

УДК 556.161

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ИЗОТОПНОГО СОСТАВА ВОДЫ ДЛЯ ОЦЕНКИ ВКЛАДА ЗИМНИХ И ЛЕТНИХ АТМОСФЕРНЫХ ОСАДКОВ В СТОК ВЕРХНЕЙ ОБИ В ПЕРИОД ОТКРЫТОГО РУСЛА¹

© 2024 г. Т. С. Папина^{a,*}, А. Н. Эйрих^{a,**}, С. С. Эйрих^a

^aИнститут водных и экологических проблем СО РАН, Барнаул, 656038 Россия

*e-mail: papina@iwep.ru

**e-mail: alnik@iwep.ru

Поступила в редакцию 27.07.2023 г.

После доработки 29.01.2024 г.

Принята к публикации 22.01.2024 г.

По данным трехлетнего (2020–2022 гг.) исследования стабильных изотопов (^2H , ^{18}O) в речной воде и атмосферных осадках холодного и теплого периодов года проведена оценка их вклада в речной сток равнинного участка Верхней Оби. Несмотря на превалирование дождевых осадков над снеговыми (до 2/3 годового количества), показано, что талые снеговые воды вносят существенный вклад в формирование речного стока в течение всего периода открытого русла: от 42 до 61% в зависимости от соотношения количеств снега и дождя, выпадавших в течение года.

Ключевые слова: стабильные изотопы воды, поверхностная вода, атмосферные осадки.

DOI: 10.31857/S0321059624040062 **EDN:** APOCST

Изучение процессов, связанных с поступлением и количественной оценкой вклада атмосферных осадков (дождя и снега) в поверхностный водный сток, необходимо для понимания гидрологического функционирования водосборных бассейнов, включая прогнозирование паводков, организацию безопасного водоснабжения и защиту водных экосистем водных объектов [6, 14, 33, 39]. Во многих исследованиях для определения доминирующих источников атмосферной влаги, выпадающей на поверхность водосбора, используют данные изотопного состава водяного пара и атмосферных осадков, а именно стабильные изотопы ^2H и ^{18}O [6, 14, 17, 18, 24, 26, 37–39].

Формирование изотопного состава поверхностных вод связано с основным гидрологическим циклом, геоморфологическими характеристиками водосбора, климатическими условиями местности, но, в первую очередь, во многом за-

висит от изотопного состава атмосферных осадков, выпадающих на территорию изучаемого водосборного бассейна [31, 34, 42]. В последние годы данные изотопного состава природных вод успешно используют в гидрологических моделях [19, 27], что помогает не только в понимании процессов круговорота воды, но и идентификации источников поступления водных масс. При этом данные изотопного состава поверхностной воды позволяют установить генетическую связь с источниками поступления водных масс в речной сток в годовом и сезонном масштабе [9, 29, 32], а также оценить вклад различных фаз весеннего половодья и паводков в речной сток [21, 23, 30, 33, 36].

Значительное количество работ по использованию стабильных изотопов воды в качестве индикаторов гидрологических процессов направлены на изучение водосборов умеренного и теплого климата, при этом недостаточно внимания уделяется водосборам с длительным сезонным снежным покровом, водные объекты которых имеют длительные периоды ледостава. К таким водным объектам относятся реки и водоемы юга Западной Сибири, которые значительную часть времени года находятся подо

¹ Работа выполнена в рамках государственного задания Института водных и экологических проблем СО РАН «Оценка сезонных особенностей атмосферного поступления и последующего распределения загрязняющих веществ на водосборной площади ключевых участков бассейна Оби в зависимости от природно-климатических условий».

льдом, а их водосборная площадь с середины ноября до середины апреля покрыта мощным снежным покровом. В водном балансе рек бассейна Верхней Оби, по оценочным данным авторов [8], главную роль играют талые снеговые воды, вклад которых может достигать до 60–80% от годового стока этих водотоков.

В настоящей работе содержания стабильных изотопов кислорода и водорода (^2H , ^{18}O) в атмосферных осадках холодного и теплого периодов года, а также в речной воде использованы для оценки вклада зимних (снег) и летних (дождь) атмосферных осадков в речной сток равнинного участка Верхней Оби в период открытого русла.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследуемый водосборный участок Верхней Оби (рис. 1) – типично равнинный, аэрографические барьеры на его территории практически полностью отсутствуют. Климатические особенности рассматриваемой территории определяются своеобразным положением Алтайского края на юге Западной Сибири [4]. Климат водосбора континентальный, характеризуется жарким летом и холодной зимой и формируется в результате частой смены воздушных масс, поступающих из Арктики, Средней Азии и Атлан-

тики. В холодный период года с октября по март преобладающие направления ветров – юго-западные [11]. Среднегодовая температура – положительная, $0.5 \div 2.1^\circ\text{C}$. Средние максимальные значения температуры июля $26 \div 28^\circ\text{C}$, средние минимальные значения января $(-20) \div (-24)^\circ\text{C}$. Снежный покров устанавливается в основном во второй декаде ноября, разрушается в первой декаде апреля, его высота в среднем составляет 40–60 см [13]. Рельеф изучаемой территории определяет Приобское плато и долина р. Оби и ее притоков. Левобережная часть территории водосбора Оби расположена на высоте 185–251 м, правый берег реки всюду пойменный, шириной до 10 км с многочисленными озерами, старицами и протоками [10, 15].

Водный режим на изучаемом участке реки формируется за счет снегового и ледникового питания, грунтовых вод и летних атмосферных осадков [7]. Среднегодовое количество осадков 433 мм, из которых ~ 65% выпадает в теплый период года [5]. Распределение осадков внутри года, благодаря близости гор, более равномерное, чем в остальных районах Приобской лесостепи, несколько увеличенное в летний период [4]. На равнинной территории Алтайского края в пределах водосборной площади Оби от г. Бийска (с. Верх-Обское $52^\circ 26.54'$ с.ш. $84^\circ 53.41'$ в.д.) до



Рис. 1. Картограмма расположения точек отбора в 2020–2022 гг.: а – места отбора проб поверхностной воды на участке Верхней Оби: от с. Верх-Обское до п. Гоньба (белые кружки); б – местоположение изучаемого водосбора на карте Российской Федерации.

г. Барнаула (п. Гоньба 53°20. 84' с.ш. 83°46.74' в.д.) среднегодовое количество осадков за изучаемый период менялось в интервале 425–453 мм [3]. Ледостав обычно устанавливается к середине ноября и сохраняется на протяжении 5 мес. Толщина ледового покрова на реке к концу зимнего периода достигает 0.9–1.1 м. В середине апреля (самые ранние сроки – первая декада апреля) происходит вскрытие Оби и начинается ледоход. Гидрограф Оби характеризуется растянутым весенне-летним половодьем, в котором можно выделить две волны, и низкой устойчивой осенней и зимней меженью. В период половодья на изучаемом участке Оби проходит до 70–80% объема годового водного стока [13, 15]. Первая волна половодья, связанная с таянием снегов на поверхности равнинного участка водосбора реки, проходит с конца апреля. На ее долю приходится 15–20% общего объема стока за весь период половодья. Воды первой волны половодья в значительной степени аккумулируются в русле Оби, редко выходя на пойму. Во время второй основной волны, наступающей в мае–июне и связанной с таянием снежного покрова и ледников в предгорьях и горах истоков Оби, наблюдаются максимальные уровни и затопление поймы на срок до 2–3 мес. [2].

Отбор проб поверхностной воды в створах равнинного участка Верхней Оби проводили на трех вертикалях (левый берег, середина, правый берег) раз в две недели с апреля по октябрь (с начала снеготаяния до ледостава) 2020–2022 гг. Картосхема мест отбора представлена на рис. 1. Отбор проб проводили с глубины 20 см от поверхности воды. Отобранные пробы помещали в герметично закрывающую пластиковую посуду и доставляли в лабораторию, где фильтровали через мембранный фильтр с диаметром пор 0.45 мкм с использованием стерильных шприцов и шприцевых насадок “Minisart NML Plus”.

Для исключения возможного влияния на снежный покров почвенной летне-осенней влаги при расчете раздельного вклада зимних и летних атмосферных осадков в речной сток Оби использованы средневзвешенные суммы зимних атмосферных осадков, отобранных в течение холодного периода в г. Барнауле. В работе [35] показано, что в южной части территории Западной Сибири к основным факторам, влияющим

на изменение исходного изотопного состава воды ($\delta^{18}\text{O}$ и δD) в слоях сезонного снежного покрова с момента его образования до начала стадии активного снеготаяния, можно отнести следующие: 1) вертикальный (между слоями) температурный градиент, который способствует “выравниванию” изотопного состава снега внутри снежной толщи; 2) почвенная влага, утяжеляющая изотопный состав контактирующего с почвой нижнего слоя снежного покрова при условии отсутствия промерзания почвы. При этом различия средневзвешенных по толщине снежного покрова значений изотопного состава интегральных проб (12 точек отбора на водосборе Верхней Оби от г. Бийска до г. Барнаула (рис. 1b в [35])) и средневзвешенных по количеству осадков сумм зимних атмосферных осадков, отобранных в г. Барнауле, не были статистически значимыми (табл. 1 в [35]). Природно-климатические особенности изучаемой территории и местоположение замыкающего створа относительно вышерасположенного участка водосбора позволяют использовать данные по изотопному составу атмосферных осадков в замыкающем створе и в период второй волны весеннего половодья. По данным GNIP (Global Net of Isotopic Precipitation), изменение (облегчение) изотопного состава кислорода в осадках при продвижении воздушных масс с юга на север (широтный градиент) составляет 0.6‰ на 1°, а в зависимости от высоты над уровнем моря (высотный градиент) – 0.2‰ на каждые 100 м [25]. В соответствии с [25], облегчение изотопного состава осадков по $\delta^{18}\text{O}$ в горных районах Алтая в интервале высот 1000–1500 м относительно равнинного участка будет составлять 2–3‰, а его утяжеление за счет широтного градиента относительно осадков, выпадающих в районе Барнаула, будет составлять 1.5–2.0‰. При этом на более низких высотах (ниже 1000 м) высотный и широтный градиенты будут полностью нивелировать друг друга. Таким образом, изотопный состав осадков в замыкающем створе можно использовать для оценки вклада летних и зимних атмосферных осадков в речной сток равнинного участка Верхней Оби от г. Бийска (входной створ, с. Верх–Обское) до г. Барнаула (замыкающий створ п. Гоньба).

Пробы атмосферных осадков собирали непосредственно после их выпадения в пункте отбора

осадков, расположенном в г. Барнауле на крыше здания Института водных и экологических проблем (ИВЭП) СО РАН на высоте 25 м от поверхности земли. Пробы дождевых осадков отбирали через воронку в пластиковую колбу-приемник. После окончания осадков колбу-приемник отсоединяли от воронки и передавали в лабораторию для проведения анализа. Пробы твердых атмосферных осадков (снег) в течение всего холодного периода собирали непосредственно после их выпадения. Снег собирали в съемный плотный полиэтиленовый мешок, закрепленный во входном отверстии бочки, оснащенной защитой от выдувания. Сразу после отбора пробы снега помещали в двойные плотно закрывающиеся полиэтиленовые пакеты и хранили до анализа в замороженном виде. Непосредственно перед инструментальным анализом образцы снега переносили в закрытые специально подготовленные пластиковые контейнеры [12] и плавил при комнатной температуре. Далее проводили измерение объема талой воды, а затем по аналогии с речными водами и дождевыми осадками полученные пробы фильтровали через мембранный фильтр с диаметром пор 0.45 мкм, из фильтрата отбирали 3–5 параллельных проб и помещали в герметичные пробирки, которые до начала изотопного анализа хранили в холодильнике.

Аналитические работы по определению изотопного (δD и $\delta^{18}O$) состава воды проводили в Химико-аналитическом центре ИВЭП СО РАН. Анализ проводили методом лазерной абсорбционной ИК-спектроскопии на приборе “PICARRO L2130-I” (“WS-CRDS”. Точность измерения δD и $\delta^{18}O$ (1σ , $n = 5$) составила ± 0.4 и $\pm 0.1\text{‰}$ соответственно. В качестве стандарта использовали Международные стандарты GRESP, USGS-47.

Основные экспериментальные и теоретические положения изотопной систематики дейтерия и кислорода-18 разработаны в работах Крейга и Дансгора (Н. Craig, W. Dansgaard) [20, 22] Изотопный состав водорода и кислорода выражается в относительных величинах δ^2H (δD) и $\delta^{18}O$:

$$\delta = \left[\left(R_{\text{пр}} / R_{\text{станд}} \right) - 1 \right] \times 1000\text{‰}, \quad (1)$$

$R_{\text{пр}}$ и $R_{\text{станд}}$ — отношения $^2H/^1H$ и $^{18}O/^{16}O$ в измеряемой пробе и в стандарте.

Связь между соотношением стабильных изотопов кислорода ($\delta^{18}O$) и водорода (δD) в атмосферных осадках описывается эмпирической зависимостью, получившей название “глобальная линия метеорных вод” (ГЛМВ) [20, 40]:

$$\delta D = 8 \delta^{18}O + 10. \quad (2)$$

Для отдельно взятого региона соотношение $\delta^{18}O$ и δD в осадках может описываться их локальной линией метеорных вод (ЛЛМВ), отклонение уравнения которой от ГЛМВ можно использовать для оценки изотопного фракционирования местных атмосферных осадков.

В гидрохимических исследованиях наряду с измеряемыми параметрами изотопного состава воды широко используют расчетный критерий — дейтериевый эксцесс (d_{exc}), предложенный Дансгором (W. Dansgaard) в 1964 г., который рассчитывается как:

$$d_{\text{exc}} = \delta D - 8 \delta^{18}O. \quad (3)$$

Параметр d_{exc} связан с кинетическими процессами изотопного фракционирования, которые характеризуют процессы испарения или замерзания. Образцы со значениями < 10 располагаются ниже ГЛМВ (рис. 2) и указывают на отклонение условий от равновесного фракционирования, т. е. вода подверглась испарению [22]. Сезонные вариации d_{exc} могут давать информацию об источниках поступления влаги и ее гидрологическом цикле, а также о влиянии местных климатических условий [41].

Для расчета средневзвешенных сезонных значений δD , $\delta^{18}O$ и d_{exc} в атмосферных осадках (дожде или снеге) использовали формулу:

$$X = \sum (X_i A_i / A), \quad (4)$$

где X — средневзвешенное значение δD , $\delta^{18}O$ или d_{exc} ; X_i — значение δD , $\delta^{18}O$ или d_{exc} в i -м дожде или снеге; A_i — количество осадков в i -м дожде или снегопаде, мм в.э.; A — общее за сезон количество осадков, мм в. э.

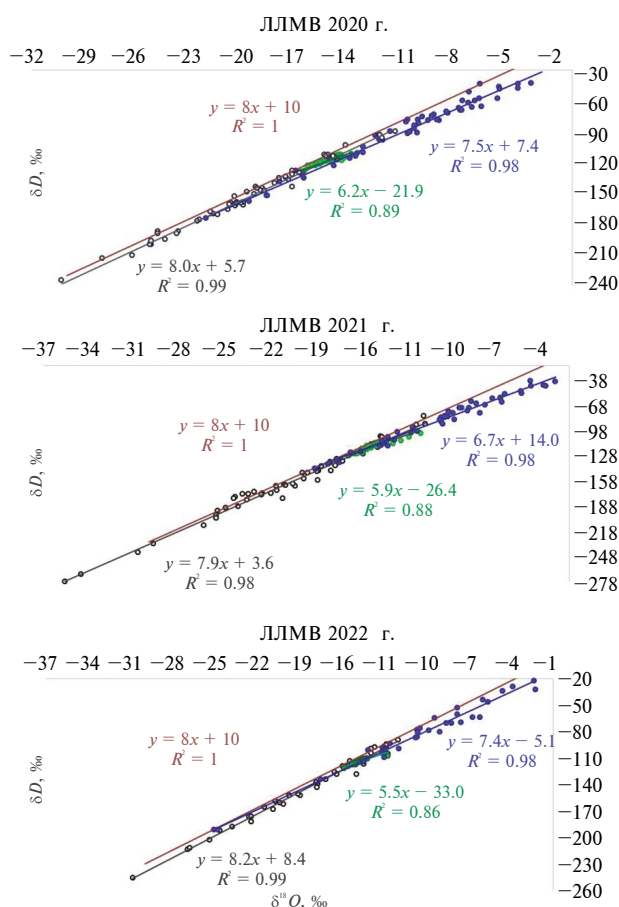


Рис. 2. Локальные линии метеорных вод для 2020–2022 гг. (речная вода, АО теплого и холодного периодов) и ГЛМВ.

Для расчета среднеквадратичного отклонения средневзвешенных сезонных значений δD , $\delta^{18}O$ и d_{exc} в атмосферных осадках (дожде или снеге) использовали формулу [16]:

$$\sigma_{\bar{x}} = \sqrt{\frac{\sum A_i (x_i - \bar{x})^2}{(A-1) \sum A_i}}, \quad (5)$$

где A_i – количество осадков в i -м единичном атмосферном выпадении, мм в.э; x_i – изотопный состав (δD , $\delta^{18}O$ и d_{exc}) осадков в i -м единичном атмосферном выпадении, ‰; $\bar{x}$ – средневзвешенное значение за изучаемый сезон (интервал времени), ‰; A – общее количество осадков за сезон (период времени), мм в. э.

Для оценки отдельного вклада зимних и летних осадков в водный сток Верхней Оби использовали уравнение, предложенное авторами [36]

для расчета вклада снега и дождя в сток Оби в период снеготаяния:

$$aX + b(1 - X) = c, \quad (6)$$

где X – доля вклада зимних и $(1 - X)$ – доля вклада летних атмосферных осадков в сток реки; a , b – средневзвешенное значение $\delta^{18}O$ (или δD) в атмосферных осадках соответственно холодного и теплого периодов года, ‰; c – среднее значение $\delta^{18}O$ (или δD) в воде равнинного участка Верхней Оби в период открытого русла, ‰.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Исследование поверхностной воды Верхней Оби показало, что в 2020–2022 гг. с апреля по октябрь ее изотопный состав варьировал в пределах от -17.4 до -11.9 ‰ по $\delta^{18}O$ и от -135.3 до -100.9 ‰ по δD , а средние значения изотопного состава воды были близки между собой в разные годы (табл. 1). Несколько иная картина наблюдалась для атмосферных осадков: изотопный состав дождевых (с апреля по октябрь) и снеговых (с ноября по март) осадков во все годы изменялся в широких, но близких по размаху варьирования пределах (табл. 1). При этом средневзвешенные значения изотопного состава внутри каждого сезона были близки между собой и варьировали, например, по $\delta^{18}O$ в пределах 0.7 ‰ для летних и 2.7 ‰ для зимних атмосферных осадков, в то время как разница между средневзвешенными значениями изотопного состава зимних и летних осадков была значительно больше. Таким образом, полученные средние значения изотопного состава речной воды и средневзвешенные (по количеству осадков) значения изотопного состава атмосферных выпадений (снег и дождь) можно использовать в качестве надежных исходных данных в гидрологических моделях и расчетах составляющих водного стока на водосборной площади Верхней Оби.

Средневзвешенные значения изотопного состава летних атмосферных осадков тяжелее зимних на 8 – 10 ‰ по $\delta^{18}O$ и на 60.1 – 76.1 ‰ по δD , а средние значения изотопного состава поверхностной воды относительно зимних и летних осадков были промежуточными. Значения дейтериевого эксцесса (табл. 1) указывают на то, что

Таблица 1. Изотопный состав поверхностной воды Верхней Оби и атмосферных осадков (дождь) за апрель–октябрь 2020 (1), 2021 (2) и 2022 гг. (3), а также атмосферных осадков (снег) за ноябрь–март 2019–2020 (1), 2020–2021 (2) и 2021–2022 гг. (3) (*n* – количество отобранных проб; ДИ – доверительный интервал среднего значения; $\sigma_{\bar{x}}$ – среднеквадратичная ошибка средневзвешенного значения; *Q* – количество снеговых и дождевых осадков в годовом разрезе, мм в. э.)

	$\delta^{18}\text{O}, \text{‰}$			$\delta\text{D}, \text{‰}$			$d_{\text{exc}}, \text{‰}$		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Поверхностная вода р. Оби									
Максимум	-13.7	-11.9	-12.8	-109.9	-100.9	-107.8	5.1	6.9	5.6
Минимум	-16.5	-17.4	-15.8	-127.3	-135.3	-121.8	2.7	2.3	3.5
Среднее	-15.0	-15.2	-14.8	-115.8	-117.0	-114.5	4.3	4.7	4.2
<i>n</i>	56	75	46	56	75	46	56	75	46
ДИ	0.2	0.2	0.2	1.1	1.2	0.8	0.8	0.8	0.5
Атмосферные осадки (дождь)									
Максимум	-2.7	-2.9	-1.7	-25.0	-37.7	-15.8	10.1	8.7	12.1
Минимум	-22.0	-18.9	-25.1	-173.9	-142.9	-191.3	-13.0	-15.9	-15.8
Среднее*	-10.7	-11.0	-10.3	-84.1	-86.0	-80.8	1.3	2.0	2.0
$\sigma_{\bar{x}}$	0.5	0.5	0.7	4.0	3.4	4.9	0.9	0.7	0.9
<i>Q</i>	215	278	237	215	278	237	215	278	237
<i>n</i>	56	47	42	56	47	42	56	47	42
Атмосферные осадки (снег)*									
Максимум	-11.1	-11.6	-12.0	-87.2	-79.8	-89.1	11.3	17.2	12.2
Минимум	-30.3	-35.6	-30.8	-235.4	-277.3	-245.7	-6.1	-9.5	-8.6
Среднее*	-18.7	-21.0	-18.3	-143.6	-162.1	-141.8	6.1	5.7	5.0
$\sigma_{\bar{x}}$	0.5	0.8	0.7	4.2	6.3	5.9	0.5	0.6	0.7
<i>Q</i>	170	115	120	170	115	120	170	115	120
<i>n</i>	53	54	37	53	54	37	53	54	37

* Средневзвешенное по количеству осадков.

среди всех изучаемых вод максимальное истощение воды атомами дейтерия (δD) относительно $\delta^{18}\text{O}$ приходится на летние атмосферные осадки (d_{exc} для средневзвешенных сезонных значений менялся в интервале 1.2–2.0‰), а минимальное истощение – для зимних осадков (d_{exc} менялся в интервале 5.0–6.1‰). Дейтериевый эксцесс речных водных проб, как и их изотопный состав, занимает промежуточное положение между зимними и летними атмосферными осадками.

На рис. 2 представлены ЛЛМВ для атмосферных осадков (дождь и снег) и речной воды на изучаемом участке реки в 2020–2022 гг. в сравнении с ГЛМВ. Как видно из рис. 2, во все изучаемые годы максимальное отличие угла наклона ЛЛМВ от угла наклона ГЛМВ наблюдается для речной воды и несколько меньшее для дождевых осадков, что указывает на заметное влияние испарительного фракционирования на изотопный состав этих вод. В отличие от дождя и речной воды, угол наклона ЛЛМВ для снеговых осад-

ков практически не отличается от угла наклона ГЛМВ. Рис. 2 наглядно показывает промежуточное положение проб речной воды на диаграмме зависимости $\delta^{18}\text{O}$ – δD , а также существенно меньший размах варьирования ее изотопного состава относительно проб атмосферных осадков.

В табл. 2 приведены рассчитанные средние значения изотопного состава речной воды в различные фазы водного режима Верхней Оби, а также средневзвешенные значения изотопного состава дождевых осадков, выпадавших на поверхность водосбора во время этих фаз. Временные рамки фаз водного режима определяли по гидрографу водомерного поста у г. Барнаула [1]. Как и следовало ожидать, наиболее легкий изотопный состав речной воды приходился на первую волну весеннего половодья, когда при малом количестве выпавших дождевых осадков влияние талого снегового стока на речной водный сток максимальный. Наиболее тяжелый изотопный состав воды отмечался в период летне-

Таблица 2. Средние значения изотопного состава воды Верхней Оби в различные фазы водного режима и средневзвешенные суммы дождевых осадков, выпадавших на поверхность водосбора в течение этих периодов в 2020–2022 гг. (*n* – количество проб, отобранных в течение данной фазы водного режима в 2020/2021/2022 гг.; в скобках – количество дождевых осадков, выпавших в течение фазы водного режима в 2020/2021/2022 гг.)

Объект исследования	$\delta^{18}\text{O}$, ‰			δD , ‰			d_{excess} , ‰		
	2020 г.	2021 г.	2022 г.	2020 г.	2021 г.	2022 г.	2020 г.	2021 г.	2022 г.
Первая волна весеннего половодья									
Речная вода (<i>n</i> = 17/22/14)	-15.7	-15.8	-15.0	-120.5	-121.9	-115.9	4.9	4.9	4.4
Дождевые осадки (5/4/24 мм)	-8.6	-5.0	-9.8	-60.3	-44.0	-74.3	8.5	-3.9	4.2
Вторая волна весеннего половодья									
Речная вода (<i>n</i> = 14/22/16)	-15.2	-15.5	-14.9	-116.6	-117.6	-115.0	4.7	6.2	4.0
Дождевые осадки (102/112/121мм)	-8.2	-9.1	-9.6	-65.9	-76.1	-76.4	-0.3	-3.3	0.3
Летне-осенняя межень									
Речная вода (<i>n</i> = 25/31/16)	-14.5	-14.4	-14.4	-112.4	-111.8	-111.5	3.5	3.8	4.0
Дождевые осадки (108/162/92 мм)	-12.7	-11.3	-11.5	-100.6	-88.3	-88.4	1.0	1.8	3.8

осенней межени, а вторая волна половодья характеризовалась промежуточными значениями относительно первой волны весеннего половодья и летне-осенней межени.

Для оценки вклада зимних и летних атмосферных осадков в водный сток Верхней Оби в различные фазы водного режима и в целом за весь период открытого русла в 2020–2022 гг. использовали уравнение (6). Но прежде чем использовать это уравнение для расчета вклада атмосферных осадков в речной сток, необходимо было оценить влияние грунтового стока и ледникового талого стока (которые также вносят свой вклад в водный сток Верхней Оби в период открытого русла) на правильность результатов данного расчета.

Объем грунтовых вод, связанных с руслом реки, и их изотопный состав формируют как атмосферные осадки, выпадающие на площадь водосбора, так и воды самой реки, причем во время половодья вклад грунтового стока в реку минимальный, в то время как в меженный период его вклад значительный. Изотопный состав грунтовых вод определяется соотношением в них дождевых и снеговых атмосферных осадков как

текущего года, так и предыдущих лет. Показано, что при максимальном вкладе грунтовых вод в речной сток на изучаемом участке Оби средние значения изотопного состава воды в конце периода ледостава (февраль–март) в течение четырех лет практически не менялись (табл. 3) и по своему значению были близки к средним значениям изотопного состава речной воды в период открытого русла (табл. 1), поэтому при расчете отдельного вклада летних и зимних атмосферных осадков в речной сток Верхней Оби можно использовать уравнение (6).

В отличие от грунтовых вод, талые ледниковые воды являются производными сезонных атмосферных выпадений прошлых столетий, причем для ледниковых вод атмосферные осадки – единственный первичный источник влаги. В работе [28] при сравнении изотопного состава слоев ледового ядра, отобранного на леднике Белуха (исток р. Катунь), с современными атмосферными осадками показано, что аккумуляция снега на поверхности ледника происходит в основном за счет летних атмосферных осадков, которых выпадает больше, чем в зимний период, и которые, в отличие от зимних осадков, хорошо удерживаются и меньше сдуваются с поверхно-

Таблица 3. Изотопный состав воды Верхней Оби в конце периода ледостава (февраль–март) 2018 г., 2020–2022 гг. (ДИ – доверительный интервал среднего; *n* – количество проб)

	$\delta^{18}\text{O}, \text{‰}$				$\delta\text{D}, \text{‰}$				$d_{\text{exc}}, \text{‰}$			
	2018	2020	2021	2022	2018	2020	2021	2022	2018	2020	2021	2022
Максимум	-15.0	-14.8	-14.7	-15.0	-112.8	-113.2	-113.5	-115.6	7.2	5.4	5.1	4.3
Минимум	-15.4	-15.2	-15.3	-15.4	-116.2	-116.9	-118.2	-118.7	5.5	4.7	4.1	4.0
Среднее	-15.2	-14.9	-15.0	-15.1	-114.8	-114.2	-115.2	-116.7	6.6	5.0	4.5	4.1
ДИ	0.3	0.3	0.3	0.3	2.4	2.9	2.3	2.2	1.3	0.5	0.5	0.2
<i>n</i>	4	4	5	4	4	4	5	4	4	4	5	4

Таблица 4. Вклад, %, зимних (снег) и летних (дождь) атмосферных осадков в формирование речного стока в различные фазы водного режима Верхней Оби в период открытого русла в 2020–2022 гг.

	2020 г.	2021 г.	2022 г.
За весь период открытого русла (апрель–октябрь)			
Снег	61	42	52
Дождь	39	58	48
*Снег/дождь	1:1.3	1:2.4	1:1.9
Первая волна весеннего половодья			
Снег	70	68	61
Дождь	30	33	39
Вторая волна весеннего половодья			
Снег	67	54	61
Дождь	33	46	39
Летне-осенняя межень			
Снег	30	32	43
Дождь	70	68	57

*Соотношение снеговых и дождевых осадков в годовом разрезе.

сти ледника. По данным авторов [28], пятилетние скользящие средние значения $\delta^{18}\text{O}$ в слоях ледникового керна, сформированных в течение последних 200 лет, изменялись в интервале от -14 до -12‰ . Эти значения наиболее близки к средневзвешенным значениям $\delta^{18}\text{O}$ в современных летних атмосферных осадках, выпадающих на территорию Верхней Оби (табл. 1).

Используя изотопные данные всех составляющих водного баланса, авторы статьи пришли к выводу, что вклад ледникового питания в водный баланс равнинного участка Верхней Оби даже во вторую волну половодья незначительный. На это указывает значительное преобладание площади сезонного снежного покрова над площадью многолетнего оледенения в горной части водосбора Верхней Оби, а также то, что изотопный состав речного стока во вторую волну половодья относительно первой волны утяжеляется незначительно, несмотря на существенное выпадение в этот период изотопно-тяжелых летних атмо-

сферных осадков (табл. 2). Если бы вклад талого ледникового стока был сопоставим с вкладом изотопно-облегченного сезонного снегового талого стока, то изотопный состав воды в речном стоке равнинного участка Верхней Оби во вторую волну половодья был бы значительно тяжелее. Таким образом, при оценке вклада зимних и летних атмосферных осадков в водный сток Верхней Оби влиянием ледникового талого стока можно пренебречь.

Результаты расчетов с использованием уравнения (6) приведены в табл. 4. Расчеты показали, что снеговые талые воды вносят существенный вклад в формирование водного речного стока в период открытого русла, несмотря на то, что до $2/3$ годового количества атмосферных осадков, выпадающих на водосбор Верхней Оби, приходится на летний период. Во время первой и второй волны половодья вклад талого снегового стока может достигать $60\text{--}70\%$ всего объема речного стока, поступая сначала с равнинной

части водосбора, а затем за счет снеготаяния в горах. При этом 30–40% речного стока Верхней Оби составляют дождевые осадки предыдущего года, которые смешиваются с талыми снеговыми водами при подъеме грунтовых вод на водосборной площади в период первой волны половодья [36]. В период летне-осенней межени вклад талых снеговых вод уменьшается до 30–40%, и их поступление в русло Верхней Оби в этот период может происходить только через грунтовые воды.

В целом для всего периода открытого русла вклад зимних атмосферных осадков в речной сток превалирует и зависит от соотношения количества снега, выпавшего в течение предыдущего зимнего периода, и количества дождя, выпавшего в последующий летний период. При соотношении количеств осадков холодного и теплого периодов 1.0 : 1.3 (зима 2019/2020 гг., лето 2020 г.), 1.0 : 1.9 (зима 2021/2022 гг., лето 2022 г.) и 1.0 : 2.4 (зима 2020/2021 гг., лето 2021 г.) вклад талого стока в речной сток в течение всего периода открытого русла составил соответственно 61, 52 и 42%.

ВЫВОДЫ

На основе анализа данных по изотопному составу (δD , $\delta^{18}O$) атмосферных осадков и поверхностных вод выполнена сравнительная оценка вклада зимних и летних атмосферных осадков в формирование речного стока на равнинном участке водосбора Верхней Оби в 2020–2022 гг.

Показано, что средние значения изотопного состава речной воды за период открытого русла, а также сезонные значения изотопного состава дождя и снега (средневзвешенные по количеству осадков) можно использовать в качестве надежных исходных данных в гидрологических моделях водного баланса для водосборной площади Верхней Оби.

Несмотря на то, что ~2/3 годового количества атмосферных осадков, выпадающих на водосбор Верхней Оби, приходится на летний период, анализ изотопных данных показал, что талые снеговые воды вносят существенный вклад в формирование речного стока в период открытого

русла. Установлено, что величина вклада зимних атмосферных осадков в речной сток превалирует и зависит от соотношения количества снега, выпавшего в течение предыдущего зимнего периода, и количества дождя, выпавшего в последующий летний период. Так, при соотношениях количеств осадков холодного и теплого периодов 1.0 : 1.3 (зима 2019/2020 гг., лето 2020 г.), 1.0 : 1.9 (зима 2021/2022 гг., лето 2022 г.) и 1.0 : 2.4 (зима 2020/2021 гг., лето 2021 г.) вклад талого стока в речной сток в период открытого русла составил 61, 52 и 42% соответственно. Тем самым показано, что поступление талых снеговых вод в реку происходит с плоскостным стоком с водосбора во время весеннего снеготаяния, за счет таяния сезонного снега в горах, а также через грунтовые воды (до самого ледостава).

Авторы выражают благодарность А. Котовщикову, М. Паниной и Л. Колотушкиной (ИВЭП СО РАН) за неоценимую помощь в проведении экспедиционных работ по отбору проб речной воды и атмосферных осадков.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Автоматизированная информационная система государственного мониторинга водных объектов (АИС ГМВО) [Электронный ресурс] <https://gmvo.skniivh.ru/>
2. Андреева И.В., Ротанова, И.Н., Цымбалей Ю.М. Проектирование водоохранных зон рек с нелинейным руслом (на примере участка реки Оби в черте города Барнаула) // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2012. № 2. С. 4–16.
3. Архив погоды в Алтайском крае. [Электронный ресурс]. https://tr5.ru/Архив_погоды_в_Алтайском_крае
4. Бородаев Б.В., Булатов В.И., Ведухина В.Г. и др. Барнаул. Научно-справочный атлас. Новосибирск: Инжгеодезия, 2006. С. 100.
5. Васильчук Ю.К., Рец Е.П., Чижова Ю.Н., Токарев И.В., Фролова Н.Л., Буданцева Н.А., Киреева М.Б., Лошакова Н.А. Расчленение гидрографа реки Джанкуат, Центральный Кавказ, с помощью изотопных методов // Вод. ресурсы. 2016. Т. 43. № 6. С. 579–594.
6. Вода России. Речные бассейны / Под ред. А.М. Черняева. М., 2002. 572 с.

7. Галахов В.П., Мардасова Е.В., Люцигер Н.В., Самойлова С.Ю. Влияние осеннего промерзания на максимальные уровни бассейна реки Чарыш // Изв. АО РГО. 2018. № 2 (49). С. 54–57.
8. Гейфе И.В., Алешина Н.И. Физико-географическая характеристика бассейна верхней Оби // Международ. журн. гуманитар. естествен. наук. 2019. № 11-2. С. 61–63. <https://doi.org/10.24411/2500-1000-2019-11752>
9. Гудков А.В., Токарев И.В., Толстихин И.Н. Формирование и баланс атмосферных осадков, поверхностных и подземных вод южных склонов Хибинского массива (по данным изотопного состава кислорода и водорода) // Вод. ресурсы. 2021. Т. 48. № 1. С. 90–99.
10. Марусин К.В., Дьяченко А.В., Коломейцев А.А., Вагнер А.А. Современное состояние и история развития русла реки Обь на территории города Барнаула // Изв. АО РГО. 2019. № 4 (55). С. 82–92.
11. Никольченко Ю.Н., Сухова М.Г. Ветроэнергетический потенциал Алтайского края как составляющая устойчивого развития региона // Вестн. рос. ун-тов. Математика. 2013. Т. 18. № 2. С. 663–667.
12. Папина Т.С., Эйрих А.Н., Малыгина Н.С., Эйрих С.С., Останин О.В., Яшина Т.В. Микроэлементный и изотопный состав снежного покрова Катунского природного биосферного заповедника (республика Алтай) // Лед и Снег. 2018. Т. 58. № 1. С. 41–55. doi:10.15356/2076-6734-2018-1-41-55
13. Харламова Н.Ф. Климат и сезонная ритмика природы Барнаула. Барнаул: АлтГУ, 2013. 132 с.
14. Чижова Ю.Н., Рец Е.П., Васильчук Ю.К., Токарев И.В., Буданцева Н.А., Киреева М.Б. Два подхода к расчету расчленения гидрографа стока реки с ледниковым питанием с помощью изотопных методов // Лед и Снег. 2016. Т. 56. № 2. С. 161–168. doi:10.15356/2076-6734-2016-2-161-168
15. Швецов А.Я., Горлов Э.А. Природные условия Барнаула. 2020. 178 с.
16. Энциклопедия по машиностроению XXL [Электронный ресурс]. <https://mash-xxl.info/page/020002005146222220186085022149189162081227171243/>
17. Buttle J.M., Peters D.L. Inferring hydrological processes in a temperate basin using isotopic and geochemical hydrograph separation: a re-evaluation // Hydrol. Process. 1997. V. 11. P. 557–573. [http://dx.doi.org/10.1002/\(sici\)1099-1085\(199705\)](http://dx.doi.org/10.1002/(sici)1099-1085(199705))
18. Buttle J.M., Sami K. Testing the groundwater ridging hypothesis of streamflow generation during snowmelt in a forested catchment // J. Hydrol. 1992. V. 135. P. 53–72. [http://dx.doi.org/10.1016/0022-1694\(92\)90080-F](http://dx.doi.org/10.1016/0022-1694(92)90080-F)
19. Bowen G.J., Cai Z., Fiorella R.P., Putman A.L. Isotopes in the Water Cycle: Regional-to Global-Scale Patterns and Applications // Ann. Rev. Earth Planet. Sci. 2019. V. 47. P. 453–479.
20. Craig H. Isotopic variations in meteoric waters // Sci. 1961. V. 133. P.1702–1703.
21. Dahlke H.E., Lyon S.W., Jansson P., Karlin T., Rosqvist G. Isotopic investigation of runoff generation in a glacierized catchment in northern Sweden // Hydrol. Process. 2014. V. 28 (3). P. 1383–1398. <http://dx.doi.org/10.1002/hyp.9668>
22. Dansgaard W. Stable isotopes in precipitation // Tellus. 1964. V. 16. P. 436–468.
23. Engel M., Penna D., Bertoldi G., Dell’Agnese A., Soulsby C., Comiti F. Identifying run-off contributions during melt-induced run-off events in a glacierized alpine catchment // Hydrol. Process. 2016. V. 30. P. 343–364. <http://dx.doi.org/10.1002/hyp.10577>
24. Feng M., Zhang W., Zhang S., Sun Z., Li Y., Huan Y., Wang W., Qi P., Zou, Y., Jiang M. The role of snowmelt discharge to runoff of an alpine watershed: Evidence from water stable isotopes // J. Hydrol. 2022. V. 604. P. 127209. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.127209>
25. Gat J.R., Mook W.G., Meijer A.J. Environmental isotopes in the hydrological cycle-Principles and applications. UNESCO/IAEA. 2001. V. 2. 113 p.
26. Gibson J.J., Aggarwal P., Hogan J. et al. Isotope studies in large river basins: a new global research focus // Eos. Trans. AGU. 2002. V. 83. P. 613–617.
27. He Z., Unger-Shayesteh K., Vorogushyn S. et al. Constraining hydrological model parameters using water isotopic compositions in a glacierized basin, Central Asia // J. Hydrol. 2019. V. 571. P. 332–348
28. Henderson K., Laube A., Gäggeler H.W., Olivier S., Papina T., Schwikowski M. Temporal variations of accumulation and temperature during the past two centuries from Belukha ice core, Siberian Altai // J. Geophys. Res.: Atmospheres. 2006. V. 111. D03104, doi:10.1029/2005JD005819
29. Jeelani G., Kumar U.S., Kumar B. Variation of d¹⁸O and dD in precipitation and stream waters across the Kashmir Himalaya (India) to distinguish and estimate the seasonal sources of stream flow // J. Hydrol. 2013. V. 481. P. 157–165. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.12.035>
30. Jin L., Siegel D.I., Lautz L.K., Lu Z. Identifying streamflow sources during spring snowmelt using water chemistry and isotopic composition in semi-arid mountain streams // J. Hydrol. 2012. V. 470–471. P. 289–301.

- <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.09.009>
31. Koeniger P., Leibundgut C., Stichler W. Spatial and temporal characterisation of stable isotopes in river water as indicators of groundwater contribution and confirmation of modelling results; a study of the Weser River, Germany // *Isot. Environ. Health Stud.* 2009. V. 45. P. 289–302.
 32. Liu F., Hunsaker C., Bales R.C. Controls of streamflow generation in small catchments across the snow–rain transition in the Southern Sierra Nevada, California // *Hydrol. Process.* 2012. V. 27 (6). P. 1959–1972. <http://dx.doi.org/10.1002/hyp.9304>
 33. Lucianetti G., Penna, D., Mastrorillo L., Mazza R. The Role of Snowmelt on the Spatio-Temporal Variability of Spring Recharge in a Dolomitic Mountain Group, Italian Alps // *Water*. 2020. V. 12. P. 2256. <https://doi.org/10.3390/w12082256>
 34. Ogrinc N., Kanduc T., Stichler W., Vreca P. Spatial and seasonal variations in $\delta^{18}\text{O}$ and δD values in the River Sava in Slovenia // *J. Hydrol.* 2008. V. 359. P. 303–312.
 35. Papina T., Eirikh A., Noskova T. Factors influencing changes of the initial stable water isotopes composition in the seasonal snowpack of the south of Western Siberia, Russia // *Applied Sci.* 2022. V. 12. № 2. P. 625. <https://doi.org/10.3390/app12020625>
 36. Papina T., Eirikh A., Kotovshchikov A., Noskova T. Impact of Snowmelt Conditions on the Isotopic Composition of the Surface Waters of the Upper Ob River during the Flood Period // *Water*. 2023. V. 15 (11). P. 096. <https://doi.org/10.3390/w15112096>
 37. Pearce A.J., Stewart M.K., Sklash M.G. Storm runoff generation in humid headwater catchments: 1. Where does the water come from? // *Water Resour. Res.* 1986. V. 22. P. 1263–1272. <http://dx.doi.org/10.1029/WR022i008p01263>
 38. Penna D., Mantese N., Hopp L., Dalla Fontana G., Borga M. Spatio-temporal variability of piezometric response on two steep alpine hillslopes // *Hydrol. Process.* 2015. V. 29. P. 198–211. <http://dx.doi.org/10.1002/hyp.10140>
 39. Penna D., Meerveld H.J., Zuecco G., Fontana G.D., Borga M. Hydrological response of an Alpine catchment to rainfall and snowmelt events // *J. Hydrol.* 2016. V. 537. P. 382–397.
 40. Rozanski K., Aragufis-Aragufis L., Gonfiantini R. Isotopic patterns in modern global precipitation. *Climate Change in Continental Isotopic Records* // *Geophys. Monog. Ser.* 1993. V. 78. P. 1–36.
 41. Tian L., Yao T., MacClune K., White J.W.C., Schilla A., Vaughn B., Vachon R., Ichiyangi K. Stable isotopic variations in West China: a consideration of moisture sources // *J. Geophys. Res.* 2007. V. 112. D10112. <http://doi.org/10.1029/2006JD007718>
 42. Živković K., Radulović M., Lojen S., Pucarević M. Overview of the Chemical and Isotopic Investigations of the Mareza Springs and the Zeta River in Montenegro // *Water*. 2020. V. 12.4. P. 957. <https://doi.org/10.3390/w12040957>