

Влияние мезомасштабных конвективных систем на изотопный состав атмосферных осадков в Томске

Г.В. Симонова^{✉1}, А.Н. Маркелова¹, П.М. Нагорский¹, К.Н. Пустовалов^{1,2},
М.В. Оглезнева¹, А.Е. Давыдкина^{1,3*}

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

²Национальный исследовательский Томский государственный университет
634050 г. Томск, пр. Ленина, 36

³Национальный исследовательский Томский политехнический университет
634050 г. Томск, пр. Ленина, 30

Поступила в редакцию 19.04.2024;
после доработки 04.06.2024;
принята к печати 24.06.2024

Изотопный состав атмосферных осадков является гидрологическим индикатором конвективных процессов и часто используется для реконструкции палеоклимата. Интересным представляется рассмотреть, как изменяется изотопный состав атмосферных осадков при прохождении мезомасштабных конвективных систем (МКС). В работе представлены результаты исследования изменений значений изотопного состава кислорода ($\delta^{18}\text{O}$) и водорода (δD) в атмосферных осадках, выпавших в г. Томске в период прохождения МКС в 2016–2021 гг. Установлено, что в осадках МКС значения $\delta^{18}\text{O}$ варьировались в диапазоне от $-14,98$ до $+0,03\%$ со средним значением $-9,9 \pm 3,2\%$; δD изменялось от $-99,2$ до $-16,71\%$ со средним значением $-65,1 \pm 22,3\%$. Связь между $\delta^{18}\text{O}$ и δD в осадках МКС описывается уравнением $\delta\text{D} = 5,45\delta^{18}\text{O} - 11$ ($R^2 = 0,62$), коэффициенты регрессии позволяют сделать вывод о преобладающем влиянии испарительного фракционирования на формирование изотопного состава осадков. Выявлено, что относительно высокие значения $\delta^{18}\text{O}$ и δD соответствовали неорганизованной конвекции, а с увеличением площади МКС изотопный состав характеризовался более низкими отношениями изотопов. На основе анализа обратных траекторий движения воздушных масс, по данным индексов конвективной неустойчивости, спутникового зондирования, грозопеленгационной сети World Wide Lightning Location Network (WWLLN) выявлены регионы – источники влаги, формирующие осадки МКС, – это подстилающая поверхность и мелководные водоемы степной зоны юга Западной Сибири и Северного Казахстана. Результаты исследования могут быть полезны при моделировании конвекции в климатических моделях и лучшего понимания вариаций изотопов в различных палеоархивах для регионов с конвективной активностью.

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

Введение

Изотопный состав метеорной воды является гидрологическим индикатором и используется в качестве климатологического параметра, характеризующего условия, при которых формировалась влага, а также служит своеобразным маркером для реконструкции температуры и осадков.

Из-за различий в давлениях насыщенных паров тяжелых и легких изотопов воды при фазовых переходах (конденсации и испарении) происходит

температурно-зависимое фракционирование [1]. Это приводит к наблюдаемой изменчивости отношений тяжелых и легких изотопов. Однако изотопный состав атмосферных осадков на любом вертикальном уровне зависит от изотопного состава исходной влаги, от доли воды, которая повторно испаряется в ненасыщенной атмосфере, и от изотопного обмена, происходящего между падающими каплями и окружающим их паром.

Влияние конвекции на изотопный состав воды обуславливается комбинацией физических, микрофизических и турбулентных процессов, происходящих в облаках. Существует большое разнообразие проявлений конвективной облачности: от изолированных конвективных облаков (кучевых и кучево-дождевых) до их организованных скоплений в виде систем мелкой и глубокой конвекции [2].

Интерес к системам глубокой конвекции обусловлен тем, что с ними связаны опасные явления

* Галина Владимировна Симонова (galina_simonova@inbox.ru); Анна Николаевна Маркелова (maranna.Levoka@yandex.ru); Петр Михайлович Нагорский (npm_sta@mail.ru); Константин Николаевич Пустовалов (const.pv@yandex.ru); Мария Викторовна Оглезнева (oglezneva.m@yandex.ru); Анна Евгеньевна Давыдкина (meartelbeck@mail.ru).

погоды, грозовая деятельность, интенсивные осадки. Эти системы наблюдаются как в тропической зоне, так и в умеренных широтах в теплый период года. Основное отличие глубокой конвекции от мелкой состоит в том, что она развивается во всей толще тропосферы (мелкая конвекция — в ее нижней части) и важную роль в ее развитии играют процессы, связанные с фазовыми переходами воды в атмосфере, что влияет на изотопный состав гидрометеоров (облачных частиц и осадков).

Из-за сравнительно «молодого возраста» мезометеорологии влияние мезомасштабной конвекции на изотопный состав атмосферных осадков изучено не для всех регионов земного шара. Для тропических регионов, где отдельные кучево-дождевые (грозовые) облака объединяются в системы глубокой конвекции α - и β -мезомасштабов, называемые мезомасштабными конвективными системами (МКС), которые имеют непрерывную пространственную протяженность порядка 100 км и более [3]. Изначально эмпирическая отрицательная связь между значениями $\delta^{18}\text{O}$ и δD осадков и их количеством применялась для реконструкции палеоклимата с помощью различных палеоархивов (например, сталагмиты, ледниковые керны [4]). Однако последующие исследования показали, что изотопные вариации в тропических/субтропических регионах не связаны напрямую с количеством осадков, а зависят от крупномасштабной конвективной деятельности в тропических циклонах, вследствие которой формируются несколько МКС [5].

Над сушей подобные вариации изотопов, связанные с крупномасштабной конвективной деятельностью, уже зарегистрированы в Южной Америке [6], Африке [7] и Южной Азии [8]. Однако для умеренных широт на территории России подобных исследований не проводилось.

Цель настоящей работы — оценка влияния МКС на изменчивость изотопного состава атмосферных осадков в г. Томске. Для этого мы объединили наборы данных, отражающих динамику атмосферы (траектории движения воздушных масс, индексы конвективной неустойчивости, спутникового зондирования, сеть WWLLN), и по значениям изотопного состава атмосферных осадков, ежесуточно отобранных во время прохождения МКС над г. Томском.

1. Материалы и методы

1.1. Спутниковые данные

Отбор случаев прохождения МКС в окрестностях г. Томска (юг Западно-Сибирской равнины) проводился на основе данных пассивного спутникового зондирования (в видимом и ИК-диапазонах) и наземных наблюдений в геофизической обсерватории (ГО) ИМКЭС СО РАН. Были использованы композитные спутниковые изображения (RGB) по данным полярно-орбитальных (Terra, Aqua, Suomi, NOAA) и геостационарных (Himawari-8, Meteosat-8) спутников. Были использованы следующие критерии дешифрирования МКС на спутниковых изображениях: наличие организованного скопления кучево-дождевых облаков квазиовальной формы;

максимальная протяженность облачного скопления вдоль большой диагонали не менее 50 км; температура на верхней границе облачности -32°C и ниже; оптическая толщина облачности ≥ 30 [9]. Для подтверждения факта прохождения МКС над пунктом отбора осадков, а также уточнения интервалов времени их прохождения были использованы данные наблюдений за облачностью, атмосферными явлениями и результаты измерений градиента потенциала электрического поля атмосферы. Интервалы времени и продолжительность прохождения МКС вблизи ГО ИМКЭС оценивались на основе подхода, описанного в работе [10]. Всего за май–август 2016–2021 гг. было зафиксировано 27 случаев прохождения МКС с сопутствующими ливневыми осадками, изотопный состав которых анализировался в рамках настоящего исследования.

1.2. Данные реанализа ERA5, грозопеленгационной сети WWLLN и метеорологических (синоптических) наблюдений

На основе индексов конвективной неустойчивости K Index и Total Totals, полученных из реанализа ERA5 (ECMWF) с сервера Copernicus Climate Change Service [11], выполнен анализ пространственной изменчивости конвективной неустойчивости над Западной Сибирью для выделения района с максимальной неустойчивости атмосферы в теплый период года, который является потенциальным очагом зарождения МКС. Кроме того проведен анализ траекторий перемещения некоторых МКС, восстановленных по координатам связанных с ними разрядов молний, полученным грозопеленгационной сетью WWLLN. Оперативные данные (за 1 ч) сети WWLLN выкладываются с задержкой 6 ч на официальном сайте [12]. Для анализа синоптических условий, способствующих формированию МКС, привлекались синоптические карты фактической погоды с фронтальным анализом [13].

1.3. Обратные траектории воздушных масс

Для определения вероятного расположения региона — источника влаги для формирования атмосферных осадков в г. Томске для каждого отдельного случая их выпадения были построены траектории движения воздушных масс с помощью модели HYSPLIT [14]. Обратные траектории были рассчитаны для высот, соответствующих верхней и нижней границам облачности. В качестве начального момента для обратной траектории выбрано время начала осадков и два временных интервала — 5 и 1 сут, так как жизненный цикл МКС относительно короткий (в среднем активная его часть длится 16 ч) [15, 16].

1.4. Определение изотопного состава осадков

В летние сезоны в период 2016–2021 гг. были отобраны 172 суточные пробы дождевой воды в ГО ИМКЭС ($56,4756354^\circ$ с.ш., $85,0547361^\circ$ в.д.), из них

27 проб в дни, когда над городом наблюдались МКС. Отношения стабильных изотопов кислорода ($^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$) и водорода (D/H) в атмосферных осадках определены с помощью изотопного масс-спектрометра DELTA V Advantage (Thermo Fisher Scientific, Германия) и системы GasBench II. Изотопные измерения выполнены в Лаборатории биоинформационных технологий ИМКЭС СО РАН, приборы предоставлены Томским региональным центром коллективного пользования ТНЦ СО РАН.

Изотопный состав вычисляется по формуле

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

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

Для калибровки измеренных величин использовались международные стандарты МАГАТЭ: VSMOW, SLAP и GRESP. Стандартное отклонение измерения не превышало $\pm 0,3$ для пяти последовательных измерений $\delta^{18}\text{O}$ и 2‰ для δD .

2. Результаты и обсуждение

2.1. Траекторный анализ

На основе данных, полученных с помощью HYSPLIT в [17], нами было установлено, что в летние сезоны 2016–2020 гг. воздушные массы в дни с осадками приходили с севера (северная часть Атлантического океана и Северный Ледовитый океан) в 37,4%, с юга и юго-запада (Черноморско-Каспийский регион и Казахстана) – в 35,3%, с запада – в 23,7% случаев. В дни прохождения МКС над Томском в большинстве случаев как для траекторий, построенных для временного интервала 5 сут, так и за 1 сут (рис. 1) перенос воздушных масс был с южного и юго-западного направлений.

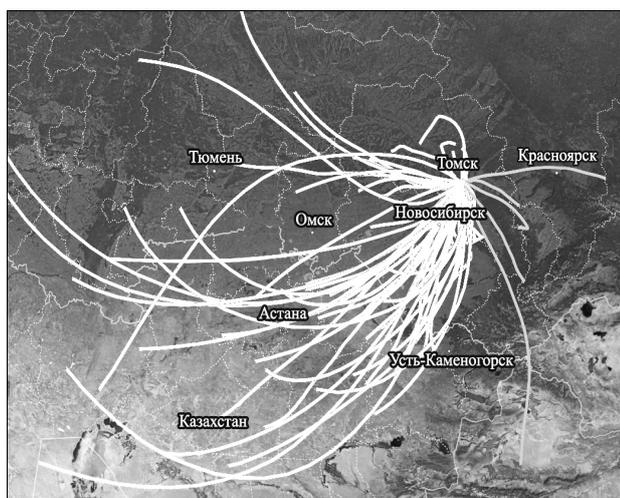


Рис. 1. Суточные обратные траектории движения воздушных масс в период прохождения МКС над г. Томском (июнь-июль 2016–2021 гг.)

2.2. Анализ синоптических условий

Синоптический анализ (таблица) показал, что МКС формируются при различных условиях, имеют разную стадию развития и организации, которая измерена по пространственной локализации. В 80% рассмотренных случаев МКС развивались в условиях, когда движение циклонов с запада на восток блокировалось стационарирующим на востоке антициклоном. В результате происходило окклюзирование циклона, а при заторах холодного воздуха с севера или теплого с юга – его регенерация. При окклюзировании циклона и его последующем заполнении за холодным фронтом формируются гряды кучево-дождевых облаков в массе холодного

Синоптические условия формирования МКС, стадии их развития и пространственная локализация, количество осадков

Дата прохождения	Стадия развития	Пространственная локализация		Количество осадков, мм
		Протяженность ЮЗ–СВ, км	Площадь при подходе к Томску, $\times 10^3 \text{ км}^2$	
<i>МКС формировалась за холодным фронтом окклюзированного циклона (52%)</i>				
30.06.2016	Ф	40,2	3,3	1,4
05.07.2016	Д	100	10	3,8
06.07.2016	MP → Д	130	12,3	23,6
13.07.2016	MP → Д	140	13	9,8
28.06.2018	MP	300	95	2
29.06.2018	–	Нет данных	Нет данных	1,9
01.07.2018	–	Нет данных	Нет данных	7,9
08.06.2019	MP	90	10,5	3
05.07.2019	Ф	70	3,5	2,8
31.07.2019	Д	150	28	23,5
26.06.2020	Ф → MP	90	12,7	3,2
04.07.2020	Ф → MP	100	5,2	1,6
20.07.2020	Ф → MP	190	22	1,3
<i>МКС формировалась между фронтами двух окклюзированных циклонов (15%)</i>				
30.05.2017	Ф → MP	70	4	1,8
31.05.2017	Ф → MP	160	36	8,3
25.06.2017	Ф → MP	80	6,6	25,2
26.07.2021	MP	200	31	0,5
<i>МКС формировались на атмосферных фронтах (11%)</i>				
09.06.2017	MP → Д	125	6,1	0,9
10.06.2017	MP	120	32,5	13,7
28.06.2017	MP	150	22,5	17,2
03.07.2018	MP → Д	Нет данных	Нет данных	1,8
<i>МКС формировались в других синоптических условиях: теплый сектор циклона, перед теплым фронтом и на периферии антициклона (22%)</i>				
21.06.2018	–	Нет данных	Нет данных	5,8
24.06.2018	MP → Д	300	65,3	3,1
03.07.2019	–	200	43	4,5
17.05.2020	MP	240	60,3	0,3
26.06.2020	Ф → MP	70	3,8	10,8
17.06.2021	Ф → MP	51	1,1	19,6

Примечание. Стадии развития МКС: Ф – формирование, MP – максимальное развитие, Д – диссипация.

воздуха, которые впоследствии, проходя над хорошо прогретыми мелководными водоемами степной зоны юга Западной Сибири и Северного Казахстана, подпитываются и могут образовывать организованные скопления кучево-дождевых облаков — МКС (рис. 2).

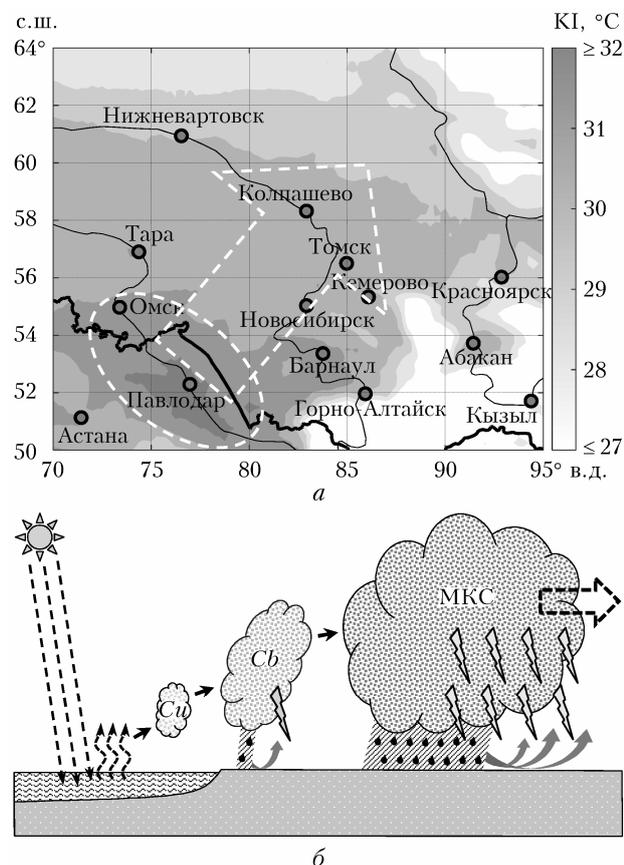


Рис. 2. Расположение основного очага возникновения и направление перемещения МКС (а) и схема их формирования вследствие образования, трансформации и объединения конвективной облачности над перегретыми мелководными водоемами степной зоны юга Западной Сибири (б). Пунктирный овал и пунктирная стрелка — схематическое обозначение предполагаемого очага образования МКС (области большой концентрации мелководных водоемов и высоких значений индекса неустойчивости KI) и преобладающего направления перемещения МКС, восстановленного по спутниковым измерениям и данным о грозовой активности (WWLLN); Cu, Cb — кучевые и кучево-дождевые облака

2.3. Вариации $\delta^{18}\text{O}$ и δD в атмосферных осадках

Согласно нашим исследованиям [17] в летние месяцы 2016–2020 гг. среднее значение изотопного состава атмосферных осадков, выпавших из облаков в составе воздушных масс, пришедших с западного направления, составляло $10,4 \pm 3,5\%$ для $\delta^{18}\text{O}$ и $-62,4 \pm 25,1\%$ для δD ; $-9,2 \pm 3,1\%$ ($\delta^{18}\text{O}$) и $-57,1 \pm 21,7\%$ (δD) — с южного (Черноморско-Каспийского региона и Казахстана) и $-11,7 \pm 2\%$ ($\delta^{18}\text{O}$) и $-73,5 \pm 23,5\%$ (δD) — с северного. Для осадков

МКС средние значения $\delta^{18}\text{O}$ и δD составили $-9,9 \pm 3,2$ и $65,1 \pm 22,3\%$ соответственно.

Вариации δD и $\delta^{18}\text{O}$ в атмосферных осадках обычно линейно связаны между собой. Когда фазовые переходы осуществляются в равновесных условиях, угловой коэффициент линии регрессии равен 8, а свободный член уравнения, или избыток дейтерия, составляет 10‰ [18]. Графики линейной регрессии величин изотопного состава атмосферных осадков, выпавших в июне-июле 2016–2021 гг. в г. Томске, представлены на рис. 3.

Полученные нами угловые коэффициенты линии регрессии находятся в диапазоне от 5,45 до 5,71‰, избыток дейтерия — от $-6,16$ до -11% , при этом минимальные значения этих параметров соответствуют осадкам МКС. Это говорит о том, что при образовании летних осадков, выпадающих над территорией Томска, сдвиг равновесия происходит в сторону испарения и испарительное обогащение наиболее сильно проявляется в осадках МКС. Иными словами, на изотопный состав осадков влияет более интенсивное испарение воды как с подстилающей поверхности, так и с поверхности дождевых капель в нагретой летней атмосфере [19]. Средние значения $\delta^{18}\text{O}$ и δD осадков МКС оказались выше соответствующих средних значений осадков без МКС и осадков июня-июля в целом (рис. 3). Изменения этих величин находятся в диапазонах от $-14,98$ до $+0,03\%$ для $\delta^{18}\text{O}$ и от $-99,2$ до $-16,71\%$ для δD соответственно.

Так как в большинстве случаев для осадков МКС источник влаги предположительно один и тот же (подстилающая поверхность и мелководные водоемы степной зоны Сибири и Северного Казахстана), то на изменчивость изотопного состава атмосферных осадков, вероятно, влияют другие факторы. В качестве таковых мы рассмотрели степень развития и масштаб МКС, количество осадков. Определить, влияет ли на изотопный состав осадков масштаб МКС, можно, проследив изменение изотопного состава по мере последовательного прохождения над Томском нескольких МКС с разными характеристиками. Из 27 случаев МКС над Томском зафиксировано четыре пары последовательных МКС, осадки которых относились к разным суточным пробам (рис. 4). Во всех парных случаях в первые сутки изотопный состав характеризовался более высокими значениями $\delta^{18}\text{O}$ и δD , тогда как во вторые сутки наблюдался сдвиг в сторону более низких значений, при этом пространственная локализация МКС становилась более протяженной и выпадало большее количество осадков.

Таким образом, при рассмотрении «парных» случаев прослеживается «количественный эффект» (содержание тяжелых изотопов в дождевой воде уменьшается по мере увеличения количества осадков). В течение многих лет количественный эффект объясняли механизмом, связанным с постепенным облегчением изотопного состава водяного пара атмосферы по мере его конденсации. Поскольку обогащенный тяжелыми изотопами водяной пар

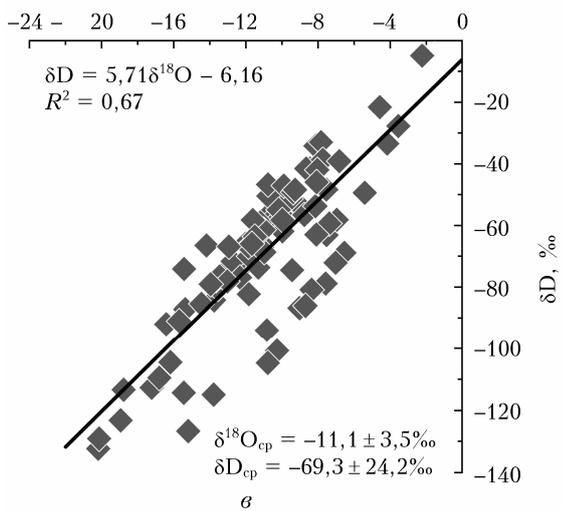
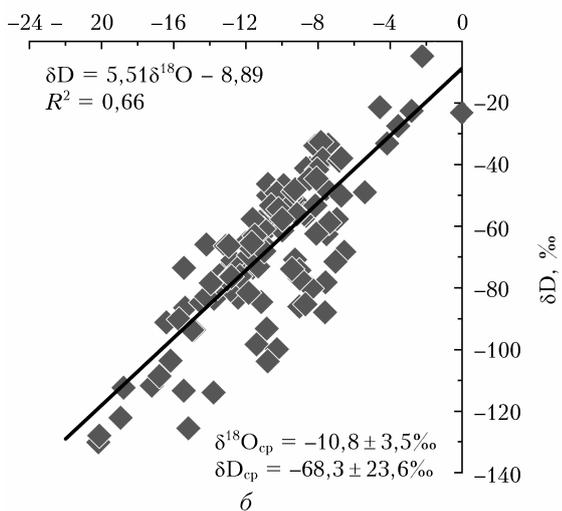
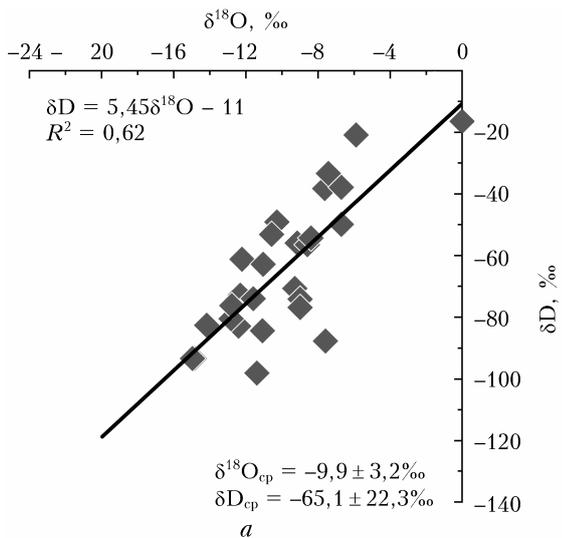


Рис. 3. Взаимосвязь величин $\delta^{18}\text{O}$ и δD и их средние значения: для атмосферных осадков МКС (а); для всех случаев выпадения атмосферных осадков (б); для атмосферных осадков без учета осадков МКС (в)

конденсируется в первую очередь, то по мере выпадения осадков наблюдается сдвиг значений изотопного состава в сторону более низких значений [20].

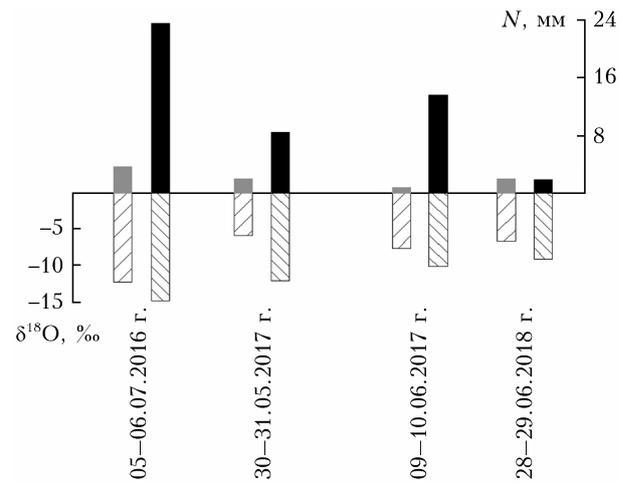


Рис. 4. Распределение количества осадков (N) и значений $\delta^{18}\text{O}$ в парных (последовательных) случаях прохождения МКС

И чем больше осадков образуется из данной конвективной облачности, тем более обедненным будет изотопный состав воды в последующих осадках.

Регрессионный анализ взаимосвязи между соотношениями изотопов в осадках МКС и количеством осадков не выявил явных корреляционных связей. Эти результаты позволяют предположить, что в нашем случае ключевую роль играет не столько количество осадков, сколько размеры и пространственная локализация МКС и, вероятно, стадия их развития. Образование нескольких МКС подряд приводит к снижению значений $\delta^{18}\text{O}$ и δD дождевой воды. Объясняется это тем, что во время выпадения сильных ливневых осадков при охлаждении воздушных потоков увеличивается влажность, а интенсивность испарения уменьшается. Это приводит к образованию обедненных тяжелыми изотопами осадков, особенно к концу дождя. Во время нечастых и мелких дождевых событий осадки выпадают через ненасыщенную атмосферу, происходит их повторное испарение, что приводит к обогащению тяжелыми изотопами дождевой влаги. Так, 30.06.2016 г. над Томском проходила МКС в стадии формирования с малой протяженностью (40,2 км), при этом выпало 1,4 мм осадков с самыми высокими значениями $\delta^{18}\text{O} = 0,03\text{‰}$ и $\delta\text{D} = -16,4\text{‰}$.

Для проведения регрессионного анализа $\delta^{18}\text{O} - \delta\text{D}$ зависимости значения изотопных отношений осадков МКС были разбиты на две группы. В первую группу были включены значения, соответствующие количеству осадков менее 8 мм (17 случаев), во вторую – более 8 мм (10 случаев). Для первой группы регрессионное уравнение имеет вид $\delta\text{D} = 5,49\delta^{18}\text{O} - 12,97$ ($R^2 = 0,7$). Высокие средние значения изотопного состава атмосферных осадков первой группы ($\delta^{18}\text{O} = -8,86 \pm 1,72\text{‰}$, $\delta\text{D} = -61,65 \pm 10,3\text{‰}$) и низкий избыток дейтерия ($-12,97\text{‰}$) отражают обогащение при испарении с поверхности капель, образующих облака, и дождевых капель.

Уравнение регрессии второй группы имеет вид $\delta\text{D} = 7,22\delta^{18}\text{O} + 13,87$ ($R^2 = 0,6$). Сравнительно

низкие средние значения $\delta^{18}\text{O} = -11,74 \pm 2,58\%$; $\delta\text{D} = -70,95 \pm 22,54\%$ и высокий избыток дейтерия (+13,87%) говорят о том, что конденсация пара происходила на большей высоте и при более низких температурах.

При переходе вещества из жидкого состояния в парообразное в первую очередь испаряются более легкие молекулы, поэтому влага обогащается тяжелыми, а образующийся пар — легкими изотопами. Затем обедненная тяжелыми изотопами относительно первоначального состояния облачная влага (в различных фазовых состояниях) под влиянием конвекции поднимается на большие высоты, где меньше испаряемой доли дождя. На этих высотах из-за конденсации не происходит еще большего обеднения атмосферной влаги тяжелыми изотопами.

В составе МКС помимо конвективных облаков могут присутствовать и слоистообразные, которые отмечаются только на стадии зрелости и диссипации МКС, а на ранней стадии (формирования) отсутствуют. Известно, что тип облаков также может влиять на изотопный состав осадков [21]. Мы сопоставили результаты наблюдений за облачностью и осадками из базы данных [22, 23] с нашими значениями изотопного состава осадков МКС в дни, когда их количество превышало 8 мм. В восьми случаях из десяти МКС над Томском были в стадии максимального развития, их протяженность превышала 120 км, во время дождя наблюдались как конвективные, так и слоистообразные облака. Значения $\delta^{18}\text{O}$ осадков изменялись в диапазоне от $-14,98$ до $-10,59\%$. В двух других случаях МКС были в стадиях формирования и диссипации. На стадии формирования МКС их протяженность составляла ~ 70 км, наблюдались только кучево-дождевые облака, $\delta^{18}\text{O}$ имело самое высокое в группе значение $-7,43\%$. На стадии диссипации протяженность МКС ~ 160 км, наблюдались кучево-дождевые, разорвано-дождевые облака, $\delta^{18}\text{O} = -8,6\%$. Осадки из конвективных облаков оказались обогащены тяжелыми изотопами по сравнению с комбинированными осадками, когда одновременно наблюдалась и конвективная, и слоистая облачность. В работе [21] приведены похожие результаты: с увеличением доли осадков из слоистых облаков значения $\delta^{18}\text{O}$ в пробах уменьшались. Эти данные позволяют сделать вывод, что МКС в стадии максимального развития, как правило, содержат более высокие доли осадков слоистых облаков и, как следствие, имеют более низкие значения изотопного состава.

Заключение

По данным траекторного анализа, спутникового зондирования, сети WWLLN установлено, что очагом возникновения и поддержания мезомасштабных конвективных систем над г. Томском являются подстилающая поверхность и мелководные водоемы степной зоны юга Западной Сибири и Северного Казахстана. Изотопный состав конвективных осад-

ков характеризуется высокими средними значениями: $\delta^{18}\text{O} = -9,9 \pm 3,2\%$ и $\delta\text{D} = -65,1 \pm 22,3\%$. Связь между $\delta^{18}\text{O}$ и δD в осадках МКС описывается уравнением $\delta\text{D} = 5,45\delta^{18}\text{O} - 11$ ($R^2 = 0,62$). Коэффициенты регрессии позволяют сделать вывод о преобладающем влиянии испарительного фракционирования на формирование изотопного состава осадков. Выявлено, что системы глубокой конвекции α - и β -мезомасштабов являются ключевым фактором изотопных вариаций дождевой воды и изотропные вариации связаны не только с источником возникновения МКС, но и с активностью МКС. Для более развитых систем (стадии МР и Д) характерно доминирование обложных осадков (из слоистообразных облаков) и, как следствие, суммарные осадки из МКС имеют более низкие значения изотопного состава. Последовательное выпадение ливневого и обложного дождя из МКС (из конвективной и слоистообразной частей соответственно) приводит к увеличению количества осадков и снижению изотопных значений. Следовательно, вариации изотопного состава осадков могут быть связаны с изменением стадий развития МКС, для которых характерны различные соотношения ливневых и обложных осадков.

Благодарности. Авторы благодарят сотрудников геофизической обсерватории ИМКЭС СО РАН за отбор образцов атмосферных осадков.

Финансирование. Работа выполнена в рамках госзадания ИМКЭС СО РАН (проект № FWRG-2021-0001, регистрационный номер № 121031300154-1).

Список литературы

1. Ферронский В.И., Поляков В.А. Изотопия гидросферы Земли. М.: Научный мир, 2009. 632 с.
2. Masunaga H., L'Ecuyer N.S., Kummerow C.D. Variability in the characteristics of precipitation systems in the tropical. Part I: Spatial structure // J. Clim. 2005. V. 18, N 6. P. 823–840. DOI: 10.1175/JCLI-3304.1.
3. Houze R.A. Mesoscale convective systems // Rev. Geophys. 2004. V. 42. P. RG4003. DOI: 10.1029/2004RG000150.
4. Thompson L.G., Mosley-Thompson E., Davis M.E., Lin P.-N., Henderson K., Mashiotta T.A. Tropical glacier and ice core evidence of climate change on annual to millennial time scales // Clim. Change. 2003. V. 59. P. 137–155. DOI: 10.1023/A:1024472313775.
5. Risi C., Muller C., Vimeux F., Blossey P., Vedeau G., Dufaux C., Abramian S. What controls the mesoscale variations in water isotopic composition within tropical cyclones and squall lines? Cloud resolving model simulations in radiative-convective equilibrium // J. Adv. Model. Earth. Syst. 2023. V. 15, N 4. P. 1–19. DOI: 10.1029/2022MS003331.
6. Vimeux F., Tremoy G., Risi C., Gallaire R. A strong control of the South American SeeSaw on the intraseasonal variability of the isotopic composition of precipitation in the Bolivian Andes // Earth Planet. Sci. Lett. 2011. V. 307, N 1–2. P. 47–58. DOI: 10.1016/j.epsl.2011.04.031.
7. Tremoy G., Vimeux F., Soumana S., Souley I., Risi C., Cattani O., Oi M. Clustering mesoscale convective

- systems with laser-based water vapor $\delta^{18}\text{O}$ monitoring in Niamey (Niger) // *J. Geophys. Res.: Atmos.* 2014. V. 119, N 9. P. 5079–5103. DOI: 10.1002/2013JD020968.
8. *Moerman J.W., Cobb K.M., Adkins J.F., Sodemann H., Clark B., Tuen A.A.* Diurnal to interannual rainfall $\delta^{18}\text{O}$ variations in northern Borneo driven by regional hydrology // *Earth Planet. Sci. Lett.* 2013. V. 369. P. 108–119. DOI: 10.1016/j.epsl.2013.03.04.
 9. *Нагорский П.М., Жуков Д.Ф., Картавых М.С., Оглезнева М.В., Пустовалов К.Н., Смирнов С.В.* Структура мезомасштабных конвективных систем над Западной Сибирью по данным спутниковых наблюдений // *Метеорол. и гидрол.* 2022. № 12. С. 45–55.
 10. *Pustovalov K.N., Nagorskiy P.M.* Response in the surface atmospheric electric field to the passage of isolated air mass cumulonimbus clouds // *J. Atmos. Sol.-Terr. Phys.* 2018. V. 172. P. 33–39. DOI: 10.1002/2013JD020968.
 11. *Copernicus Climate Data Store.* URL: <https://cds.climate.copernicus.eu> (last access: 16.03.2024).
 12. *WWLLN – the World Wide Lightning Location Network.* A global network monitoring lightning activity over the entire Earth. URL: <https://wwlln.net> (last access: 16.03.2024).
 13. *Гидрометцентр России.* Карты фактической погоды – приземный анализ и аэрология. М., 2024. URL: <https://meteoinfo.ru/мапсунор> (last access: 16.03.2024).
 14. *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. DOI: 10.1029/1999JD900182.
 15. *Кружевская И.В., Жукова В.А., Кошкова Т.С., Пустовалов К.Н., Чурсин В.В.* Мезомасштабные конвективные комплексы Западной Сибири: Всероссийская научно-практическая конференция с международным участием (Пермь, 16–17 сентября 2020 г.). Пермь: ПГНИУ, 2020. Т. 1. С. 394–397.
 16. *Вельтищев Н.Ф., Степаненко В.М.* Мезометеорологические процессы: учеб. пособие. М.: МГУ, 2006. 101 с.
 17. *Симонова Г.В., Калашишникова Д.А., Маркелова А.Н., Бондаренко А.С., Давыдкина А.Е.* Вариации изотопного состава кислорода и водорода в атмосферных осадках в г. Томске (2016–2020 гг.) // *Оптика атмосф. и океана.* 2023. Т. 36, № 7. С. 595–601. DOI: 10.15372/AOO20230709.
 18. *Dansgaard W.* Stable isotopes in precipitation // *Tellus.* 1964. V. 16. P. 436–468.
 19. *Vaz de Oliveira A.C., da Silva Lima A.* Spatial variability in the stable isotopes of modern precipitation in the northwest of Iberia // *Isot. Environ. Health. Stud.* 2010. V. 46, N 1. P. 13–26. DOI: 10.1080/10256010903388154.
 20. *Cole J.E., Rind D., Webb R.S., Jouzel J., Healy R.* Climatic controls on interannual variability of precipitation $\delta^{18}\text{O}$: Simulated influence of temperature, precipitation amount, and vapour source region // *J. Geophys. Res.* 1999. V. 104. P. 14 223–14 236. DOI: 10.1029/1999JD900182.
 21. *Aggarwal P.K., Romatschke U., Araguas-Araguas L.* Proportions of convective and stratiform precipitation revealed in water isotope ratios // *Nat. Geosci.* 2016. V. 9, N 8. P. 624–629. DOI: 10.1038/NGEO2739.
 22. *Булыгина О.Н., Веселов В.М., Разуваев В.Н., Александрова Т.М.* Описание массива срочных данных об основных метеорологических параметрах на станциях России. Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2014620549 от 10 апреля 2014 г. URL: <http://aisori-m.meteo.ru/waisori/index.xhtml?> (дата обращения: 20.03.2024).
 23. *Булыгина О.Н., Веселов В.М., Александрова Т.М., Коришнунова Н.Н.* Описание массива данных по атмосферным явлениям на метеорологических станциях России. Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2015620081 от 15 января 2015 г. URL: <http://aisori-m.meteo.ru/waisori/index.xhtml?> (дата обращения: 20.03.2024).

G.V. Simonova, A.N. Markelova, P.M. Nagorskiy, K.N. Pustovalov, M.V. Oglezneva, A.E. Davydkina.
The influence of mesoscale convective systems on the isotopic composition of precipitation: the case of Tomsk city.

The isotopic composition of precipitation is a hydrological tracer of convective processes and is often used to reconstruct paleoclimate. Therefore, it is interesting to consider how the isotopic composition of precipitation changes during the passage of mesoscale convective systems (MCS). Variations in the isotopic composition of oxygen ($\delta^{18}\text{O}$) and hydrogen (δD) in precipitation during the passage of MCS over Tomsk in 2016–2021 were studied. It was found that $\delta^{18}\text{O}$ values varied from -14.98 to $+0.03\%$ with an average of $-9.9 \pm 3.2\%$ and δD values varied from -99.2 to -16.71% with an average of $-65.1 \pm 22.3\%$ in MCS precipitation. The relationship between $\delta^{18}\text{O}$ and δD is described by the equation $\delta\text{D} = 5.45\delta^{18}\text{O} - 11$ ($R^2 = 0.62$). The values of the regression coefficients show the predominant effect of evaporative fractionation on the formation of the isotopic composition of precipitation. Relatively high isotope ratios corresponded to disorganized convection, and lower isotope ratios characterized the isotopic composition as the MCS area increased. Based on the analysis of back air mass trajectories with the use of the indices of convective instability and satellite sounding and WWLLN network data, regions–sources of moisture for MCS precipitation were detected: the underlying surface and shallow water bodies of the steppe zone in the south of Western Siberia and Northern Kazakhstan. The results of the study can be useful for simulating convection in climate models, as well as for better understanding isotope variations in different paleoarchives for regions with convective activity.