

УДК 551.464.6.02

## ИЗМЕНЧИВОСТЬ ИЗОТОПНО-КИСЛОРОДНОГО СОСТАВА РЕКИ ЯУЗЫ В ПРЕДЕЛАХ ГОРОДА МОСКВЫ В 2019–2021 гг. ПОД ВЛИЯНИЕМ СНЕГОТАЯНИЯ И СИЛЬНЫХ ДОЖДЕЙ

© 2024 г. Ю. К. Васильчук<sup>а</sup>, Н. А. Буданцева<sup>а, \*</sup>

<sup>а</sup> *Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, 119991 Россия*

*\*e-mail: nadin.budanceva@mail.ru*

Поступила в редакцию 19.05.2023 г.

После доработки 25.08.2023 г.

Принята к публикации 08.10.2023 г.

Выполнено исследование сезонных вариаций изотопно-кислородного состава ( $\delta^{18}\text{O}$ ) р. Яузы с июня 2019 по ноябрь 2021 г. на основе еженедельных проб, а также изотопного состава и количества атмосферных осадков за данный период в г. Москве. Показана сезонность изотопного состава как для осадков, так и для воды реки, при этом амплитуда вариаций изотопных значений в осадках заметно выше, чем в воде реки. Показаны особенности изменения изотопного состава р. Яузы в периоды снеготаяния 2020 и 2021 гг., отличавшиеся по количеству снеготаяния в предшествующие зимние периоды и объемам талой снеговой воды. Также установлено, что в весенне-осенний период выпадение обильных дождей может приводить к быстрому (через несколько часов или на следующие сутки после дождя) изменению изотопного состава воды реки на 1.0–2.3‰.

*Ключевые слова:* изотопы кислорода, атмосферные осадки, река Яуза, сезонность, изотопный сигнал, талые снеговые воды.

**DOI:** 10.31857/S0321059624020033 **EDN:** CIKGCH

### ВВЕДЕНИЕ

Изотопный состав ( $\delta^{18}\text{O}$  и  $\delta^2\text{H}$ ) природных вод варьирует в широком диапазоне вследствие изотопного фракционирования, сопровождающего перенос воды в глобальном гидрологическом цикле [10, 19, 29]. Изотопный состав атмосферных осадков обусловлен вариациями температуры воздуха, интенсивностью выпадения осадков, испарением и рядом других процессов [18, 26, 30, 32]. Изотопный состав речной воды в основном соответствует изотопному составу осадков, но также он зависит от времени пребывания воды в водосборном бассейне и степени влияния гидрологических процессов – смешения с подземными, талыми снеговыми и ледниковыми водами, испарения и др. [7, 13].

В отличие от большинства химических индикаторов, изотопы ведут себя консервативно и могут дать комплексное представление об относительном участии различных источников воды

в суммарном стоке реки [16]. В связи с этим изотопные данные – надежный инструмент для наблюдений и количественной оценки пространственных эффектов процессов водного цикла [6, 11–13, 23].

В рамках международных исследовательских программ МАГАТЭ по изотопным исследованиям осадков (GNIP) и рек (GNIR) в мире решается ряд задач в области взаимосвязи осадков, поверхностных, почвенных и подземных вод, в том числе для количественных оценок гидравлических связей между различными водными объектами. Изотопные индикаторы могут применяться для локальных водосборов с быстрой реакцией на каждый эпизод выпадения осадков, в более широком масштабе они – высокоэффективный инструмент определения общей структуры формирования речного стока.

Обобщение данных последних лет по изотопному составу осадков (по сети GNIP) и речных вод (по сети GNIR), а также анализ изотопных данных из более 17 тыс. публикаций показали,

<sup>1</sup> Исследования выполнены при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект 19-77-30004).

что значения изотопного состава большей части рек мира расположены вблизи глобальной линии метеорных вод, а соотношение изотопного состава кислорода и водорода в реках описывается уравнением  $\delta^2\text{H} = 8.03\delta^{18}\text{O} + 8.59$ , что близко к уравнению для глобальных осадков:  $\delta^2\text{H} = 8.14\delta^{18}\text{O} + 10.9$ . Это говорит о том, что атмосферные осадки – основной источник питания рек. Кроме того, большинство известных изотопных эффектов для осадков – температурный, высотный, количественный, испарительный – также прослеживаются в изотопном составе рек мира [20, 25]. Сопоставление изотопного состава осадков и воды рек показывает значительное сглаживание изотопных вариаций в воде рек по сравнению с осадками: как правило, в течение года в реках для значений  $\delta^{18}\text{O}$  изотопные вариации  $\leq 10\%$ ; а для рек, питающихся преимущественно за счет подземных вод, внутригодовые вариации еще меньше [8, 17, 24].

Детальные многолетние исследования изотопного состава рек в Европе показали для большей части рек Центральной Европы сезонные вариации, соответствующие изотопной сезонности в осадках или сезонности таяния снежного покрова и ледников, что характерно для рек горных районов. При этом показано, что испарение несущественно влияет на изотопный состав рек [4, 28].

Для рек городских территорий установлены особенности вариаций изотопного состава, обусловленные повышенной долей поверхностного

стока в питании рек, особенно во время сильных дождей и/или таяния снега, а также влиянием сточных вод [21]. Изотопный подход часто применяется для оценки взаимодействия природных подземных и сточных вод в городах. Цель настоящего исследования – оценка сезонных вариаций изотопно-кислородного состава р. Яузы и выявление выраженных изотопных вариаций в воде реки в периоды снеготаяния и на фоне интенсивных дождей.

## МЕТОДЫ

Отбор воды из р. Яузы проводился в период с 15.06.2019 по 17.11.2021 с частотой 1 раз в неделю; всего за исследуемый период отобрано 104 пробы. Отбор воды из реки проводился на северо-востоке Москвы, в районе Олонецкого проезда, где река протекает в парковой зоне (рис. 1). В пробах воды р. Яузы выполнено определение изотопного состава кислорода ( $\delta^{18}\text{O}$ ).

Выполнено сопоставление изотопного состава воды реки и осадков, выпадавших в г. Москве в течение исследуемого периода (отбор осадков производился на метеостанции МГУ). Особое внимание уделено сопоставлению изотопного состава воды реки и обильных дождей, сумма которых была  $>20$  мм, выпадавших в день отбора пробы из реки или в предшествующие сутки. Следует отметить, что данные по количеству осадков для конкретных дней были сопоставлены авторами для метеостанций МГУ и ВДНХ [15] и отмечено их хорошее их совпадение. Так-



Рис. 1. Река Яуза в районе исследований 2019–2021 гг.

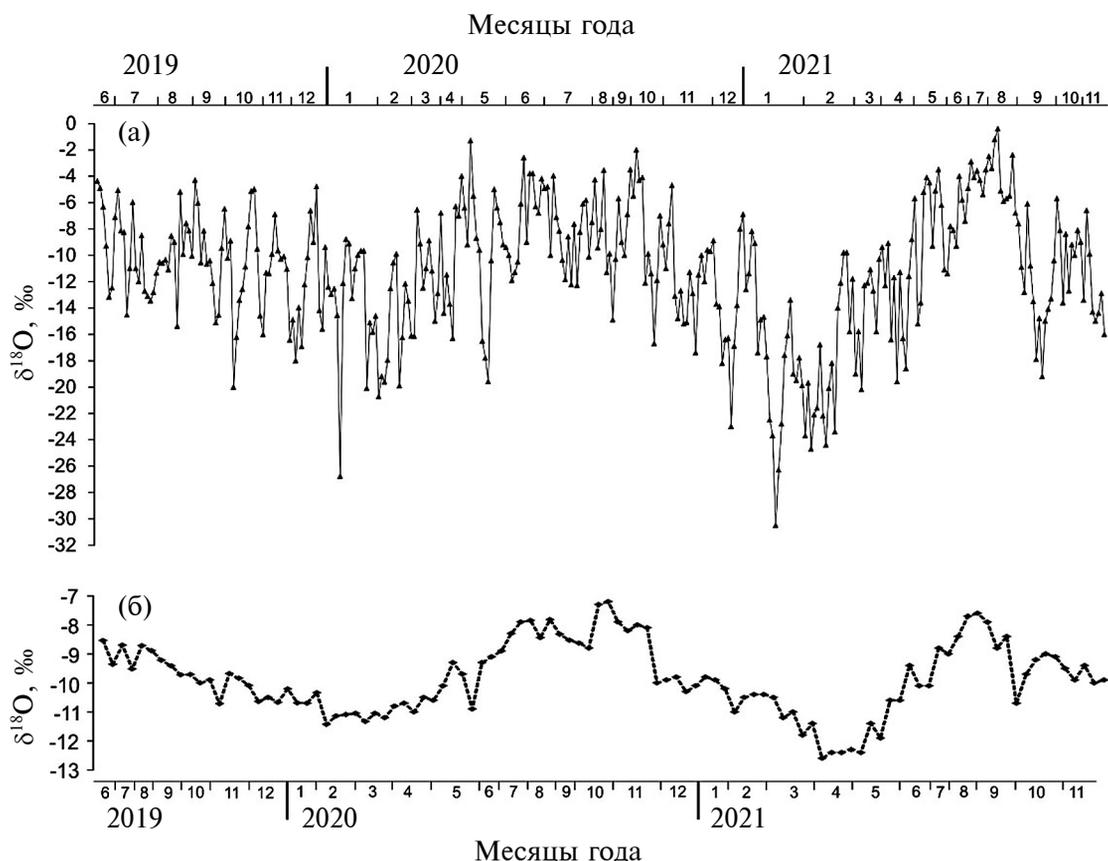


Рис. 2. Вариации  $\delta^{18}\text{O}$  в осадках в г. Москве (а) и в воде р. Яузы (б) за период с 14.06.2019 по 17.11.2021.

же прослежено изменение изотопного состава воды реки в периоды весеннего снеготаяния.

Измерения изотопного состава выполнены в лаборатории стабильных изотопов кафедры геохимии ландшафтов и географии почв географического факультета МГУ на масс-спектрометре “Delta-V Plus”, оснащённом опцией GasBench II. При измерении и калибровке результатов использовались международные стандарты МАГАТЭ (V-SMOW, V-SLAP, GISP и GRESP). Средняя точность измерений для значений  $\delta^{18}\text{O}$  составила 0.4‰.

## РЕЗУЛЬТАТЫ

### *Вариации значений $\delta^{18}\text{O}$ в осадках*

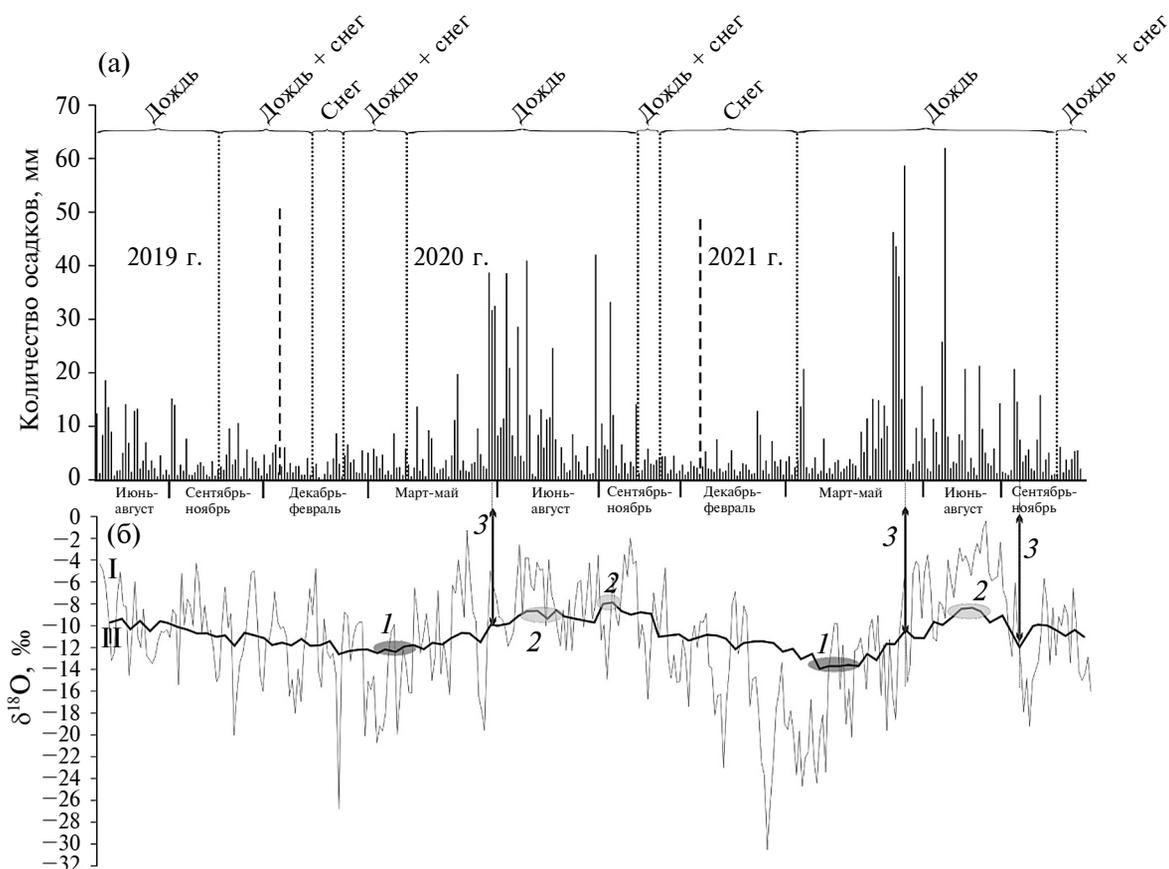
За исследуемый период (15.06.2019–17.11.2021) значения  $\delta^{18}\text{O}$  в осадках варьировали от  $-0.4$  до  $-30.5$ ‰. В распределении значений  $\delta^{18}\text{O}$  прослеживается явно выраженная сезонность — наиболее изотопически тяжелые осадки

выпадали в виде дождей в период с мая по сентябрь, наиболее изотопически легкие — в виде смешанных осадков и снега в период с ноября по март (рис. 2а).

### *Вариации значений $\delta^{18}\text{O}$ в воде р. Яузы*

Значения  $\delta^{18}\text{O}$  в воде р. Яузы варьировали в диапазоне от  $-7.2$  до  $-12.6$ ‰, наиболее высокие значения отмечены в августе–сентябре, наиболее низкие — в марте–апреле (рис. 2б).

Сопоставление изотопных данных по осадкам и воде реки показывает следующее. Во-первых, значительно более высокая амплитуда вариаций величин в осадках по сравнению с рекой (рис. 3б): для проб осадков, выпадавших в смежные сутки, вариации значений  $\delta^{18}\text{O}$  могут составлять 5–6‰ и даже достигать 10‰, в то время как в воде реки для смежных проб амплитуда значений  $\delta^{18}\text{O}$ , как правило,  $\leq 1$ ‰. Во-вторых, минимумы значений изотопного состава в воде реки и в осадках во временном масштабе почти



**Рис. 3.** Соотношение количества осадков (а) и величин  $\delta^{18}\text{O}$  (б) в осадках (I) и в воде р. Яуза (II). На изотопной кривой по р. Яузе показаны минимумы величин  $\delta^{18}\text{O}$  в период весеннего снеготаяния (1) и максимумы в летний период (2) и изотопный импульс интенсивных дождей (3).

не совпадают, так как для осадков минимальные значения  $\delta^{18}\text{O}$ , определяемые в подавляющем числе случаев температурой воздуха, отмечаются в зимнее время, в то время как в воде реки минимальные значения изотопного состава зафиксированы в конце марта – апреле. Летние максимумы значений  $\delta^{18}\text{O}$  в осадках и воде реки хорошо коррелируют и отмечаются в июле–августе 2020 г. и в июле – начале сентября 2021 г. В 2020 г. в воде реки были отмечены два положительных пика значений  $\delta^{18}\text{O}$  – в июле–августе и октябре (от  $-7.2$  до  $-8\text{‰}$ ), осенний пик может быть обусловлен большим количеством изотопически тяжелых осадков, выпавших в период с 10.09.2020 по 15.10.2020 (суммарное количество осадков за этот период  $\sim 67$  мм, значения  $\delta^{18}\text{O}$  от  $-2$  до  $-10\text{‰}$ ).

В течение зимней межени изотопный состав воды реки составлял около  $-10, -11\text{‰}$ , что указывает на преимущественное питание за счет

грунтовых вод, средний изотопный состав которых в московском регионе составляет  $-10, -12\text{‰}$  [1]. В периоды весеннего снеготаяния значения изотопного состава воды реки были минимальными. При этом весной 2020 г. минимум был слабо выражен, значения  $\delta^{18}\text{O}$  в воде реки в период снеготаяния (середина марта – середина апреля) были почти равны значениям  $\delta^{18}\text{O}$  в период зимней межени ( $-10, -11\text{‰}$ ). В 2021 г. в период снеготаяния значения  $\delta^{18}\text{O}$  в воде реки были на  $1.0\text{--}2.5\text{‰}$  ниже, чем в течение зимней межени, и варьировали от  $-12.3$  до  $-12.6\text{‰}$ , т. е. в этот год весенний изотопный минимум в воде реки был наиболее выражен (рис. 3б).

Несмотря на довольно равномерное распределение  $\delta^{18}\text{O}$  в воде р. Яузы от  $-7.2$  до  $-12.6\text{‰}$  (что можно объяснить значительной долей грунтовых вод в питании реки), можно отметить влияние изотопного сигнала осадков (особенно ливневого характера) на изотопный состав воды

**Таблица 1.** Изменение изотопного состава воды р. Яузы на фоне выпадения интенсивных дождей (количество осадков >20 мм)

$\delta^{18}\text{O}$ (‰) в воде р. Яузы до дождя	$\delta^{18}\text{O}$ в дождевых осадках, ‰	Количество осадков, мм	$\delta^{18}\text{O}$ (‰) в воде р. Яузы после дождя	$\Delta\delta^{18}\text{O}$ в воде реки после дождя, ‰
–10.9 (24.05.2020)	–6.4 (29.05.2020)	38.7	–9.3 (30.05.2020)	+1.6
	–7.5 (30.05.2020)	31.7		
–12.4 (26.04.2021)	–5.7 (3.05.2021)	43.6	–11.4 (03.05.2021)	+1.0
–8.4 (15.09.2021)	–17.9 (20.09.2021)	20.7	–10.7 (21.09.2021)	–2.3
	–14.8 (21.09.2021)	14.6		

реки, что выражается в изменении изотопного состава реки на 1–2‰. Особенно выраженный изотопный сдвиг в воде реки отмечался в случае, если значения  $\delta^{18}\text{O}$  в осадках не менее чем на 5–8‰ отличались от значения  $\delta^{18}\text{O}$  в воде реки до дождя. Как правило, изотопный сигнал осадков прослеживался в периоды сильных дождей, с мая по сентябрь (рис. 3а). 29–30 мая 2020 г. выпало ~70 мм осадков со средним значением  $\delta^{18}\text{O}$  –7.1‰, значения  $\delta^{18}\text{O}$  в воде р. Яузы (отбор 30.05.2020) повысились на 1.6‰ – от –10.9 до –9.3‰.

С 1.05.2021 по 3.05.2021 выпало ~90 мм осадков, изотопный состав выпадавших дождей варьировал от –8.8 до –5.7‰, значения  $\delta^{18}\text{O}$  в воде р. Яузы (отбор 03.05.2021) повысились на 1‰ – от –12.4 до –11.4‰. Также был выявлен сигнал заметно изотопно легких осадков в воде реки. Так, 20.09.2020–21.09.2020 выпало ~37 мм дождя со значениями  $\delta^{18}\text{O}$  –15, –18‰, значение  $\delta^{18}\text{O}$  в воде реки (отбор 21.09.2021) снизилось более чем на 2‰ – от –8.4 до –10.7‰ (рис. 3б; табл. 1).

#### СЕЗОННОСТЬ ИЗОТОПНОГО СОСТАВА АТМОСФЕРНЫХ ОСАДКОВ И ВОДЫ р. ЯУЗЫ

Отмеченная сезонность распределения изотопного состава осадков в исследуемый период 2019–2021 гг. типична для Москвы и соответствует ранее полученным данным. Так, для периодов 1970–2014 и 2014–2016 гг. распределение значений  $\delta^{18}\text{O}$  в осадках имело синусоидальный характер, соответствующий повышению значений в летние месяцы и снижению в зимний период; наиболее низкие значения  $\delta^{18}\text{O}$ , как

правило, получены для осадков, выпадающих в январе. Для периода 2014–2016 гг. коэффициент корреляции изотопного состава осадков с температурой воздуха составил 0.96 в январе и 0.99 в июне–августе [2, 37].

Сезонность изотопного состава рек прослеживается во многих районах с гумидным климатом. Как правило, изотопная сезонность в реках проявляется в повышении величин в летнее время и снижении в зимне-весенний период. Так, например, многолетний мониторинг изотопного состава р. Дунай в г. Тульне показали, что наименьшие величины  $\delta^{18}\text{O}$  отмечены в периоды таяния снега, наибольшие связаны, главным образом, с выпадением летних осадков [27]. Для большинства равнинных рек Германии сезонность изотопного состава воды рек близка к его сезонности в осадках с минимумом зимой и максимумом летом [20, 32]. Даже в районах с аридным климатом испарение не всегда приводит к полному сглаживанию сезонных вариаций в речных водах; так, например, для р. Шиянг в аридном регионе Китая показана сезонность изотопного состава, близкая к сезонности для осадков. Более низкие значения отмечены зимой и весной, более высокие – летом и осенью [36]. В городах в условиях плотной городской застройки сезонность изотопного состава осадков и рек может также коррелировать, несмотря на влияние сточных промышленных и коммунально-бытовых вод [21].

Несоответствие сезонного распределения изотопного состава осадков и рек связано, как правило, с особенностями питания рек. Так, для

рек альпийских областей Германии и Швейцарии установлено, что минимальные значения отмечаются летом (в период таяния снега в горах), максимальные — зимой [20, 32]. В районах с муссонным климатом сезонность изотопного состава рек часто связана с сезонностью выпадения осадков; так, например, для р. Меконг в Таиланде в воде реки низкие величины  $\delta^{18}\text{O}$  ( $-11.8\text{‰}$ ) отмечены в сезон дождей (апрель—август), высокие значения ( $-0.95\text{‰}$ ) — в теплые и сухие месяцы (ноябрь—февраль) [22]. При многолетних исследованиях может быть обнаружено нарушение типичной сезонности в связи с аномальными климатическими условиями. Например, в длительные периоды низкого стока изотопный состав воды рек не будет соответствовать долгосрочным сезонным закономерностям и может определяться более высокой долей подземных вод. Для рек бассейнов Рейна и Эльбы на фоне летне-осенней засухи в 2018 г. в стоке рек заметно повысилась доля более древних изотопно легких подземных вод, что привело к заметному снижению значений изотопного состава речных вод [20].

Ранее проведенные исследования показывают, что амплитуда сезонных колебаний изотопного состава для речных вод заметно ниже, чем для осадков, что связано с участием в питании рек подземных вод (изотопный состав которых, как правило, варьирует на  $\leq 5\text{‰}$  для значений  $\delta^{18}\text{O}$ ), а также с участием в речном стоке вод крупных водных резервуаров — озер и водохранилищ, в которых происходит существенное сглаживание сезонных изотопных вариаций. Так, для воды р. Дунай (данные по 2012 г. по г. Тульну) величины  $\delta^{18}\text{O}$  варьировали в течение года на  $\leq 1.8\text{‰}$  [34]. В реках Карпатского региона в Румынии при наличии сезонности изотопного состава вариации величин  $\delta^{18}\text{O}$  были  $\leq 2\text{‰}$  (от  $-10.8$  до  $-8.8\text{‰}$ ), в то время как в осадках вариации достигали  $\sim 30\text{‰}$  [24]. В Канаде в реках в десяти точках средняя амплитуда вариаций величин  $\delta^{18}\text{O}$  составляет  $3.2\text{‰}$ , в то время как для осадков в районах с морским климатом вариации значений  $\delta^{18}\text{O}$  составляли  $6\text{--}12\text{‰}$ , а в районах с континентальным климатом  $>20\text{‰}$  [14, 31]. По данным Ю.Н. Чижовой с соавторами, в 2019—2021 гг. в центральной части Восточно-Европейской равнины величины изотопного состава трех

рек (Дубна, Закза и Сосна) варьировали в гораздо более узком диапазоне (величины  $\delta^{18}\text{O}$  в среднем варьировали от  $-7$ ,  $-8$  до  $-12$ ,  $-13\text{‰}$ ), чем у атмосферных осадков в этот период (значения  $\delta^{18}\text{O}$  в среднем менялись от  $-3$  до  $-20\text{‰}$ ), что авторы объясняют высокой долей подземных вод в суммарном стоке рек [9].

Сезонность изотопного состава воды р. Яузы в 2019—2021 гг. была хорошо выражена (рис. 26). Весенний минимум связан с поступлением в реку большого количества изотопно легкой талой снеговой воды. Летне-осенний (в 2020 г.) и летний (в 2021 г.) максимумы обусловлены как непосредственным участием изотопно тяжелых летних дождей в стоке реки, так и утяжелением изотопного состава неглубоко залегающих грунтовых вод. При этом за исследуемый период вариации величин  $\delta^{18}\text{O}$  в воде реки были заметно ниже, чем в осадках ( $5.4$  и  $30.1\text{‰}$  соответственно), что объясняется значительной долей подземных вод в питании реки.

#### ВЛИЯНИЕ СНЕГОТАЯНИЯ НА ИЗОТОПНЫЙ СОСТАВ ВОДЫ р. ЯУЗЫ В 2020 И 2021 гг.

Установлено, что в период снеготаяния весной 2020 г. изотопный минимум в воде реки был выражен заметно слабее, чем весной 2021 г. (рис. 36). В весенний период 2020 г. изотопный состав воды реки почти не отличался от изотопного состава воды в зимнюю межень, в то время как весной 2021 г. значения  $\delta^{18}\text{O}$  в воде реки были на  $1.0\text{--}2.5\text{‰}$  ниже, чем в зимнюю межень. Возможно, это объясняется тем, что в течение зимнего периода 2019—2020 гг. осадки выпадали часто в виде снега и дождя и снежный покров был довольно маломощный. Устойчивый снежный покров в Москве и Московской области окончательно установился только с 23 января, при этом на метеостанции ВДНХ мощность снежного покрова была  $\leq 11$  см. Установившийся в конце января снежный покров разрушился в первой декаде марта. Снежный покров в марте и апреле 2020 г. устанавливался в результате залповых снегопадов, но держался он от нескольких часов до двух—четырёх дней. Для сравнения, в предыдущий зимний сезон мощность снежного покрова в Москве достигала  $49$  см [3]. Отсутствие выраженного половодья весной 2020 г. из-за малого

снегонакопления в зимний период 2019–2020 гг. было отмечено и для ряда рек Европейской части России [9].

Ранее для р. Сетуни было показано, что влияние талого снега на изотопный состав реки может быть довольно заметным. В пределах двух участков (в районе ул. Минской и на 100 м выше устья, на территории парка “Сказка”) в 2010 г. проводился отбор проб воды с февраля до окончания периода снеготаяния в середине апреля, частота отбора проб составляла 3–5 дней. Выявлено облегчение изотопного состава воды р. Сетуни в пик снеготаяния (вторая половина марта) на 3.0–3.5‰ по  $\delta^{18}\text{O}$ : от –11 до –14.5‰, при этом уже в начале апреля значения  $\delta^{18}\text{O}$  повысились до –11.5, –12‰, что указывает на практически полное прекращение поступления прямого стока талых снеговых вод в реку [1]. Поступление в реки талых снеговых вод приводит к заметному снижению значений изотопного состава рек, что было установлено в разных районах мира. Для р. Дунай показано, что таяние снега, как и обильные дожди, приводит к заметным (иногда >1‰ по величине  $\delta^{18}\text{O}$ ) кратковременным изменениям изотопного состава речной воды в течение нескольких дней или даже в течение одного дня [27]. Для рек Колымы и Маккензи показано, что в период активного снеготаяния, когда доля талых снеговых вод может достигать  $\geq 80\%$  общего стока, величины  $\delta^{18}\text{O}$  в воде рек снижаются на 2–3‰ [33, 35].

### ВЛИЯНИЕ ДОЖДЕЙ НА ИЗОТОПНЫЙ СОСТАВ ВОДЫ р. ЯУЗЫ

Для р. Яузы влияние изотопного сигнала осадков, особенно ливневого характера (>20 мм в течение одного эпизода дождя), на изотопный состав воды реки выражалось в изменении изотопного состава реки на 1.0–2.3‰ по величине  $\delta^{18}\text{O}$  в течение 1–2 дней после выпадения осадка, особенно если изотопный состав дождя заметно отличался от изотопного состава воды реки до его выпадения.

Выявленные изменения изотопного состава воды р. Яузы после выпадения интенсивных дождей показывают, что доля поверхностного стока в такие периоды может быть очень высокой, что особенно характерно для застроенных городских территорий, так как дождевая вода

через системы ливневой канализации и с водонепроницаемых поверхностей быстро попадает в реку. Например, для г. Берлина показано, что для реки, протекающей в урбанизированной части города, реакция изотопного состава воды на дожди была более выражена, чем для участка реки за пределами городской застройки [21].

Ранее авторами настоящей статьи был прослежен импульс ливня в изотопном составе воды р. Протвы и ее притоков в пределах Сатинского учебно-научного полигона географического факультета МГУ. Изотопный состав р. Протвы до дождя составлял в среднем –10.8‰ по значению  $\delta^{18}\text{O}$ , после дождя с величиной  $\delta^{18}\text{O} = -6.2\text{‰}$  в течение 12 ч изотопный состав р. Протвы был изотопно тяжелее на 0.6‰ [1, 5].

### ВЫВОДЫ

Для осадков Москвы и воды р. Яузы для исследуемого периода выявлена сезонность изменения изотопного состава: в осадках взаимосвязь изотопно-кислородного состава с температурой воздуха хорошо выражена, в воде р. Яузы сезонность вариаций связана с источниками питания реки: подземными водами, поверхностным стоком (дождевыми и талыми снеговыми водами), а также с изменением доли их вклада в питание реки в разные сезоны года.

В атмосферных осадках Москвы наиболее низкие (изотопно легкие) значения отмечены в зимнее время, наиболее высокие (изотопно тяжелые) в летнее время. В воде реки наименьшие значения отмечены в период снеготаяния, наибольшие – в августе–сентябре.

В период снеготаяния в 2021 г. изотопный минимум в воде реки был более выражен (снижение величин  $\delta^{18}\text{O}$  в среднем на 2‰ относительно зимней межени), чем в период снеготаяния в 2020 г., когда явного изменения изотопного состава воды реки не было отмечено, что обусловлено заметно меньшим снегонакоплением в зимний период 2019/2020 гг. по сравнению с зимним периодом 2020/2021 гг.

Выпадение изотопно легкого снега в зимний период не приводит к снижению изотопных ве-

личин в воде реки. В летний период (с мая по сентябрь) выпадение обильных дождей в большинстве случаев приводило к выраженному изменению изотопного состава воды реки (снижению или повышению значений  $\delta^{18}\text{O}$  на 1.0–2.3‰ в зависимости от изотопного состава осадков), сигнал летних дождей прослеживался уже через несколько часов или на следующие сутки после выпадения.

Авторы выражают признательность Н. Буданцеву (РТУ МИРЭА) за систематическую помощь в отборе речных вод.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Васильчук Ю.К., Буданцева Н.А., Васильчук А.К., Чижова Ю.Н. Изотопные методы в географии. Ч. 3. Геохимия стабильных изотопов атмосферы и гидросферы. М.: Геогр. фак. МГУ, 2013. 216 с.
2. Васильчук Ю.К., Буданцева Н.А., Васильчук Дж.Ю., Ерёмкина И.Д., Блудушкина Л.Б. Вариации значений  $\delta^{18}\text{O}$  и содержание водорастворимых солей в атмосферных осадках Москвы в 2014–2016 гг. // Вестн. МГУ. Сер. география. 2021. № 2. С. 35–43.
3. Литвиненко В.В., Фролов Д.М. Метеорологические особенности зимнего периода 2019/2020 года в Москве // Индикация состояния окружающей среды: теория, практика, образование. Тр. Седьмой международ. науч.-практ. конф. М.: Филинь, 2020. С. 56–66.
4. Фролова Н.Л., Киреева М.Б., Агафонова С.А., Евстигнеев В.М., Ефремова Н.А., Повалишников Е.С. Внутригодовое распределение стока равнинных рек Европейской территории и его изменение // Вод. хоз-во России: проблемы, технологии, управление. 2015. № 4. С. 4–20.
5. Чижова Ю.Н., Буданцева Н.А., Ефимова Л.Е., Лукьянова А.Н., Суркова Г.В., Васильчук Ю.К. Изотопно-кислородный состав атмосферных осадков и воды в речной системе средней Протвы // Вестн. Моск. ун-та. Сер. география. 2013. № 2. С. 84–93.
6. Bowen G.J., Ehleringer J.R., Chesson L.A., Stange E., Cerling T.E. Stable isotope ratios of tap water in the contiguous USA // Water Resour. Res. 2007. V. 43. W03419. doi:10.1029/2006WR005186.
7. Bowen G.J., Kennedy C.D., Liu Z., Stalker J. Water balance model for mean annual hydrogen and oxygen isotope distributions in surface waters of the contiguous United States // J. Geophys. Res. Biogeosci. 2011. V. 116. P. 1–14. <https://doi.org/10.1029/2010JG001581>
8. Chase C.A. Isotopic Composition of Precipitation and River Water: Measurement of  $\delta^2\text{H}$ ,  $\delta^{17}\text{O}$ ,  $\delta^{18}\text{O}$ , and  $^3\text{H}$  in Southeastern New Brunswick. Master thesis. New Brunswick: New Brunswick Univ. press, 2018. 124 p.
9. Chizhova J., Kireeva M., Rets E., Ekaykin A., Kozachek A., Veres A., Zolina O., Varentsova N., Gorbarenko A., Povalyaev N., Plotnikova V., Samsonov N., Kharlamov M. Stable isotope ( $\delta^{18}\text{O}$ ,  $\delta^2\text{H}$ ) signature of river runoff, groundwater and precipitation in three river basins in the center of East European Plain // Earth system Sci. Data. 2022. <https://doi.org/10.5194/essd-2022-145>
10. Dansgaard W. Stable isotopes in precipitation // Tellus. 1964. V. 16. № 4. P. 436–468.
11. Fekete B.M., Gibson J.J., Aggarwal P., Vorosmarty C.J. Application of isotope tracers in continental scale hydrological modeling // J. Hydrol. 2006. V. 330. P. 444–456. doi:10.1016/j.jhydrol.2006.04.029
12. Gat J.R., Bowser C.J., Kendall C. The contribution of evaporation from the Great Lakes to the continental atmosphere; estimate based on stable isotope data // Geophys. Res. Lett. 1994. V. 21. I. 7. P. 557–560. doi:10.1029/94GL00069
13. Gibson J.J., Aggarwal P., Hogan J., Kendall C., Martinnelli L.A., Stichler W., Rank D., Goni I., Choudhry M., Gat J., Bhattacharya S., Sugimoto A., Fekete B., Pietroniro A., Maurer T., Panarello H., Stone D., Seyler P., Maurice-Bourgoin L., Herczeg A. Isotope studies in large river basins: a new global research focus // Eos. 2002. V. 83. № 52. P. 613–617.
14. Gibson J.J., Holmes T., Stadnyk T.A., Birks S.J., Eby P., Pietroniro A.  $^{18}\text{O}$  and  $^2\text{H}$  in streamflow across Canada // J. Hydrol.: Regional Studies. 2020. V. 32. 100754. <https://rp5.ru>
15. Isotope tracers in catchment hydrology / Eds C. Kendall, J.J. McDonnell. Amsterdam: Elsevier, 1998. 803 p.
16. Iwatake K., Hirata H., Oda A., Okakita N., Ueda A. Isotope and chemical studies of groundwater in the Kurobe River alluvial fan, Toyama, Japan, for the efficient utilization of groundwater heat // Groundwater for Sustainable Development. 2022. V. 17. 100756. doi:10.1016/j.gsd.2022.100756
17. Kaiser A., Scheifinger H., Kralik M. et al. Links between meteorological conditions and spatial/temporal variations in long-term isotope records from the Austrian precipitation network. Vienna: IAEA, 2001. P. 57–59 (IAEA-CN-80/63).

19. Kendall C., Coplen T.B. Distribution of oxygen-18 and deuterium in river waters across the United States // *Hydrol. Processes*. 2001. V. 15. I. 7. P. 1363–1393. doi:10.1002/hyp.217
20. Koeniger P., Stumpp C., Schmidt A. Stable isotope patterns of German rivers with aspects on scales, continuity and network status // *Isotopes in Environmental and Health Studies*. 2022. V. 58. I. 4–6. P. 363–379. doi: 10.1080/10256016.2022.2127702.
21. Kuhlemann L.-M., Tetzlaff D., Soulsby C. Urban water systems under climate stress: An isotopic perspective from Berlin, Germany // *Hydrol. Processes*. 2020. V. 34. I. 18. P. 3758–3776. doi:1002/hyp.13850
22. Laonamsai J., Ichianagi K., Patsinghasanee S., Kamdee K., Tomun N. Application of stable isotopic compositions of rainfall runoff for evaporation estimation in Thailand Mekong River basin // *Water*. 2022. V. 14. P. 2803. https://doi.org/10.3390/w14182803
23. McGuire K.J., McDonnell J.J., Weiler M., Kendall C., McGlynn B.L., Welker J.M., Seibert J. The role of topography on catchment-scale water residence time // *Water Resour. Res.* 2005. V. 41. W05002. doi:10.1029/2004WR003657
24. Nagavciuc V., Bădăluță C.-A., Ionita M. Tracing the relationship between precipitation and river water in the Northern Carpathians base on the evaluation of water isotope data // *Geosci*. 2019. V. 9. P. 198. https://doi.org/10.3390/geosciences9050198
25. Nan Y., Tian F., Hu H., Wang L., Sihan Zhao S. Stable Isotope Composition of River Waters across the World // *Water*. 2019. V. 11. I. 9. P. 1760. doi:10.3390/w11091760
26. Rank D., Papesch W. Isotopic composition of precipitation in Austria in relation to air circulation patterns and climate // *Isotopic composition of precipitation in the Mediterranean Basin in relation to air circulation patterns and climate*. Vienna: IAEA, 2005. P. 19.
27. Rank D., Wyhlidal S., Schott K., Jung M., Heiss G., Tudor M. A 50 years' isotope record of the Danube River water and its relevance for hydrological, climatological and environmental research // *Acta zoologica bulgarica*. Suppl. 7. 2014. P. 109–115.
28. Rank D., Wyhlidal S., Schott K., Weigand S., Oblin A. Temporal and spatial distribution of isotopes in river water in Central Europe: 50-year experience with the Austrian network of isotopes in rivers // *Isotopes Environ. Health Stud.* 2018. V. 54. I. 2. P. 115–136. https://doi.org/10.1080/10256016.2017.1383906
29. Rozanski K., Araguas-Araguas L., Gonfiantini R. Isotopic patterns in modern global precipitation // *Climate change in continental isotopic records*. 1993. V. 78. P. 1–36. https://doi.org/10.1029/GM078p0001
30. Rozanski K., Gonfiantini R. Isotopes in climatological studies // *IAEA Bull.* 1990. V. 32. I. 4. P. 9–15.
31. Smith A., Welch C., Stadnyk T. Assessment of a lumped coupled flow-isotope model in data scarce Boreal catchments // *Hydrol. Process*. 2016. V. 30. P. 3871–3884. https://doi.org/10.1002/hyp.10835
32. Freyberg von J., Rücker A., Zappa M., Schlumpf A., Studer B., Kirchner J.W. Four years of daily stable water isotope data in stream water and precipitation from three Swiss catchments // *Sci. Data*. 2022. V. 9. P. 46. https://doi.org/10.1038/s41597-022-01148-1
33. Welp L.R., Randerson J.T., Finlay J.C., Davydov S.P., Zimova G.M., Davydova A.I., Zimov S.A. A high-resolution time series of oxygen isotopes from the Kolyma River: Implications for the seasonal dynamics of discharge and basin-scale water use // *Geophys. Res. Lett.* 2005. V. 32. P. L14401.
34. Wyhlidal S., Rank D., Schott K., Heiss G., Goetz J. Analysis of isotopic signals in the Danube River water at Tulln, Austria, based on daily grab samples in 2012 // *Isotopes Environ. Health Studies*. 2014. V. 50. Iss. 4. P. 448–460.
35. Yi Y., Gibson J.J., Cooper L.W., Hélie J.-F., Dick T.A. Synoptic and time-series stable isotope surveys of the Mackenzie River from Great Slave Lake to the Arctic Ocean, 2003 to 2006 // *J. Hydrol.* 2010. № 383. P. 223–232.
36. Zhu G., Liu Y., Shi P., Jia W., Zhou J., Liu Y., Ma X., Pan H., Zhang Y., Zhang Z., Sun Z., Yong L., Zhao K. Stable water isotope monitoring network of different water bodies in Shiyang River Basin, a typical arid river in China // *Earth System Sci. Data. Discussions*. 2021. https://doi.org/10.5194/essd-2021-79
37. Zykina N.N., Tokarev I.V., Vinograd N.A. Monitoring of stable isotopes ( $\delta^2\text{H}$ ,  $\delta^{18}\text{O}$ ) in precipitations of Moscow city (Russia): comparison for 2005–2014 and 1970–1979 periods // *Вестн. Санкт-Петербургского гос. ун-та. Науки о Земле*. 2021. Т. 66 (4). С. 723–733. https://doi.org/10.21638/spbu07.2021.405