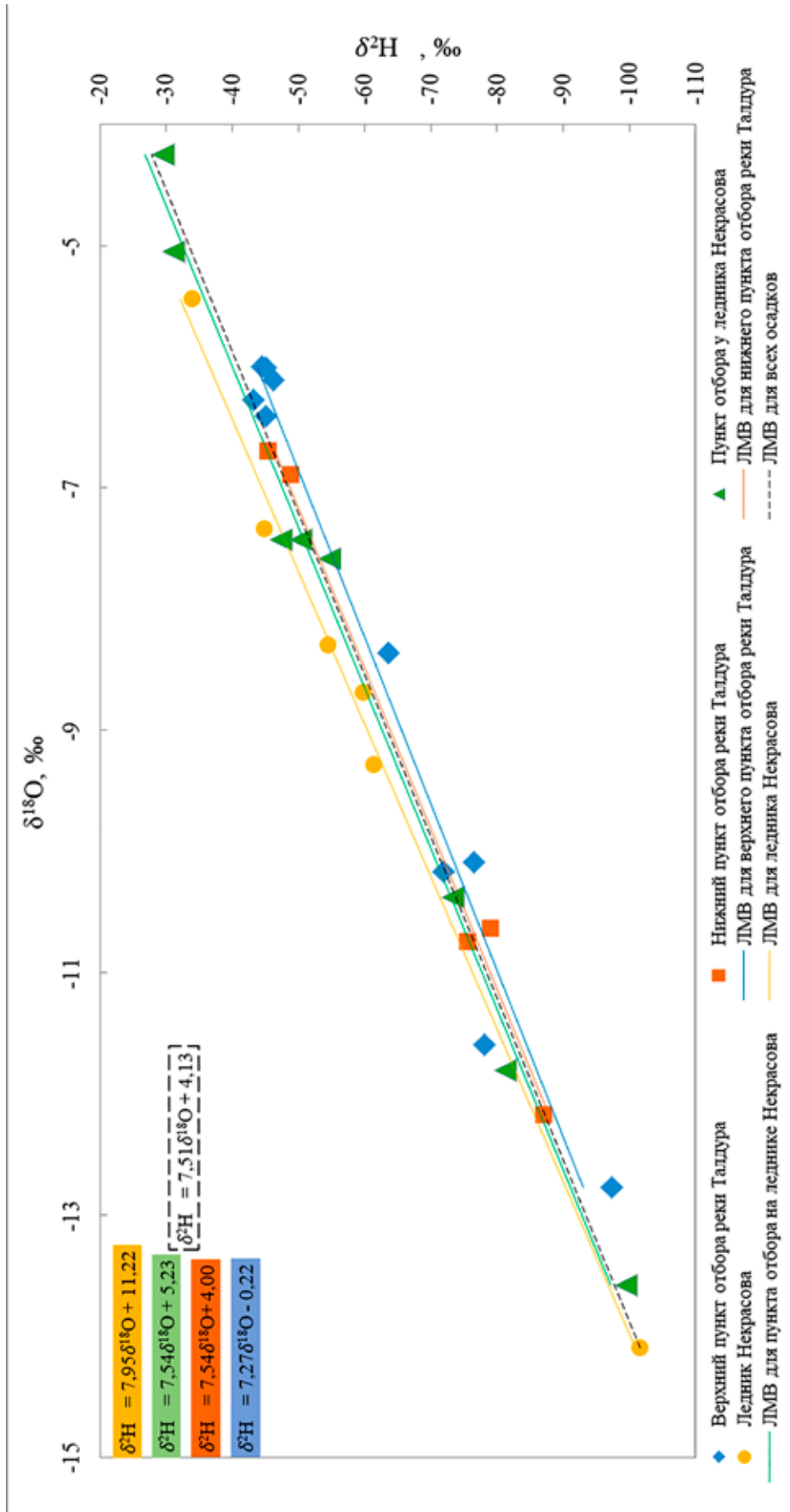


Рис. 3. Зависимость между относительной концентрацией $\delta^{18}\text{O}$ и $\delta^2\text{H}$ в каждом пункте

Таблица 3

$\delta^{18}\text{O}$ общих событий осадков на леднике Некрасова и около его края

Дата отбора пробы	Значение $\delta^{18}\text{O}$ в ‰ в пункте отбора у ледника Некрасова (2770 м)	Дата отбора пробы	Значение $\delta^{18}\text{O}$ в ‰ на леднике Некрасова (2995 м)
16.07.2023	-5,05	16.07.2023	-5,44
22.07.2023	-7,42	23.07.2023	-8,30
29.07.2023	-7,43	29.07.2023	-7,34
29.07.2023	-13,58	30.07.2023	-14,09
03.08.2023	-7,59	04.08.2023	-8,69

Таблица 4

Сопоставление смоделированных и экспедиционных изотопных характеристик

	Координаты	$\delta^{18}\text{O}$ по OIPC, ‰	$\delta^{18}\text{O}$ по экспедиционным данным, ‰	Относительная ошибка, %
Верхний пункт отбора р. Талдура	49°50' с.ш. 87°42' в.д.	-8,8	-8,3	6
Нижний пункт отбора р. Талдура	49°58' с.ш. 88°4' в.д.	-8,3	-10,4	20
Пункт отбора у ледника Некрасова	49°50' с.ш. 87°44' в.д.	-9,2	-9,8	6
Пункт отбора на леднике Некрасова	49°49' с.ш. 87°44' в.д.	-9,6	-9,3	3

Видно, что 16 июля высотный эффект был $-0,17$ ‰/100 м, 22 июля $-0,39$ ‰/100 м, 29 утром высотный эффект не наблюдался, вечером 29 июля $-0,23$ ‰/100 м. Для осадков 3–4 августа наблюдалось самое высокое значение высотного эффекта – $-0,49$ ‰/100 м. В работе [10] указано, что часто значение высотного эффекта для горных территорий составляет в среднем $0,3$ ‰/100 м.

Таким образом, высотный эффект может быть выражен для отдельных событий осадков, но не находит отражения в средне-взвешенном изотопном составе, поскольку наибольшее количество осадков, скорее всего, связано с конденсацией из единой воздушной массы на одном высотном уровне. С использованием полученных экспедиционных данных были построены локальные линии метеорных вод (ЛЛМВ) для всех пунктов отбора проб (рис. 3).

Локальные линии метеорных вод характеризуются угловым коэффициентом меньше 8, что характерно для летних осадков в Центральной Азии [11]. Наибольшую близость к глобальной линии метеорных вод (ГЛМВ) и, следовательно, к равновесным условиям фракционирования имеет уравнение для ледника Некрасова, поскольку там выпадение осадков происходило при минимальной температуре. Низкие значения углового коэффициента в верхнем пункте р.

Талдура свидетельствуют о вкладе испарительного фракционирования в формирование изотопного состава осадков [12].

Локальная линия метеорных вод для всех осадков описывается следующим уравнением: $\delta D = 7,51 \delta^{18}\text{O} + 4,13$.

Также в рамках исследования полученные полевые результаты были сравнены со смоделированными значениями онлайн-калькулятора OIPC (The Online Isotopesin Precipitation Calculator), который позволяет по введенным широте, долготе и высоте места определить изотопный состав осадков.

Входные параметры, результаты и относительная ошибка при сравнении рассчитанных и наблюдаемых значений представлены в табл. 4.

Смоделированное значение изотопного состава атмосферных осадков для средней высоты бассейна р. Талдура составляет $9,3$ ‰. Относительная ошибка между смоделированными данными в системе OIPC и полученными экспедиционными показала следующее: относительная ошибка варьируется от 3 до 20 %, в среднем составляя 5%. Исходя из этого, модельные данные об изотопном составе осадков для данного района можно использовать для дальнейших работ. Минимальная ошибка приходится на ледник Некрасова, максимальная – в нижнем пункте отбора реки Талдура.

Заключение

По результатам исследования получены парные изотопные характеристики для осадков в долине р. Талдура, отобранных в рамках полевой экспедиции 2023 г. Было выявлено, что для средневзвешенных значений высотный эффект не наблюдается: с увеличением высоты уменьшение значений $\delta^{18}\text{O}$ не происходит. Такая ситуация может быть связана с выпадением осадков из единого уровня конденсации при отсутствии подъема воздушной массы вверх по долине или склонам. Также можно заметить признаки обратного высотного эффекта (наименьшие значения $\delta^{18}\text{O}$ на нижнем гидрологическом посту), что, возможно, связано с различными источниками влаги и турбулентным перемешиванием воздушных масс на орographic барьерах. При этом для отдельных проб осадков, находящихся в одной долине (пробы в районе ледника Некрасова), высотный эффект проявляется и составляет от $-0,17$ до $-0,49$ ‰/100 м.

По полученным значениям изотопного состава была построена ЛЛМВ летних осадков 2023 г.: $\delta^2\text{H} = 7,51$ $\delta^{18}\text{O} + 4,13$. Результаты согласуются с известными ранее данными по Алтаю [9]. Измеренный средний изотопный состав осадков ($\delta^{18}\text{O} = -9,5$ ‰) близок к смоделированному по онлайн-калькулятору OIPС ($\delta^{18}\text{O} = -9,0$ ‰), что говорит о том, что модельные данные хорошо отражают изотопный состав летних осадков на территории Центрального Алтая и могут быть использованы в последующих исследованиях.

Список литературы

1. Папина Т.С., Малыгина Н.С., Бляхарчук Т.А., Ненашева Г.И., Рябчинская Н.А., Эйрих А.Н. Изотопный состав

и палиноспектры атмосферных осадков и краевых частей ледника Корумду (Северо-Чуйский хребет, Горный Алтай) // Лед и снег. 2015. Т. 55, № 1. С. 40–48.

2. Малыгина Н.С., Эйрих А.Н., Курепина Н.Ю., Папина Т.С. Изотопный состав зимних атмосферных осадков и снежного покрова в предгорьях Алтая // Лед и снег. 2017. Т. 57, № 1. С. 57–68.

3. Малыгина Н.С., Эйрих А.Н., Курепина Н.Ю., Папина Т.С. Изотопный состав атмосферных осадков в предгорьях Алтая: данные наблюдений и интерполяции // Известия ТПУ. 2019. Т. 330, № 2. С. 44–54.

4. Bowen G.J. (Year). The Online Isotopes in Precipitation Calculator, version X.X. [Электронный ресурс]. URL: <http://www.waterisotopes.org> (дата обращения: 11.10.2023).

5. IAEA/WMO (2015). Global Network of Isotopes in Precipitation. The GNIP Database. Accessible at. [Электронный ресурс]. URL: <https://nucleus.iaea.org/wiser> (дата обращения: 06.10.2023).

6. Bowen G.J., Wassenaar L.I., Hobson K.A. Global application of stable hydrogen and oxygen isotopes to wildlife forensics // Oecologia. 2005. Vol. 143. P. 337–348.

7. Дьякова Г.С., Останин О.В. Гляциально-мерзлотные каменные образования Алтая: Южно-Чуйский хребет // География и природопользование Сибири. 2015. № 19. С. 56–62.

8. Ресурсы поверхностный вод СССР. Т. 15. Алтай и Западная Сибирь. Вып. 1. Верхний Иртыш и Горный Алтай. Ч. 1. Л.: Гидрометеорологическое издательство, 1969. 316 с.

9. Банцев Д.В., Ганюшкин Д.А., Чистяков К.В., Екайкин А.А., Токарев И.В., Волков И.В. Особенности формирования ледникового стока на северном макросклоне массива Табын-Богдо-Ола по изотопным данным // Лед и снег. 2018. Т. 58, № 3. С. 333–342.

10. Васильчук Ю.К., Чиждова Ю.Н. Высотный градиент распределения $\delta^{18}\text{O}$ и δD в атмосферных осадках и в снежном покрове высокогорных районов // Криосфера Земли. 2010. Т. 14, № 1. С. 13–21.

11. Saidalieva Z., Shahgedanova M., Yapiiev V., Wade A., Akbarov F., Ezenaman M., Kapitsa V., Kassatkin N., Kayumova D., Rakhimov I., Satylkanov R., Sayakbaev D., Severskiy I., Petrov M., Usabaliev R., Umirzakov G. Isotopic composition as a tracer of different source contributions to stream flow in the glacierized catchments of Central Asia // Abstracts EGU General Assembly, 24–28 Apr 2023, Vienna, Austria. EGU23-10181, 2023. DOI: 10.5194/egusphere-egu23-10181.

12. Папина Т.С., Малыгина Н.С., Эйрих А.Н., Галанин А.А., Железняк М.Н. Изотопный состав и источники атмосферных осадков в Центральной Якутии // Криосфера Земли. 2017. Т. 21, № 2. С. 60–70.