

УДК 551.577.13:546.21(470.311)

Вариации изотопного состава кислорода и водорода в атмосферных осадках в г. Томске (2016–2020 гг.)

Г.В. Симонова¹✉, Д.А. Калашникова¹, А.Н. Маркелова¹,
А.С. Бондаренко^{1,2}, А.Е. Давыдкина^{1,2*}

¹Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН
634055, г. Томск, пр. Академический, 10/3

²Национальный исследовательский Томский политехнический университет
634050, г. Томск, пр. Ленина, 30

Поступила в редакцию 6.04.2023 г.;

после доработки 17.05.2023 г.;

принята к печати 24.05.2023 г.

Исследованы вариации изотопного состава кислорода ($\delta^{18}\text{O}$) и водорода (δD) в атмосферных осадках, выпавших в г. Томске с 2016 по 2020 г. Установлено, что значения $\delta^{18}\text{O}$ менялись в диапазоне от $-39,6$ до $+2,1\%$ и в среднем за весь период составили $-18 \pm 6,8\%$; δD изменялись в диапазоне от -299 до $-4,9\%$ и в среднем составили $-118,7 \pm 54,7\%$. Построена локальная линия метеорных вод с 2016 по 2020 г., описываемая уравнением $\delta\text{D} = 7,43\delta^{18}\text{O} + 11,2$, что указывает на преобладание испарительного фракционирования. Впервые установлена температурная зависимость изотопного состава атмосферных осадков в г. Томске: $+0,47\%/^{\circ}\text{C}$ для $\delta^{18}\text{O}$ и $+3,62\%/^{\circ}\text{C}$ для δD . На основе анализа обратных траекторий движения воздушных масс выявлены преобладающие регионы-источники, приносящие в г. Томск атмосферные осадки с разным изотопным составом.

Ключевые слова: атмосферные осадки, стабильные изотопы водорода и кислорода, δD , $\delta^{18}\text{O}$; precipitation, hydrogen and oxygen stable isotopes, δD , $\delta^{18}\text{O}$.

Введение

В связи с усилением экстремальных погодных, климатических, водных и других экологических рисков в ближайшем будущем спрос на информацию о погоде и прогнозах климата будет расти. В последние годы в качестве надежных маркеров современных и прошлых климатических и гидрологических изменений используются соотношения стабильных изотопов кислорода и водорода в атмосферных осадках (метеорных водах), полученных на станциях сети Global Network of Isotopes in Precipitation (GNIP). Повышенная потребность в данных GNIP обусловлена тесной связью изотопного состава метеорных вод с условиями образования осадков, т.е. с температурой образования, происхождением воздушных масс, а также механизмом выпадения осадков. Для конкретного региона вариации значений изотопного состава кислорода и водорода специфичны и характеризуются локальной линией метеорных вод (ЛЛМВ). По отклонению ЛЛМВ от глобальной линии метеорных вод (ГЛМВ),

описываемой уравнением $\delta\text{D} = 8\delta^{18}\text{O} + 10$ [1], можно отследить процессы изотопного фракционирования.

Для территории России данные по соотношению стабильных изотопов кислорода и водорода в атмосферных осадках ограничены не только в пространстве, но и по времени. Пробы атмосферных осадков по методике GNIP в азиатской части России отбирали в Якутске (с 1969 по 2000 г. проанализировано 54 пробы), Иркутске (с 1969 по 1990 г. — 14 проб), Петропавловске-Камчатском (с 1969 по 1990 г. — 42 пробы) и Новосибирске (с 1969 по 1990 г. проанализировано лишь 12 проб) [2]. Для отдельных регионов Сибири проведены исследования как российскими, так и зарубежными учеными. Например, в исследовании изотопии атмосферных осадков [3] были задействованы 29 станций GNIP, расположенных в средних и высоких широтах Евразии. В работе [4] представлены изотопные характеристики атмосферных осадков, собранных в Иркутске и Байкальском регионе с июня 2011 г. по апрель 2017 г. Изотопия ледников Алтая описана в [5]. В результате совместного анализа синоптических, траекторных и изотопных данных определены основные регионы — источники поступления атмосферной влаги, выпавшей в виде осадков в Надымской низменности [6]. Под руководством Ю.К. Васильчука проведены исследования изотопного состава снежников и ледников полярного Урала [7], установлена связь между средней годовой температурой

* Галина Владимировна Симонова (galina_simonova@inbox.ru), Дарья Андреевна Калашникова (terrezapr@mail.ru), Анна Николаевна Маркелова (maranna.levoka@yandex.ru), Анна Сергеевна Бондаренко (bonann4@yandex.ru), Анна Евгеньевна Давыдкина (meartelbeck@mail.ru).

воздуха и значениями $\delta^{18}\text{O}$ атмосферных осадков для севера России. В работе [8] на основе анализа обратных траекторий движения воздушных масс (модель HYSPLIT) и изотопного состава осадков определено семь регионов-источников атмосферной влаги, выпавшей в Центральной Якутии. Однако на равнинной территории центральной и южной частей Западной Сибири подобные исследования не проводились.

Цель настоящей работы — изучить вариации изотопного состава атмосферных осадков в г. Томске в 2016–2020 гг., оценить их связь с вариациями метеорологических параметров в месте выпадения, сравнить полученные данные с данными интерполяции на основе ранее полученных результатов по сети GNIP для сопредельных территорий, используя обратные траектории движения воздушных масс, определить преобладающие регионы-источники атмосферной влаги, выпавшей в анализируемый период.

Материалы и методы

Пробы атмосферных осадков и временные ряды метеорологических данных (температура и влажность воздуха, количество осадков) предоставлены Геофизической обсерваторией ИМКЭС СО РАН (56,4756354° с.ш., 85,0547361° в.д., высота 160 м н.у.м.). Пробы атмосферных осадков отбирались в соответствии с ГОСТ 17.1.5.05-85 [9]. Определение изотопного состава водорода и кислорода атмосферных осадков проведено в ИМКЭС СО РАН методом масс-спектрометрии изотопного уравнивания [10] с использованием изотопного масс-спектрометра DELTA V Advantage (Thermo Fisher Scientific, Германия) и системы GasBench II (приборы предоставлены центром коллективного пользования ТомЦКП СО РАН). Для измерения величины δD вода подвергалась изотопному обмену с водородом в присутствии платинового катализатора.

Изотопный состав (δ^X) выражен в тысячных долях отклонения от стандарта согласно уравнению

$$\delta^X = \left[\frac{R_{\text{sample}} - R_{\text{standard}}}{R_{\text{standard}}} \right] \times 1000 \text{‰} \quad (1)$$

где X — это изотопы $^2\text{H}(\text{D})$ и ^{18}O ; R_{sample} и R_{standard} — отношение тяжелого изотопа к легкому в исследуемом образце и в стандарте соответственно.

Значения δ рассчитываются по принятому международному стандартному образцу среднеокеанической воды — VSMOW (Vienna Standard Mean Ocean Water, МАГАТЭ, Австрия). Изотопный состав кислорода и водорода осадков определяли по калибровочным графикам, полученным по международным стандартным образцам VSMOW ($\delta^{18}\text{O} = 0 \pm 0,02\text{‰}$, $\delta\text{D} = 0 \pm 0,3\text{‰}$), SLAP ($\delta^{18}\text{O} = -55,50 \pm 0,02\text{‰}$, $\delta\text{D} = -427,5 \pm 0,3\text{‰}$) и GRESP ($\delta^{18}\text{O} = -33,40 \pm 0,04\text{‰}$, $\delta\text{D} = -258,0 \pm 0,4\text{‰}$). Погрешность определения $\delta^{18}\text{O}$ и δD составила $\pm 0,4$ и $\pm 1\text{‰}$.

Полученные результаты сравнивали с интерполированными данными GNIP, представленными на портале IsoMAP (Isoscapes Modeling, Analysis and Prediction) [11], рассчитанными онлайн-калькулятором, позволяющим с помощью ввода географических координат вычислять средние значения изотопного состава осадков по месяцам для различных территорий.

С помощью модели HYSPLIT (Hybrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory) [12, 13] для каждого отдельного случая выпадения осадков рассчитывались обратные траектории движения воздушных масс. Начало построения траекторий соответствовало моменту начала выпадения осадков. Рассчитанные траектории охватывали временной интервал до 120 ч. В северной части евразийского континента доминирующим источником атмосферной влаги, выпадающей в виде осадков, принято считать акваторию Атлантического океана [14], поэтому обратные траектории рассчитывали так, чтобы можно было учесть влияние этого источника. Траектории определяли для высот, соответствующих нижней границе облачности.

Региональные климатические условия

Томск расположен на южной границе Западно-Сибирской равнины и отрогов Кузнецкого Алатау на правом берегу р. Томи (56,488611° с.ш., 84,952222° в.д.). Климат на данной территории является переходным от умеренно-континентального Русской равнины к резко-континентальному Восточной Сибири [15]. Среднегодовая температура составляет $+1,2^\circ\text{C}$, минимальная среднемесячная температура ($-17,5^\circ\text{C}$) наблюдается в январе, максимальная ($+18,8^\circ\text{C}$) — в июле [16]. Годовое количество осадков — 584 мм, их распределение в течение года неравномерное. Более половины от годового количества осадков выпадает в летний и осенний периоды: 200 и 160 мм соответственно. Суммы осадков зимнего и весеннего периодов в среднем 112 и 113 мм.

Результаты и обсуждение

1. Изотопный анализ

Данные по стабильным изотопам кислорода и водорода для всех отдельных случаев выпадения осадков, отобранных с 2016 по 2020 г. в Томске, представлены на рис. 1 и сведены в табл. 1.

Вариации $\delta^{18}\text{O}$ и δD выявили отчетливые сезонные колебания: относительно высокие средние значения величин $\delta^{18}\text{O}$ (до $-14,4 \pm 3,6\text{‰}$) и δD (до $-87,1 \pm 27,8\text{‰}$) характеризуют летние осадки, а более низкие средние значения изотопного состава ($-22,1 \pm 4,9\text{‰}$ для $\delta^{18}\text{O}$ и $-157,1 \pm 36,7\text{‰}$ для δD) характерны для зимних осадков; $\delta^{18}\text{O}$ варьируется от $-39,6$ до $+2,1\text{‰}$ по сравнению со стандартом VSMOW, хотя большая часть значений ($\approx 93\%$) соответствует более ограниченному диапазону, от $-28,4$ до $-2,7\text{‰}$ (рис. 2, а). Среднее арифметическое

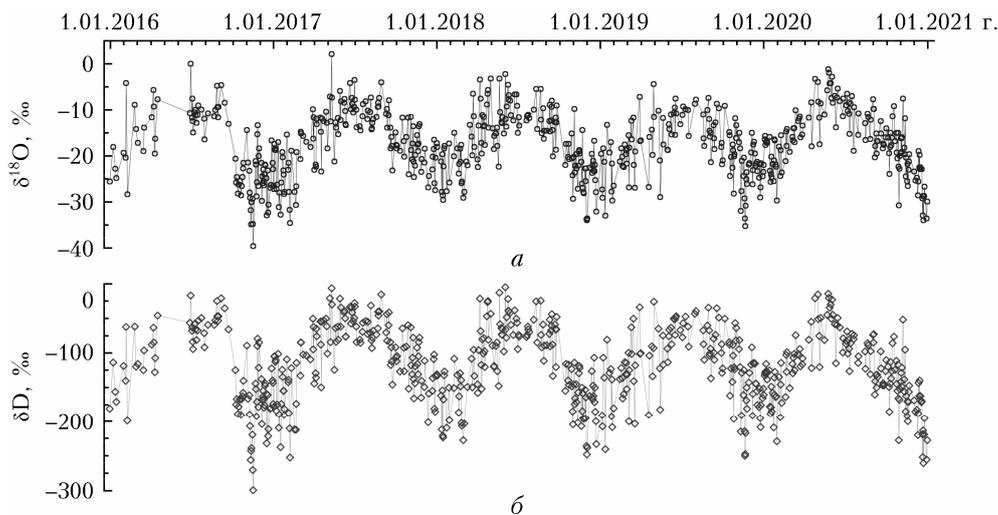


Рис. 1. Вариации $\delta^{18}\text{O}$ (а) и δD (б) в Томске с 2016 по 2020 г.

значение $\delta^{18}\text{O}$ составило $-18 \pm 6,8\text{‰}$. Содержание дейтерия (δD) варьируется от -299 до $-4,9\text{‰}$ по сравнению с VSMOW, но $\approx 95\%$ значений соответствуют интервалу от $-208,7$ до $-16,2\text{‰}$ (рис. 2, б). Среднее арифметическое значение δD составило $-118,7 \pm 54,7\text{‰}$.

Таблица 1

Изоотопный состав атмосферных осадков г. Томска, ‰

Год	Параметр	Минимум	Максимум	Среднее значение	Стандартное отклонение
2016	$\delta^{18}\text{O}$	-39,6	+0,03	-19,4	8,3
	δD	-299,0	-16,7	-130,4	62,5
2017	$\delta^{18}\text{O}$	-34,9	+2,1	-16,5	6,8
	δD	-252,4	-6,1	-102,2	50,9
2018	$\delta^{18}\text{O}$	-33,9	-2,2	-17,0	7,1
	δD	-248,0	-4,9	-107,9	55,5
2019	$\delta^{18}\text{O}$	-35,2	-4,4	-18,6	6,3
	δD	-258,0	-25,6	-119,5	51,3
2020	$\delta^{18}\text{O}$	-34,0	-1,2	-16,7	6,8
	δD	-260,9	-14,2	-128,3	50,7

На основе измеренных изотопных данных были рассчитаны средневзвешенные месячные значения δD

и $\delta^{18}\text{O}$ по формуле [4], учитывающей количество осадков, выпавших в каждом отдельном случае:

$$\delta_{\text{ср.вз}} = \sum (P_i \times \delta_i) / \sum P_i, \quad (2)$$

где P_i – количество осадков, выпавших в каждом отдельном случае, мм; δ_i – изотопный состав осадков, выпавших в каждом отдельном случае, ‰.

В табл. 2 представлены средние за 5 лет средневзвешенные значения изотопного состава месячных осадков и интерполированные данные GNIP.

Прослеживается четкое соответствие между нашими измеренными средними за 5 лет средневзвешенными значениями δD и $\delta^{18}\text{O}$ месячных осадков и значениями, смоделированными с помощью онлайн-калькулятора для января, мая и октября; для $\delta^{18}\text{O}$ соответствие также прослеживается для февраля, апреля и июня. В остальные месяцы нет точного соответствия, особенно в летний период, что может быть связано со вторичным влагообеспечением. Вероятно, модель не учитывает процессы локального масштаба, такие как вторичные эффекты испарения и/или сезонные сдвиги в траекториях движения

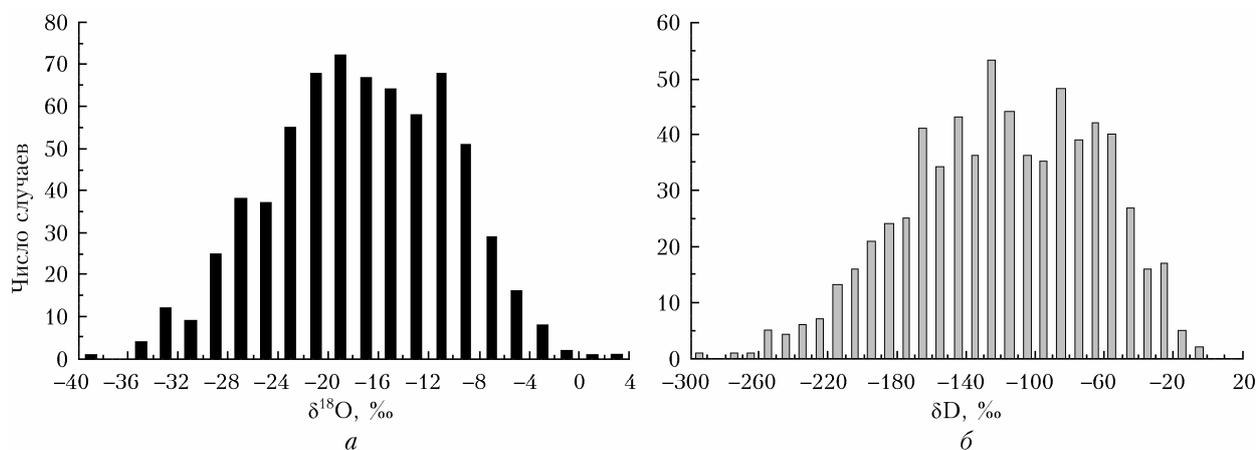


Рис. 2. Частотное распределение значений $\delta^{18}\text{O}$ (а) и δD (б) в атмосферных осадках в г. Томске (2016–2020 гг.); количество образцов – 680

воздушных масс. Для оценки процессов изотопного фракционирования построены ЛЛМВ для 2016–2020 гг. (рис. 3) и сезонные ЛЛМВ (рис. 4), позво-

ляющие оценить процессы изотопного фракционирования по отклонению величин $\delta^{18}\text{O}$, δD от ГЛМВ – $\delta\text{D} = 8\delta^{18}\text{O} + 10$ [1]. Рассчитанная ЛЛМВ

Таблица 2

Средние за 5 лет (2016–2020 гг.) средневзвешенные значения δD и $\delta^{18}\text{O}$ месячных осадков для г. Томска и интерполированные средние значения изотопного состава осадков по месяцам по GNIP

Месяц	Измеренные данные		Интерполированные данные GNIP	
	δD , ‰	$\delta^{18}\text{O}$, ‰	δD , ‰	$\delta^{18}\text{O}$, ‰
Январь	$-157,3 \pm 22,2$	$-23,1 \pm 2,2$	-159	-21,5
Февраль	$-144,9 \pm 14,2$	$-19,9 \pm 2,9$	-166	-22,1
Март	$-103,4 \pm 25,5$	$-15,1 \pm 5,2$	-167	-21,4
Апрель	$-82,9 \pm 13,1$	$-13,7 \pm 1,8$	-97	-12,9
Май	$-76,0 \pm 24,1$	$-13,1 \pm 4,5$	-76	-9,5
Июнь	$-57,7 \pm 10,2$	$-9,5 \pm 1,9$	-72	-10,0
Июль	$-73,2 \pm 16,2$	$-12,0 \pm 1,4$	-66	-8,3
Август	$-67,7 \pm 21,8$	$-11,1 \pm 2,0$	-74	-9,6
Сентябрь	$-87,9 \pm 28,9$	$-14,2 \pm 5,7$	-65	-8,0
Октябрь	$-128,0 \pm 23,0$	$-18,2 \pm 0,6$	-128	-18,1
Ноябрь	$-144,7 \pm 20,5$	$-20,9 \pm 1,9$	-174	-24,2
Декабрь	$-164,5 \pm 22,1$	$-23,7 \pm 1,9$	-208	-28,5

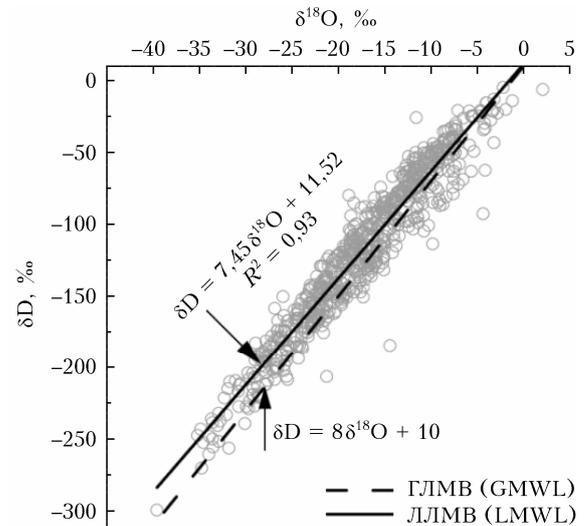


Рис. 3. Глобальная и локальная линии метеорных вод, полученные на основе местных изотопных данных осадков

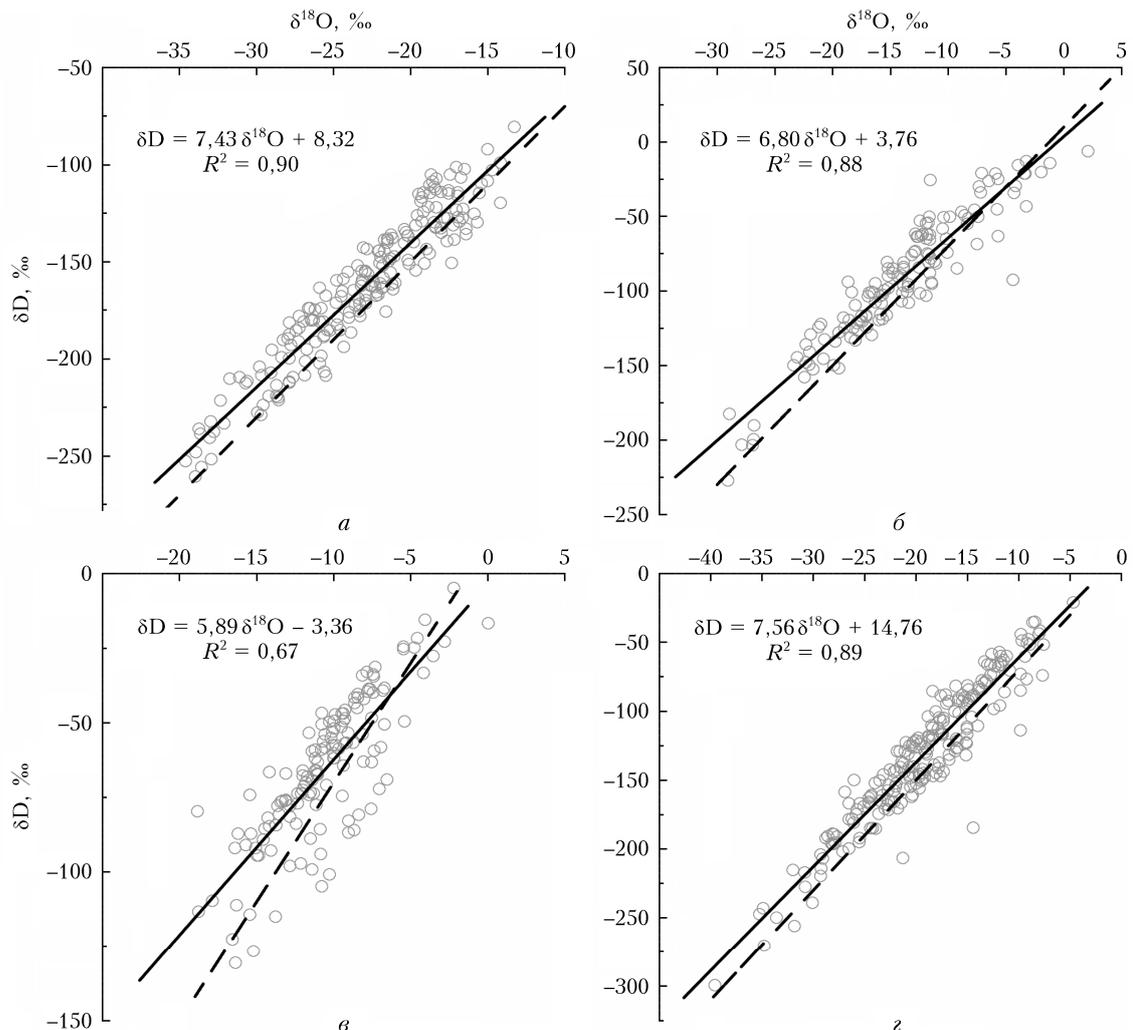


Рис. 4. Сезонные ЛЛМВ (сплошная линия) и ГЛМВ (штрихпунктирная линия) г. Томска для 2016–2020 гг.: а – зима; б – весна; в – лето; г – осень

для 2016–2020 гг. описывается уравнением $\delta D = 7,45\delta^{18}O + 11,52$ ($R^2 = 0,93$). Полученное значение коэффициента наклона ЛЛМВ (7,45) меньше значения для ГЛМВ, равного 8, что позволяет говорить о влиянии испарительного эффекта на фракционирование изотопного состава атмосферных осадков. Исследование изотопии атмосферных осадков в предгорьях Алтая определило ЛЛМВ следующим уравнением: $\delta D = 7,11\delta^{18}O - 10,1$ [2]. Наличие более существенного испарительного эффекта атмосферных осадков в Томске, как и следовало ожидать, выявлено в летний сезон ($\delta D = 5,89\delta^{18}O - 3,36$ ($R^2 = 0,67$)).

Летние дожди обогащены тяжелыми изотопами, характеризующими интенсивное испарение дождевых капель в нагретой летней атмосфере и вторичные процессы фракционирования (например, рециркуляция испаренной влаги). Зимой влияние криогенного фракционирования на формирование изотопного состава атмосферных осадков не выявлено, так как случаи выпадения атмосферных осадков происходили во время периодов со средней температурой воздуха $-10,7^\circ\text{C}$, что теплее, чем средняя температура за анализируемый зимний период. Кроме того, коэффициент наклона ЛЛМВ для зимы оказалось меньше, чем для осени.

2. Влияние климатических параметров на содержание изотопов

Еще в 1964 г. В. Дансгором [1] была определена глобальная зависимость между среднегодовой температурой воздуха и изотопным составом атмосферных осадков по данным гидрометеорологических станций, расположенных как в полярных широтах, так и в тропических районах. В работе [17] отмечено, что наиболее тесная корреляция между температурой воздуха и изотопным составом осадков наблюдается в высоких широтах в холодный период года. В табл. 3 представлена корреляционная зависимость между значениями изотопного состава атмосферных осадков г. Томска и климатическими параметрами (температурой, количеством осадков и влажностью воздуха).

Сопоставление изотопного состава кислорода и водорода атмосферных осадков с температурой воздуха показало достоверно положительные корреляции в период, когда наблюдается умеренный режим выпадения атмосферных осадков, что совпадает с так называемым «температурным эффектом» [18]. Корреляция между $\delta^{18}O$ и температурой воздуха весной и осенью была более значительной, чем зимой и летом, что демонстрирует преобладание «температурного воздействия» весной и осенью. Более слабые корреляции между $\delta^{18}O$, δD и температурой воздуха были зафиксированы летом, что можно объяснить сильным испарением поверхностных вод, а также испарением почвенной влаги (более 80%), которая образуется за счет таяния снега

в Сибири [19]. Близкие к нулю и отрицательные температурные корреляции проявились в периоды выпадения интенсивных осадков. Это объясняется тем, что к концу дождя с увеличением влажности воздуха осадки сильно обеднены тяжелыми изотопами.

Таблица 3
Коэффициенты корреляции между $\delta^{18}O$, δD и климатическими параметрами

Параметр	Коэффициент корреляции				
	Зима	Весна	Лето	Осень	2016–2020 гг.
$\delta^{18}O/\delta D$	0,95	0,94	0,81	0,94	0,96
<i>Температура, °C</i>					
$\delta^{18}O$	0,60	0,69	0,43	0,78	0,81
δD	0,60	0,70	0,27	0,75	0,81
<i>Количество осадков, мм</i>					
$\delta^{18}O$	-0,07	0,14	-0,18	0,05	0,15
δD	-0,05	0,17	-0,04	0,05	0,18
<i>Влажность воздуха, ‰</i>					
$\delta^{18}O$	0,31	-0,23	-0,48	-0,8	-0,37
δD	0,32	-0,24	-0,36	-0,6	-0,36
<i>n</i>	199	133	137	211	680

Примечание. Полужирным выделены статистически значимые коэффициенты корреляции с доверительной вероятностью 95%; *n* – количество образцов.

Установлена температурная зависимость изотопного состава по сезонам (табл. 4) и для всего периода наблюдений с января 2016 г. по декабрь 2020 г. (табл. 4, рис. 5).

Таблица 4
Изменения изотопного состава атмосферных осадков во время выпадения осадков, ‰ на 1°C

Параметр	Зима	Весна	Лето	Осень	2016–2020 гг.
$\delta^{18}O$	+0,49	+0,59	+0,38	+0,51	+0,47
δD	+3,81	+4,36	+1,60	+3,92	+3,62

Нами были получены локальные уравнения связи изотопного состава выпадающих осадков с температурой воздуха для г. Томска. Все значения $\delta^{18}O$ и δD для случаев выпадения осадков с 2016 по 2020 г. находятся в некоторой области изотопно-температурных диаграмм (рис. 5), которые могут быть описаны линейными уравнениями $\delta^{18}O = 0,47T - 17,96\text{‰}$ и $\delta D = 3,62T - 122,54\text{‰}$. Можно заключить, что температурный эффект проявляется в изменении $\delta^{18}O$ и δD на 0,47 и 3,62‰ на 1°C (рис. 5). При исследовании изотопии атмосферных осадков для Иркутского и Байкальского регионов (юго-восток Сибири) температурный эффект составил +0,5‰ на 1°C для $\delta^{18}O$ и +3,8‰ на 1°C для δD [4].

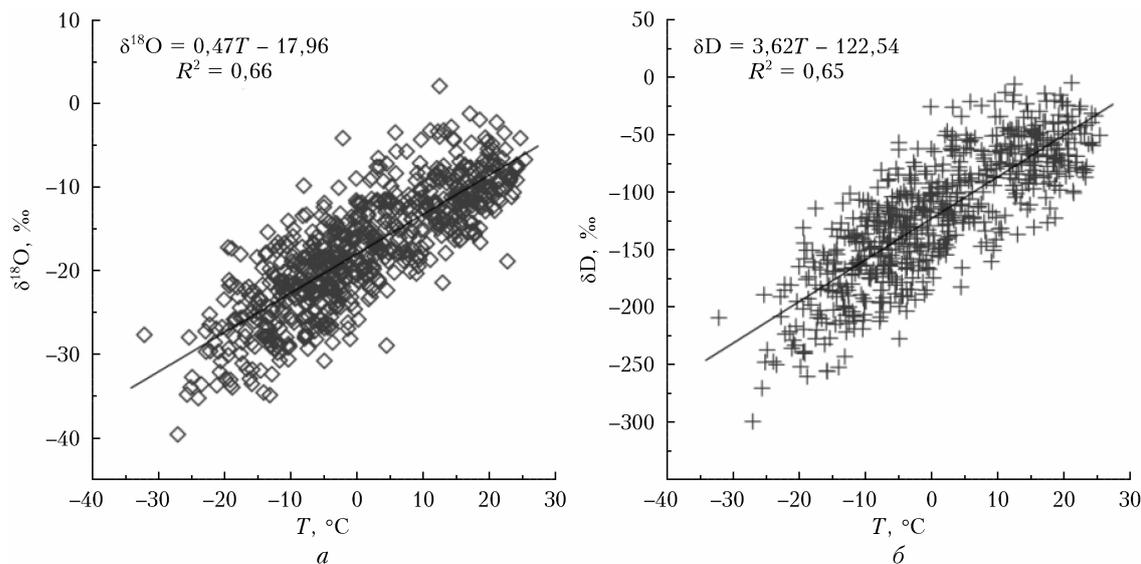


Рис. 5. Связь $\delta^{18}\text{O}$ (а) и δD (б) с температурой воздуха с января 2016 г. по декабрь 2022 г.

Связь изотопного состава с влажностью воздуха и количеством осадков оказалась слабой, но статистически значимой (см. табл. 3).

3. Траекторный анализ

Вариации значений изотопного состава атмосферных осадков могут быть связаны не только с температурой воздуха и количеством осадков, но и с географическим положением источника влаги, который можно определить с помощью модели атмосферного переноса HYSPLIT [6]. Регионы-источники и изотопные показатели, характерные для осадков, поступивших из регионов, представлены в табл. 5.

На основе траекторного анализа определены основные регионы-источники атмосферной влаги, выпавшей в виде осадков в 2016–2020 гг.: регион I (34,3%) – Атлантический океан; регион II (37,1%) – Черноморско-Каспийско-Казахстанский регион; регион III (22,6%) – северная часть Атлантического океана и Северный Ледовитый океан.

Наименьший вклад в общее количество поступивших осадков внесли внутриконтинентальные регионы-источники: южное направление (2,2%), характеризующееся переносом воздушных масс с Алтая и Монголии; восточное направление (2,4%); местная циркуляция воздушных масс (1,5%). Зимой и осенью преобладающий вклад в общее количество поступивших осадков внес регион II, весной –

Таблица 5

Показатели атмосферной влаги, выпавшей в виде осадков за 2016–2022 гг. в г. Томске, для основных регионов-источников

Регион-источник	<i>n</i>	$\delta^{18}\text{O}_{\text{cp}}$	$\delta^{18}\text{O}_{\text{max}}$	$\delta^{18}\text{O}_{\text{min}}$	$\delta\text{D}_{\text{cp}}$	$\delta\text{D}_{\text{max}}$	$\delta\text{D}_{\text{min}}$
<i>Зима</i>							
I	57 (28,8%)	$-22,8 \pm 4,5$	-14,2	-32,4	$-165,6 \pm 32,5$	-108,3	-233,1
II	98 (49,5%)	$-22,3 \pm 4,6$	-13,3	-34,6	$-156,1 \pm 36,4$	-80,7	-255,7
III	35 (17,7%)	$-25,6 \pm 5,4$	-16,7	-34,0	$-183,1 \pm 42,1$	-106,7	-260,4
<i>Весна</i>							
I	78 (58,6%)	$-13,9 \pm 5,5$	-1,2	-27,9	$-90,3 \pm 39,6$	-13,1	-203,2
II	38 (28,6%)	$-12,7 \pm 5,8$	+2,1	-22,3	$-85,4 \pm 39,2$	-6,1	-152,6
III	13 (9,8%)	$-18,3 \pm 6,6$	-10,2	-28,9	$-116,3 \pm 54,8$	-25,6	-203,4
<i>Лето</i>							
I	33 (23,7%)	$-10,4 \pm 3,5$	-2,2	-18,8	$-62,4 \pm 25,1$	-4,9	-113,4
II	49 (35,3%)	$-9,2 \pm 3,1$	0,0	-15,4	$-57,1 \pm 21,7$	-16,7	-99,2
III	52 (37,4%)	$-11,7 \pm 3,2$	-2,8	-18,9	$-73,5 \pm 23,5$	-15,5	-130,7
<i>Осень</i>							
I	65 (30,9%)	$-19,0 \pm 5,7$	-7,7	-34,9	$-132,5 \pm 43,9$	-50,5	-256,1
II	67 (31,9%)	$-17,9 \pm 5,9$	-7,6	-33,6	$-117,2 \pm 48,9$	-35,3	-250,0
III	54 (25,8%)	$-19,9 \pm 5,8$	-4,7	-32,0	$-139,3 \pm 44,1$	-20,8	-215,1
<i>2016–2020 гг.</i>							
I	233 (34,3%)	$-16,5 \pm 5,4$	-1,2	-34,9	$-112,7 \pm 45,5$	-4,9	-256,1
II	252 (37,1%)	$-15,5 \pm 5,7$	+2,1	-34,6	$-103,9 \pm 42,5$	-6,1	-255,7
III	154 (22,6%)	$-18,9 \pm 5,7$	-2,8	-34,0	$-128,1 \pm 45,7$	-15,5	-260,4

регион I, летом – регион III. Наиболее высокие средние значения изотопного состава характерны для осадков Черноморско-Каспийско-Казахстанского региона ($\delta^{18}\text{O} = -15,5\text{‰}$; $\delta\text{D} = -103,9\text{‰}$), а наиболее низкие – для осадков, поступивших с северной части Атлантического и Северного Ледовитого океанов ($\delta^{18}\text{O} = -18,9\text{‰}$; $\delta\text{D} = -128,1\text{‰}$).

Заключение

Результаты исследования изотопного состава осадков выявили отчетливые сезонные колебания: относительно высокие средние значения $\delta^{18}\text{O}$ ($-14,4 \pm 3,6\text{‰}$) и δD ($-87,1 \pm 27,8\text{‰}$) характеризуют летние осадки, а более низкие средние значения $\delta^{18}\text{O}$ ($-22,1 \pm 4,9\text{‰}$) и δD ($-157,1 \pm 36,7\text{‰}$) – зимние. Рассчитанная ЛЛМВ атмосферных осадков для 2016–2020 гг. описывается уравнением $\delta\text{D} = 7,45\delta^{18}\text{O} + 11,52$ ($R^2 = 0,93$).

Впервые установлена температурная зависимость изотопного состава атмосферных осадков в г. Томске: температурный эффект проявляется в изменении значений $\delta^{18}\text{O}$ и δD на 0,47 и 3,62‰ при изменении температуры на 1 °C.

На основе анализа обратных траекторий движения воздушных масс выявлены преобладающие регионы-источники воздушных масс, приносящих в Томск атмосферные осадки с разным изотопным составом.

Результаты мониторинга изотопного состава осадков в Томске важны и могут быть использованы в комплексе с гидрологическими, геохимическими и геофизическими методами для изучения окружающей среды и создания глобальной карты изотопного состава осадков.

Благодарности. Авторы выражают благодарность сотрудникам геофизической обсерватории ИМКЭС СО РАН за отбор образцов и предоставленные метеорологические данные.

Финансирование. Работа выполнена в рамках госзадания ИМКЭС СО РАН (регистрационный номер проекта 121031300154-1).

Список литературы

1. Dansgaard W. Stable isotopes in precipitation // *Tellus*. 1964. V. 16. P. 436–468.
2. Малыгина Н.С., Эйрих А.Н., Курепина М.Ю., Папуна Т.С. Изотопный состав атмосферных осадков в предгорьях Алтая: данные наблюдений и интерполяции // *Изв. Томск. политехн. ун-та. Инжиниринг георесурсов*. 2019. Т. 330, № 2. С. 44–54.

3. Wang T., Li T.-Y., Zhang J., Wu Y., Chen C.-J., Huang R., Li J.-Y., Xiao S.-Y., Blyakharchuk T.A. A climatological interpretation of precipitation $\delta^{18}\text{O}$ across Siberia and Central Asia // *Water*. 2020. V. 12, N 8. Article ID: 2132.
4. Kostrova S.S., Meyer H., Fernandez F., Werner M., Tarasov P.E. Moisture origin and stable isotope characteristics of precipitation in southeast Siberia // *Hydrol. Processes*. 2020. V. 34. P. 51–67.
5. Aizen V.B., Aizen E., Fujita K., Nikitin S.A., Kreutz K.J., Takeuchi L.N. Stable-isotope time series and precipitation origin from firn-core and snow samples, Altai glaciers, Siberia // *J. Glaciol.* 2005. V. 51. P. 637–654.
6. Малыгина Н.С., Эйрих А.Н., Азбалаев Е.В., Папуна Т.С. Изотопный состав и регионы-источники зимних осадков в Надымской низменности // *Лед и снег*. 2020. Т. 60, № 1. С. 98–108.
7. Васильчук Ю.К., Чижова Ю.Н., Буданцева Н.А., Васильчук А.К., Облогов Г.Е. Изотопный состав снежников и ледников полярного Урала // *Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5: Геогр.* 2018. № 1. С. 81–89.
8. Папуна 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. XXI, № 2. С. 60–69.
9. ГОСТ 17.1.5.05–85. Общие требования к отбору проб поверхностных и морских вод, льда и атмосферных осадков. М.: Стандартинформ, 2010. 12 с.
10. Лебедев А.Т. Масс-спектрометрия для анализа объектов окружающей среды. М.: Техносфера, 2013. 632 с.
11. The Online Isotopes in Precipitation Calculator, version 3.1. URL: <https://wateriso.utah.edu/waterisotopes/index.html> (last access: 24.01.2023).
12. Rolph G., Stein A., Stunder B. Real-time Environmental Applications and Display System: READY // *Environ. Model. Softw.* 2017. V. 95. P. 210–228.
13. 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. Am. Meteorol. Soc.* 2015. V. 96. P. 2059–2077.
14. Numaguti A. Origin and recycling processes of precipitating water over the Eurasian continent: Experiments using an atmospheric general circulation model // *J. Geophys. Res.* 1999. V. 104. P. 1957–1972.
15. Евсеева Н.С. География Томской области (Природные условия и ресурсы). Томск: Изд-во Том. ун-та, 2001. 223 с.
16. Гидрометцентр России. М., 2023. URL: <https://meteoinfo.ru/climatecities> (дата обращения: 6.02.2023).
17. Ферронский В.И., Поляков В.А. Изотопия гидросферы Земли. М.: Научный мир, 2009. 632 с.
18. Kurita N., Yoshida N., Inoue G., Chayanova E.A. Modern isotope climatology of Russia: A first assessment // *J. Geophys. Res.: Atmos.* 2004. V. 109.
19. Kurita N. Relationship between the variation of isotopic ratios and the source of summer precipitation in eastern Siberia // *J. Geophys. Res.* 2003. V. 108, N D11.

G.V. Simonova, D.A. Kalashnikova, A.N. Markelova, A.S. Bondarenko, A.E. Davydkina. Variations in the oxygen and hydrogen isotope composition of precipitation in Tomsk (2016–2020).

Changes in the oxygen ($\delta^{18}\text{O}$) and hydrogen (δD) isotope compositions of precipitation in Tomsk in the period from 2016 to 2020 are studied. It is found that the $\delta^{18}\text{O}$ value varies in the range from -39.6 to $+2.1\text{‰}$, the average value over the entire period is $-18 \pm 6.8\text{‰}$; the δD value varies in the range from -299 to -4.9‰ , the average value is $-118.7 \pm 54.7\text{‰}$. A Local Meteoric Water Line is calculated for the period from 2016 to 2020: $\delta\text{D} = 7.43\delta^{18}\text{O} + 11.2$; this equation indicates the predominance of evaporative fractionation. The dependence of the isotope composition of precipitation on temperature in Tomsk is derived: $+0.47\text{‰}/\text{°C}$ for the $\delta^{18}\text{O}$ value and $+3.62\text{‰}/\text{°C}$ for the δD value. The main regions that provide atmospheric precipitation with different isotope compositions to Tomsk are identified based on the analysis of the air mass backward trajectories.