

# ГОРНОПРОМЫШЛЕННАЯ ГЕОЛОГИЯ, ГИДРОЛОГИЯ И ГЕОЭКОЛОГИЯ

УДК 550.4

DOI:10.7242/echo.2020.1.1

## ИЗОТОПНАЯ И ГЕОХИМИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ВОД р. СЫЛВА

А.С. Казанцева

*Горный институт УрО РАН, г. Пермь*

**Аннотация:** Речные воды являются важным компонентом гидрологического цикла и одним из факторов формирования состава подземных вод. Существенное значение имеют химический и изотопный состав речных вод, а также характер взаимоотношения речных вод с подземными. На основе количественных данных химического и изотопного состава речных вод совместно с данными изотопного состава местных атмосферных осадков решается один из главных вопросов гидрогеологических исследований: установление генезиса подземных вод.

Основной целью работы является изучение особенностей формирования изотопного ( $\delta^2\text{H}$  и  $\delta^{18}\text{O}$ ) и химического состава вод реки Сылвы в пределах Нижнесыльвинского и Кишертско-Суксунского карстовых районов. В работе приведены результаты исследований речных вод, полученные в период с апреля 2017 г. по май 2018 г.

По результатам исследований получены данные концентраций стабильных изотопов водорода и кислорода и основных макро- и микрокомпонентов, содержащихся в водах р. Сылвы. Установлено, что речные воды в зависимости от сезона имеют несколько источников питания. Проанализирована и выявлена взаимосвязь между речными водами и атмосферными осадками. Показаны временные характеристики передачи изотопного сигнала от атмосферных осадков к речным водам.

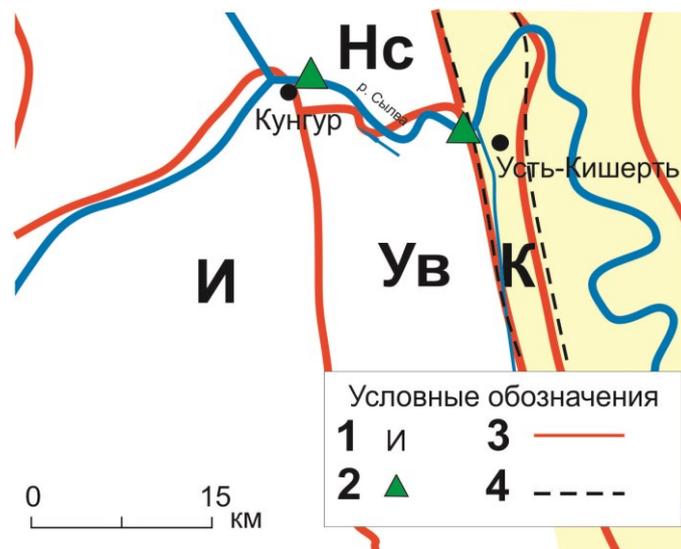
**Ключевые слова:** изотопы кислорода и водорода, химический состав, речные воды.

**Введение.** С начала 50-х гг. XX в. Кунгурская лаборатория-стационар проводит гидрохимическое изучение вод р. Сылва на территории г. Кунгур в пределах Нижнесыльвинского карстового района [2]. Начиная с 60-х гг. кафедра динамической геологии и гидрогеологии Пермского государственного национального исследовательского университета занимается изучением гидрохимических характеристик водных объектов на территории с. Усть-Кишерт Кишертско-Суксунского карстового района [1]. С позиций современных методик изучения состава вод начиная с 2014 г. сотрудники кафедры гидрогеологии ПГНИУ, с 2017 г. совместно с Кунгурской лабораторией-стационаром ГИ УрО РАН проводили исследования изотопного состава речных, подземных вод и атмосферных осадков.

В данной статье представлены результаты годового исследования изотопного состава ( $\delta^{18}\text{O}$ ,  $\delta^2\text{H}$ ; 24 пробы) вод р. Сылва, проведенного на территории г. Кунгур и с. Усть-Кишерт в пределах Нижнесыльвинского и Кишертского карстовых районов (рис. 1).

**Методы исследования.** Отбор проб речной воды на определение изотопных и гидрохимических параметров проводился с апреля 2017 г. по май 2018 г. На изотопный анализ пробы отбирались ежемесячно, на химический – весной и осенью (г. Кунгур), посезонно (с. Усть-Кишерт).

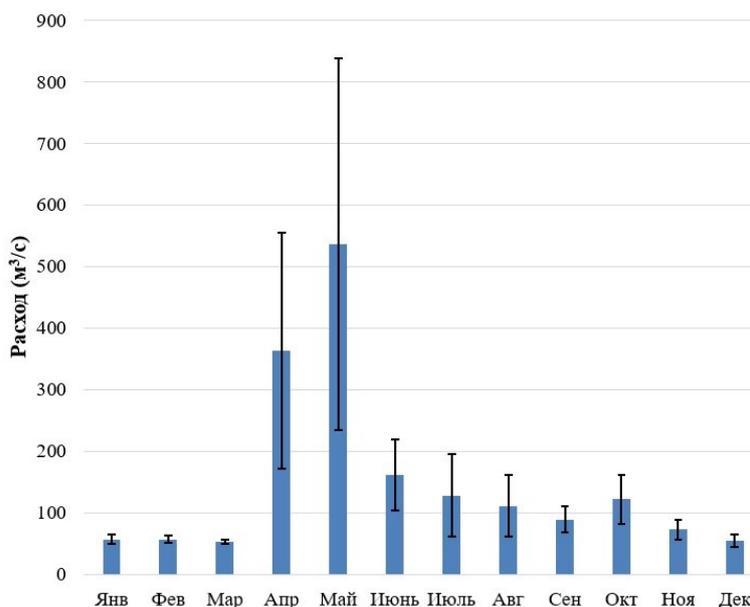
Изотопный состав ( $\delta^{18}\text{O}$  и  $\delta^2\text{H}$ ) речных вод определялся в Инсбрукском университете (Австрия) на анализаторе L-2130-i (Picarro, США). Результаты обрабатывались статистически и нормализовались относительно стандарта V-SMOW при погрешности  $\pm 0,1\%$  для  $\delta^{18}\text{O}$  и  $\pm 0,4\%$  для  $\delta^2\text{H}$ . Аналитические исследования химического состава вод производились в лаборатории ПГНИУ согласно стандартным методам и ГОСТам (ПНД Ф 14.1:2:4.167-2000, РД 52.24.403-2007, ПНД Ф 14.1:2:4.157-99, ГОСТ 31957-2012 п.5.4, ГОСТ Р 56219-2014)



**Рис. 1.** Местоположение станций наблюдения

1 – карстовые районы (по К.А. Горбуновой, 1992): И – Иренский; Нс – Нижнесыльвинский; К – Кишертско-Суксунский; Ув – Уфимского вала. 2 – точки отбора проб: г. Кунгур и с. Усть-Кишерть; 3 – границы карстовых районов. 4 – границы Кишертско-Иргинской водообильной зоны.

**Результаты исследования.** Река Сылва относится к Восточноевропейскому типу с четко выраженным весенним половодьем, летне-осенними дождевыми паводками и длительной устойчивой зимней меженью [7]. Бассейн р. Сылвы расположен в зоне умеренно континентального климата и характеризуется избыточным увлажнением. Ежегодно выпадает от 650 мм осадков (южная часть бассейна) до 800 мм (северная часть). Продолжительность залегания снежного покрова 170–180 дней. Высота снежного покрова около 80 см. Река Сылва относится к типу рек с преимущественно снеговым и дождевым питанием, доля подземного питания может составлять 15% [4]. Расход воды колеблется в значительных пределах (рис. 2), от минимума в  $53,1 \pm 4,0$  м<sup>3</sup>/с в марте до ярко выраженного максимума  $536,5 \pm 301,3$  м<sup>3</sup>/с в мае; среднегодовой расход составляет  $1804,5 \pm 277,6$  м<sup>3</sup>/с [5]. Река замерзает в ноябре, вскрывается в апреле.



**Рис. 2.** Среднемесячный расход воды р. Сылва (1948-1951 гг.). По данным гидрологического поста у д. Подкаменное. Вариабельность показана на уровне  $1\sigma$ .

Химический и изотопный состав р. Сылвы на территориях с. Усть-Кишерть (верхнее течение) и г. Кунгура (нижнее течение) подвержены сезонным изменениям, при этом воды имеют постоянный  $\text{HCO}_3\text{-SO}_4\text{-Ca}$  состав. Минерализация речной воды на обоих участках повышается от весеннего к осенне-зимнему периоду (табл. 1). Минимальная минерализация ( $384\text{-}475 \text{ мг/дм}^3$ ) зафиксирована весной. Зимой максимальную минерализацию воды р. Сылвы имеют в с. Усть-Кишерть ( $717,0 \text{ мг/дм}^3$ ), осенью – в г. Кунгуре ( $547 \text{ мг/дм}^3$ ). Наряду с этим, изотопный состав утяжеляется от весеннего ( $\delta^{18}\text{O} = -14,9\text{‰} \div -15,0\text{‰}$ ,  $\delta^2\text{H} = -107,4\text{‰} \div -109,3\text{‰}$ ) к летнему периоду ( $\delta^{18}\text{O} = -13,7\text{‰}$ ,  $\delta^2\text{H} = -100,7\text{‰}$ ; табл. 2).

Легкий изотопного состав, низкая минерализация и характер водного режима р. Сылвы в весенний период в верхнем и нижнем течениях указывает на преобладающую роль талых вод в питании реки в это время. В течение года изотопный состав речных вод несколько легче средневзвешенного состава атмосферных осадков ( $\delta^{18}\text{O} = -12,2\text{‰}$  и  $\delta^2\text{H} = -90,8\text{‰}$ ), что также указывает на преимущественно питание речных вод зимними осадками (рис. 3).

В связи с увеличением в питании речных вод доли относительно тяжелых атмосферных осадков теплого периода года ( $\delta^{18}\text{O} = -9,4\text{‰}$ ,  $\delta^2\text{H} = -70,2\text{‰}$ ; [3]) в летний период воды р. Сылвы имеют наиболее тяжелый состав ( $\delta^{18}\text{O} = -13,7\text{‰}$ ,  $\delta^2\text{H} = -100,7\text{‰}$ ). Изотопный состав вод р. Сылвы как в верхнем, так и в нижнем течениях в летний период в среднем наиболее близок к средневзвешенному составу атмосферных осадков ( $\delta^{18}\text{O} = -12,2\text{‰}$  и  $\delta^2\text{H} = -90,8\text{‰}$ ), но остается изотопически легкой, чем осадки этого периода.

Повышение минерализации речных вод в осенне-зимний период связано с их подпиткой подземными водами иренского горизонта, обусловленной тесной гидравлической связью между водами Кунгурской Ледяной пещерой и р. Сылвой, и филипповского горизонта – подток вод со стороны Уфимского вала. Доломитовые пласты филипповского горизонта играют роль барражей, препятствуя движению вод вкострости пород, и способствуют стоку к р. Сылве. В зимний период на берегах р. Сылвы можно наблюдать непрерывные выходы подземных вод из филипповских известняков и доломитов.

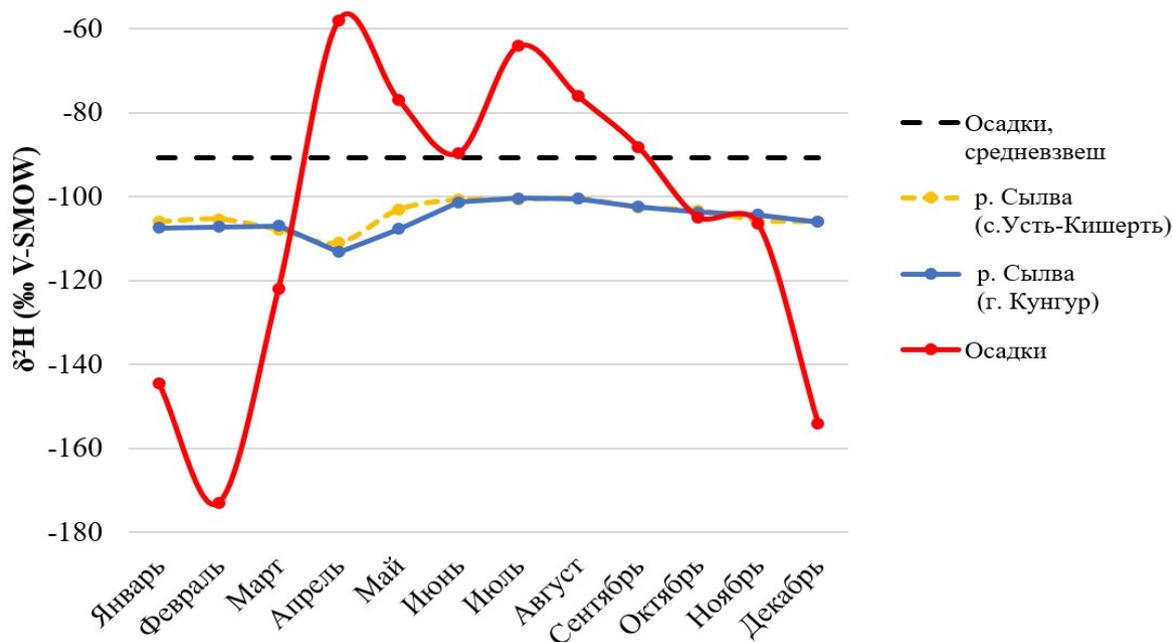


Рис. 3. Сезонный ход ( $\delta^2\text{H}$ ) изотопного состава речных вод

Таблица 1

Химический состав речных вод (мг/дм<sup>3</sup>)

Сезон	Точка отбора	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Cl <sup>-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	Минерализация	pH	Химический тип воды
Весна	2	299,4	116,8	15,7	0,8	0,2	84,1	14,8	13,3	0,5	0,5	475,0	7,3	Ca-HCO <sub>3</sub> -SO <sub>4</sub>
	1	195,0	82,0	14,8	0,2	0,2	68,3	11,5	12,1	0,5	0,5	384,0	7,1	Ca-HCO <sub>3</sub> -SO <sub>4</sub>
Лето	2	219,6	141,2	25,9	0,7	0,2	105,8	16,3	18,9	0,7	0,5	529,0	7,4	Ca-HCO <sub>3</sub> -SO <sub>4</sub>
Осень	2	262,3	186,7	37,1	3,8	0,2	133,7	19,6	25,6	0,7	0,5	671,0	7,2	Ca-HCO <sub>3</sub> -SO <sub>4</sub>
	1	244,0	138,9	26,6	1,2	0,2	100,2	17,2	18,4	0,6	0,5	547,0	8,1	Ca-HCO <sub>3</sub> -SO <sub>4</sub>
Зима	2	275,0	215,0	29,7	4,3	0,2	143,7	22,7	23,6	0,5	0,5	717,0	7,6	Ca-HCO <sub>3</sub> -SO <sub>4</sub>

Таблица 2

Среднегодовые и сезонные значения  $\delta^{18}\text{O}$  и  $\delta^2\text{H}$  речных вод (содержание в ‰)

	р. Сылва (с. Усть-Кишерть)		р. Сылва (г. Кунгур)	
	$\delta^{18}\text{O}$	$\delta^2\text{H}$	$\delta^{18}\text{O}$	$\delta^2\text{H}$
Количество измерений за год	12		12	
Среднегодовое значение	-14,4	-104,4	-14,4	-105,1
Лето 2017	-13,7	-100,7	-13,7	-100,7
Осень 2017	-14,3	-103,9	-14,3	-103,5
Зима 2017-2018	-14,6	-105,8	-14,7	-106,9
Весна 2018	-14,9	-107,4	-15,0	-109,3

Отмечено, что минерализация и изотопный состав речных вод изменяются вниз по течению. Весной и осенью минерализация уменьшается при движении воды от с. Усть-Кишерть к г. Кунгуру, при этом вод pH возрастает (табл. 1). Такое распределение связано с тем, что в Кишертско-Суксунском карстовом районе выделяется Кишертско-Иргинская водообильная зона (рис. 1), которая имеет тесную связь с новейшей глыбовоподвижной системой, приуроченной к разлому кристаллического фундамента платформы. Здесь обнаружены подруловые и поддолинные потоки карстовых вод, которые подпитывают речные воды, что приводит к повышению минерализации [6].

Изотопный состав в зимне-весенний период несколько облегчается при движении по течению, что связано с подпиткой речных вод в зимний период подземными водами облегченного изотопного состава и различными скоростями снеготаяния в весенний период. Изотопный состав подземных вод нижнего течения (г. Кунгур;  $\delta^{18}\text{O} = -15,1\text{‰} \div -15,2\text{‰}$ ,  $\delta^2\text{H} = -109,9\text{‰} \div -111,8\text{‰}$  по  $\delta^2\text{H}$ ) несколько легче подземных вод верхнего течения (с. Усть-Кишерть;  $\delta^{18}\text{O} = -14,8\text{‰} \text{ ч } -14,9\text{‰}$ ,  $\delta^2\text{H} = -107,5\text{‰} \text{ ч } -108,5\text{‰}$ ). В летний период концентрации стабильных изотопов постоянны, а осенью вниз по течению происходит утяжеление состава. Облегченный состав вод в осенний период в верхнем течении указывает влияние изотопно легких вод притока (р. Кишертка  $\delta^{18}\text{O} = -14,5\text{‰}$ ,  $\delta^2\text{H} = -105,7\text{‰}$ ) р. Сылвы у с. Усть-Кишерть.

Изотопный состав речных вод связан с изотопным составом атмосферных осадков в районе исследования. Корреляционный анализ показал, что между изотоп-

ным составом вод р. Сылвы в г. Кунгуре, с. Усть-Кишерти и атмосферными осадками существует умеренная ( $r = 0,40-0,45$  при  $r_{crit} = 0,53-0,58$ ), но статистически незначимая корреляция. При сдвиге данных изотопного состава рек относительно атмосферных осадков на 1 месяц для вод р. Сылвы на обоих участках наблюдается усиление корреляции ( $r = 0,54-0,57$ ). На графике сезонного хода изотопного состава (рис. 3) также прослеживается зависимость изотопного состава осадков и речных вод в зимне-весенний период с запаздыванием на 2 месяца. На основании корреляционного анализа можно сделать вывод, что происходит задержка передачи изотопного сигнала от атмосферных осадков к речным водам, что связано с изменением фазового состояния вод в зимние месяцы, а также временем «прохождения» осадков через стадию поверхностных и почвенных вод. Низкая корреляционная зависимость объясняется и тем, что в течение года питание речной воды смешанное и осуществляется не только атмосферными осадками, но и подземными водами.

**Выводы.** На основании изучения химического и изотопного состава речных вод установлено, что речные воды имеют несколько источников питания, но при этом химический тип воды остается неизменным. В зимний период, когда поверхностный сток почти отсутствует, доминирующая роль в питании рек принадлежит разгрузке подземных вод из иренского и филипповского горизонтов. Весной основным источником питания рек являются талые воды, летом и осенью – атмосферные осадки.

Смешанное питание обусловило низкую корреляционную зависимость изотопного состава речных вод с атмосферными осадками. Тем не менее, при сдвиге серии речных вод на 1 месяц (по графику на 2 месяца), корреляция усиливается. Последнее объясняется существованием «времени передачи» изотопного сигнала от атмосферных осадков к речной воде, которое определяется иммобилизацией осадков в виде снега в зимние месяцы, а также фильтрацией воды.

При движении вниз по течению установлено изменение изотопного и химического состава вод, обусловленное разными факторами: приуроченность к разломным зонам, разгрузка подземных вод разного изотопного и химического состава, влияние притока и скорость снеготаяния.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Горбунова К.А., Бутырина К.Г., Яценко Р.В. Карстовые озера // Труды Пятого совещания по химической географии вод и гидрогеохимии Пермской области. – Пермь, 1967. – Вып. 4(5). – С. 64-72.
2. Кунгурская ледяная пещера: опыт режимных наблюдений / ГИ УрО РАН; под ред. В.Н. Дублянского; [отв. ред. А.И. Кудряшов]. – Екатеринбург, 2005. – 376 с.: ил.
3. Казанцева А.С., Кадебская О.И., Дублянский Ю.В., Катаев В.Н. Результаты мониторинга изотопного состава атмосферных осадков на территории Северного и Среднего Урала // Метеорология и гидрология. – 2020. – №. 3 – С. 87-94.
4. Катаев В.Н., Копанцева Е.Н., Ермолович И.Г. Современный химический состав вод озер зоны сочленения Уфимского вала и Предуральяского прогиба // Вестн. Перм. ун-та. Сер. Геология. – 2017. – Том 16, № 4. – С. 340-353.
5. Максимович Г.А. Основы карстоведения. Т.2: Вопросы гидрогеологии карста, реки и озера карстовых районов, карст мела, гидротермокарст: учеб. пособие / Геогр. о-во СССР; Ин-т карстоведения и спелеологии; Перм. ун-т. – Пермь, 1969. – 529 с.
6. Михайлов Г.К., Оборин А.А. Подземная кладовая пресных вод Сылвенского кряжа / УрО РАН; Перм. гос. ун-т. – Пермь, 2006. – 154 с.
7. Вода России: Сылва: сайт. – Текст электронный. – URL: [https://water-f.ru/Водные\\_объекты/619/Сылва](https://water-f.ru/Водные_объекты/619/Сылва) (Дата обращения 23.03.2020).