ХАРАКТЕРИСТИКА ПОДЗЕМНЫХ ВОД В НИЖНЕПЕРМСКИХ ОТЛОЖЕНИЯХ СОЛИКАМСКОЙ ВПАДИНЫ

А. С. Казанцева

Пермский ФИЦ УрО РАН, Пермь
kazanalena@bk.ru

Соликамская впадина и прилегающие территории обладают значительными ресурсами подземных вод и огромными запасами пресных вод, которые являются уникальным источником для хозяйственно-питьевого и производственно-технического водоснабжения. Поэтому вопросы формирования состава подземных вод на территории Соликамской впадины являются актуальными.

Основной целью работы является изучение особенностей формирования изотопного ($\delta^2\text{H}$ и $\delta^{18}\text{O}$) и химического состава подземных вод нижнепермских отложений Соликамской впадины и прилегающей к ней Колвинской седловины.

Подземные воды в основном гидрокарбонатно-магниево-кальциевого состава с минерализацией 213–431 мг/дм³, их изотопный состав варьирует в пределах от –14.2 до –16.3 ‰ по $\delta^{18}\text{O}$ и от –107.3 до –119.4 ‰ по $\delta^2\text{H}$. Сезонные изменения изотопного состава (тяжелый — летом, легкий — весной) подземных вод, приуроченных к нижнепермским отложениям Соликамской впадины и Колвинской седловины, указывают на метеогенное влияние. При этом фиксируется задержка во времени (один–три месяца) передачи изотопного сигнала от атмосферных осадков к подземным водам. Повышение минерализации в зимний, весенний и летний периоды, а также увеличение содержания сульфатов и хлоридов предполагает перетекание вод из нижележащих горизонтов по зонам повышенной трещиноватости. Таким образом, подземные воды в нижнепермских отложениях Соликамской впадины имеют смешанное питание.

Ключевые слова: Соликамская впадина, нижнепермский горизонт, подземные воды, изотопный и химический состав, коэффициент корреляции Спирмена, корреляционный анализ.

CHARACTERISTICS OF UNDERGROUND WATERS IN THE LOWER PERMIAN SEDIMENTS OF THE SOLIKAMSKAYA DEPRESSION

A. S. Kazantseva

Mining Institute of the UB of the RAS, Perm

The Solikamskaya depression and adjacent territories have significant groundwater resources and huge fresh water reserves, which are a unique source for drinking, industrial and industrial water supply. Therefore, the issues of formation of the composition of groundwater water in the Solikamskaya depression are relevant.

The main purpose of this work is to study the features of the formation of isotopic ($\delta^2\text{H}$ and $\delta^{18}\text{O}$) and chemical compositions of groundwater in the Lower Permian sediments of the Solikamskaya depression and the adjacent Kolvinskaya saddle, which are unloaded within the Solikamskaya depression.

Groundwater is mainly hydrocarbonate-magnesium-calcium and sulfate-hydrocarbonate-magnesium-calcium composition with mineralization 213–431 mg/dm³, their isotopic composition varies from –14.2 to –16.3 ‰ in $\delta^{18}\text{O}$ and from –107.3 to –119.4 ‰ by $\delta^2\text{H}$. Seasonal changes in the isotopic composition (heavy composition in summer, light — in spring) of groundwater confined to the Lower Permian sediments of the Solikamskaya depression and Kolvinskaya saddle indicate the meteogenic impact on them. In this case, a time delay (one to three months) of the transmission of the isotope signal from precipitation to groundwater is recorded. An increase in mineralization in winter, spring and summer periods, as well as an increase in the content of sulfates and chlorides, suggests that water flows from the underlying horizons through zones of increased fracturing. Thus, groundwater in the Lower Permian deposits of the Solikamskaya depression has a mixed supply.

Keywords: Solikamsk depression, Lower Perm aquifer, groundwater, isotopic and chemical composition, Spearman's correlation coefficient, correlation analysis.

Введение

Целью данной работы является комплексное изучение подземных вод изотопными и гидрохимическими методами. Распространение, условия формирования и гидрохимические особенности подземных вод Соликамской впадины рассмотрены в работах И. Н. Шестова, Л. А. и И. А. Шимановских [5, 6], но эти исследования имеют лишь эпизодический харак-

тер. Изучение подземных вод изотопными методами на территории Соликамской впадины не проводилось.

Данные, полученные нами в результате комплексных исследований изотопного и химического состава подземных вод, позволяют уточнить гидрогеологическую характеристику, необходимую для решения вопросов происхождения вод, оценки состояния и качества водных ресурсов.

Для цитирования: Казанцева А. С. Характеристика подземных вод в нижнепермских отложениях Соликамской впадины // Вестник геонаук. 2020. № 8(308). С. 18—27. DOI: 10.19110/geov.2020.8.3.

For citation: Kazantseva A. S. Characteristics of underground waters in the Lower Permian sediments of the Solikamskaya depression. Vestnik of Geosciences, 2020, 8(308), pp. 18—27. DOI: 10.19110/geov.2020.8.3.

Методика работ

В работе изучался изотопный и химический состав подземных (природные источники) вод. Опробованные водопункты (рис. 1) расположены на севере Соликамской впадины, дополнительно обследованы источники западной границы Колвинской седловины. Пробы воды (104 шт.) отбирались с лета 2017 г. до весны 2018 г.: на химический анализ — посезонно (по 2 пробы три источника у п. Дивья, по 4 пробы осталь-

ные четыре источника и воды р. Колвы, всего 26), на изотопный — ежемесячно (12 проб атмосферных осадков, речных вод и четырех источников, из трех источников у п. Дивья отобрано 6 проб, всего 78). По результатам изотопного анализа были исключены две пробы атмосферных осадков (июнь, март), поскольку данные выходят за пределы вариации $\pm 1\text{‰}$ $\delta^{18}\text{O}$, что указывает на возможное испарение пробы в результате хранения и транспортировки. Одна весенняя проба (март) Вильгортского источника в результате анализа не получилась.

Анализ состава стабильных изотопов кислорода и водорода проводился в Инсбрукском университете (Австрия) на анализаторе L2130-i (Picarro, США). Значения приведены в ‰ относительно стандарта V-SMOW (где $\delta^2\text{H} = 0\text{‰}$ и $\delta^{18}\text{O} = 0\text{‰}$) при погрешности $\pm 0.1\text{‰}$ для $\delta^{18}\text{O}$ и $\pm 0.4\text{‰}$ (1σ) для $\delta^2\text{H}$. Значения изотопного состава показывает, насколько проба обеднена (знак «минус») или обогащена (знак «плюс») тяжелым изотопом в сравнении со стандартом. Для разных типов вод выделены определенные диапазоны изменения содержания стабильных изотопов, например для атмосферных осадков диапазон от $+4$ до -62‰ по $\delta^{18}\text{O}$ и от $+40$ до -500‰ по $\delta^2\text{H}$, для пресных вод $\delta^{18}\text{O} = -1\text{‰} \dots -45\text{‰}$, $\delta^2\text{H} = +10\text{‰} \dots -350\text{‰}$.

Определение химического состава проводилось 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) в гидрохимической лаборатории Пермского государственного национального исследовательского университета.

Для оценки влияния атмосферных осадков и речных вод на формирование изотопного состава ($\delta^2\text{H}$) подземных вод Соликамской впадины нами был использован корреляционный анализ. Изучались связи между изотопным составом подземных вод, атмосферных осадков и речных вод. Поскольку перечисленные признаки не подчиняются закону нормального

Рис. 1. Гидрогеологическая карта района исследований. Составлена по материалам Е. А. Иконникова, Л. А. Алексеевой, электронная версия А. В. Корякиной (Шиловой), Е. Н. Пыстоговой, 2017 [1, 7].

1. Исследуемые водопункты: 1 — Покчинский родник; 2 — источник Параскевы Пятницы; 3 — Вильгортский родник; 4 — р. Колва; 5 — Свято-Никольский родник; 6 — Вилипский родник; 7 — источник у входа в пещеру Дивья; 8 — источник Закаменка; 9 — водопад Алалай; 10 — источник у п/л «Жемчужина Урала»; 11 — р. Колва у п. Дивья; 12 — отбор атмосферных осадков с. Искор. 2. Гидрогеологические подразделения: аQ — водоносный локально-слабоводоносный четвертичный аллювиальный горизонт; P₁slk — водоносная соликамская терригенно-карбонатная свита; P₁k — водоносная кунгурская карбонатно-сульфатная серия; sP₁a-ar — водоносный ассельско-артинский терригенный комплекс; cP₁ — водоносная локально-слабоводоносная нижнепермская карбонатная серия; c.scC₂₋₃ — водоносная надзона средне- и верхнекаменноугольных карбонатных и терригенно-карбонатных пород; s.c.scD-C₁ — водоносная надзона девонско-нижнекаменноугольных терригенных карбонатных и терригенно-карбонатных пород; s.gR-D₁ — слабоводоносная локально-водоносная надзона рифейско-нижнедевонских терригенных и метаморфических кварцитовидных пород. 3. Границы крупных тектонических структур. 4. Тектоническое районирование: I — Колвинская седловина; II — Соликамская депрессия; III — передовые складки Урала. 5. Тектонические нарушения. Линия АВ — гидрогеологический разрез

Fig. 1. Hydrogeological map of the research area. The map is based on the materials of E. A. Ikonnikova, L. A. Alekseeva, electronic version of A. V. Koryakina (Shilova), E. N. Pystogovoi, 2017 [1, 7].

1. Studied water points: 1 — Pokchinsky spring; 2 — source of Paraskevya Pyatnitsy; 3 — Vil'gorsky spring; 4 — Colva River; 5 — Svyato-Nikol'sky spring; 6 — Vilipsky spring; 7 — source at the entrance to the cave Divya; 8 — source of Zakamenka; 9 — Alalai waterfall; 10 — source near the submarine ZHemchuzhina Urala; 11 — Colva River at the Divya Cave; 12 — selection of precipitation, the village of Iskor. 2. Hydrogeological units: aQ — Quaternary alluvial horizon; P₁slk — Solikamsk Formation; P₁k — Kungur series; sP₁a-ar — Assel-Artinsky complex; cP₁ — Lower Permian carbonate series; c.scC₂₋₃ — superzone of mid-upper Carboniferous rocks; s.c.scD-C₁ — superzone of Devonian-Lower Carboniferous rocks; s.gR-D₁ — Supervision of Riphean-Lower Devonian rocks. 3. Boundaries of large tectonic structures. 4. Tectonic zoning: I — Kolvinskaya saddle; II — Solikamskaya depression; III — Advanced folds of the Urals. 5. Tectonic disturbance. Line AB — hydrogeological section

распределения, взаимосвязь между ними оценивалась путем расчёта коэффициента ранговой корреляции Спирмена r_s . Проверка нормальности распределений по данным изотопного состава подземных вод, атмосферных осадков, речных вод проводилась тремя способами: с помощью описательной статистики (значения медианы, среднего арифметического, коэффициенты асимметрии и эксцесса), графически (квантильные диаграммы и гистограммы; нанесение точек на плоскость в координатах $x - z$, где x_i являются квантилями распределения того же вида, что и квантили стандартного нормального распределения $z(W)_i$, с использованием функции НОРМСТОБР), с использованием статистического критерия Шапиро – Уилка (вычисление по формуле $W = b^2/S^2$ и сравнение с табличным значением). Для расчёта статистических характеристик использовалась программа Microsoft Office Excel 2016. Статистическая оценка проводилась для заданного критического уровня значимости 0.05.

При расчете корреляционных взаимосвязей для исследуемых вод оказалось, что изотопные системы кислорода и водорода демонстрировали некоторые различия. В связи с этим в дальнейшем корреляция рассчитывалась по комбинированному параметру $(\delta^2H + 8 \times \delta^{18}O)/2$.

Результаты и обсуждение

Гидрогеологическое строение района исследований характеризуется этажностью. Здесь выделяются верхний и нижний гидрогеодинамические этажи [3]. Подземные воды в нижнепермских отложениях приурочены к верхнему гидрогеодинамическому этажу, который включает зону аэрации и зону субнапорных нисходяще-восходящих вод.

Зона субнапорных нисходяще-восходящих вод. В состав зоны входят водоносные и водоупорные комплексы (свиты, серии), залегающие полностью или частично в пределах исследуемого района ниже уровня долины реки Колвы (рис. 1, 2).

Данная гидродинамическая зона представлена низами соликамской терригенно-карбонатной свиты (P_{slk}), сложенной известняками, мергелями, песчаниками, алевролитами. Подошва рассматриваемой зоны соответствует нижней границе верхнего гидрогеодинамического этажа, которая проводится по кунгурскому региональному водоупору, представленному карбонатными и сульфатными породами. Невыдержанность водоупоров приводит к разделению горизонта на отдельные водообильные слои, что определяет и формирует химиче-

ский облик свиты и в ряде случаев обуславливает появление напорных вод.

К данной свите приурочен источник Параскевы Пятницы (точка отбора 2 на рис. 1). Сезонные изменения минерализации источника незначительны (258–274 мг/дм³; табл. 1). Подток из толщ гипса и ангидрита иренского и соликамского горизонтов в летний и весенний периоды приводит к увеличению сульфатов; подток из соленосных пород, залегающих в нижней части разреза Соликамской впадины, — к увеличению хлоридов в источнике и, следовательно, к минерализации. При этом в течение года воды имеют постоянный гидрокарбонатно-кальциевый состав.

Изотопный состав вод источника варьирует в небольших пределах: от –14.2 до –15.7 ‰ по $\delta^{18}O$ ($n = 12$) и от –107.5 до –111.8 ‰ по δ^2H ($n = 12$). Наиболее тяжелый состав ($\delta^{18}O = -14.2$ ‰ и $\delta^2H = -107.5$ ‰) характерен для летнего периода (июль; табл. 1), наиболее легкий ($\delta^{18}O = -15.8$ ‰ и $\delta^2H = -111.7$ ‰) — для зимнего (январь), что соответствует обычному сезонному распределению изотопного состава атмосферных осадков [2]. Значения $\delta^{18}O$ и δ^2H подземных вод легче годового медианного значения атмосферных осадков ($\delta^{18}O = -13.3$ ‰ и $\delta^2H = -97.3$ ‰; табл. 2) в течение всего года. Такое взаимоотношение указывает на преобладание питания подземных вод легкими атмосферными осадками зимнего и весеннего периодов.

Корреляционная связь между изотопными составами вод источника и атмосферных осадков (пары значений берутся для одних и тех же месяцев) не является статистически значимой ($r_s = 0.52$, $r_{s,0.05} = 0.58^*$, $n = 12$; рис. 3, а). Мы предположили, что для «прохождения» атмосферных осадков в водоносный горизонт требуется некоторое время. При сдвиге серии проб подземных вод на 1 месяц вперед относительно серии проб атмосферных осадков корреляционная связь между их изотопными составами уменьшилась ($r_s = 0.50$, $r_{s,0.05} = 0.60$, $n = 11$). На графике сезонного хода (рис. 4) в осенний период (октябрь) прослеживается изменение изотопного состава подземных вод в зависимости от изменения изотопного состава атмосферных осадков через 2 месяца, в зимний период (декабрь) — через 1 месяц. Кроме атмосферных осадков источником питания подземных вод данной свиты является подток вод нижележащих горизонтов, что подтверждается данными химического анализа.

*Критическое значение коэффициента корреляции Спирмена для заданного уровня значимости 0.05

Рис. 2. Схематический гидрогеологический разрез района исследований. Составлен по материалам отчета и геологического разреза А. В. Ревина, 1988 [4]. Красная пунктирная линия — тектонические нарушения

Fig. 2. Schematic hydrogeological section of the research area. The section is compiled from the materials of the report and the geological section A. V. Revina, 1988 [4]. Red dotted line — tectonic disturbances

Таблица 1. Гидрохимическая характеристика вод соликамской терригенно-карбонатной свиты (источник Параскевы Пятницы)

Table 1. Hydrochemical characteristics of the waters of the Solikamsk terrigenous-carbonate formation (Paraskey Pyatnitsy source)

Сезон Season 2017— 2018	Химический состав (мг/дм ³) ¹ / Chemical composition (mg/dm ³) ¹											Изотопный состав (‰) ² Isotope composition (‰) ²		Химический тип воды Chemical type of water	
	HCO ₃ [−]	SO ₄ ^{2−}	Cl [−]	NO ₃ [−]	NO ₂ [−]	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	NH ₄ ⁺	Минера- лизация Minerali- zation	pH	δ ¹⁸ O		δ ² H
Лето Summer	195.2	10.1	1.9	9.1	0.2	48.3	7.1	2.1	0.5	0.5	274.0	6.9	−14.2 ÷ −15.3	−107.5 ÷ −110.3	HCO ₃ -Ca
Осень Autumn	195.2	5.8	0.5	0.2	0.02	49.7	6.1	1.8	0.5	0.5	259.0	7.7	−15.2 ÷ −15.7	−109.1 ÷ −111.3	HCO ₃ -Ca
Зима Winter	185.0	5.9	0.5	1.4	0.2	53.0	7.1	2.2	0.5	0.5	258.0	7.8	−15.2 ÷ −15.8	−110.4 ÷ −111.7	HCO ₃ -Ca
Весна Spring	189.0	7.5	1.1	1.1	0.2	49.3	6.6	2.6	0.5	0.5	265.0	7.3	−15.1 ÷ −15.5	−109.8 ÷ −111.8	HCO ₃ -Ca

¹ Значения определены по результатам отбора 1 пробы в каждом сезоне (n = 1)

² интервал определен по трем пробам (n = 3).

¹ defined by the first sampling each season (n = 1).

² defined by three samples (n = 3).

Таблица 2. Сезонные и годовое медианное значения изотопного состава атмосферных осадков исследуемого района

Table 2. Seasonal and annual median values of the isotopic composition of precipitation in the study area

Сезон / Season	Лето / Summer (n = 2)		Осень / Autumn (n = 3)		Зима / Winter (n = 3)		Весна / Spring (n = 2)	
Изотопный состав Isotope composition	δ ¹⁸ O	δ ² H	δ ¹⁸ O	δ ² H	δ ¹⁸ O	δ ² H	δ ¹⁸ O	δ ² H
	-9.4 ÷ -9.9	-68.9 ÷ -68.0	-12.4 ÷ -15.9	-88.5 ÷ -121.8	-20.9 ÷ -25.1	-153.4 ÷ -185.7	-12.1 ÷ -20.2	-86.9 ÷ -150.9
Средневзвешенное значение Weight average	δ ¹⁸ O = -13.3 ‰ и δ ² H = -97.3 ‰							

Между изотопными составами (δ²H) вод источника и р. Колвы статистически значимой взаимосвязи не обнаружено ($r_s = 0.33$, $r_{s\ 0.05} = 0.58$, $n = 12$; рис. 3, б).

Контакт водоносного четвертичного аллювиально-карбонатной свиты (P₁slk). К этой зоне приурочены два выхода подземных вод: Покчинский (1) и Вильгортский (3) источники. Подземные воды гидрокарбонатно-магниево-кальциевого состава с минерализацией 246–431 мг/дм³ (табл. 3). Повышенные значения минерализации (284–431 мг/дм³) характерны для летнего и зимнего периодов. Такое распределение объясняется разгрузкой из нижележащих слоев соликамской свиты или иренского горизонта. Для Покчинского источника высокая минерализация зафиксирована и весной (279 мг/дм³), что связано с изолированностью от поверхностного руслового стока и перетоком из нижележащих отложений. Весной для Вильгортского источника, осенью для всех источников отмечено снижение минерализации (246–369 мг/дм³). В питании вод в это время принимают участие талые воды и осадки периода дождей. Вильгортский источник разгружается в зоне повышенной трещиноватости, поэтому содержание растворенных в воде веществ больше, чем в воде Покчинского источника.

Изотопный состав подземных вод изменяется по-сезонно, при этом легкий состав характерен для весен-

него периода (март – апрель; δ¹⁸O = -15.9...-16.3 ‰ и δ²H = -114.4...-119.4 ‰), тяжелый — для летнего (июль; δ¹⁸O = -14.2 ‰ и δ²H = -108.0...-108.7 ‰), что соответствует обычному распределению при питании вод атмосферными осадками. В питании преимущественно участвуют зимние и весенние осадки, поскольку значения δ¹⁸O и δ²H источников легче годового медианного значения атмосферных осадков (δ¹⁸O = -13.3 ‰ и δ²H = -97.3 ‰) и наиболее легкий состав вод характерен для весеннего периода. Интенсивные дожди в июле и августе привели к утяжелению изотопного состава Покчинского источника в октябре (рис. 4), то есть влияние изотопного состава атмосферных осадков проявилось через два месяца. Изотопный состав Вильгортского источника никак не отреагировал на интенсивные дожди в летний период. Статистически значимой корреляционной зависимости между изотопными составами (δ²H) осадков и водами источника Вильгортского не выявлено ($r_s = 0.47$, $r_{s\ 0.05} = 0.58$, $n = 12$; рис. 5, а), а с изотопным составом вод Покчинского источника имеет среднюю силу связи ($r_s = 0.59$, $r_{s\ 0.05} = 0.58$, $n = 12$). Сдвиг серии проб подземных вод на 1 месяц вперед относительно серии проб атмосферных осадков приводит к возрастанию корреляционной связи между изотопными составами Покчинского источника и атмосферными осадками, которая становится сильной и

Рис. 3. Изменение изотопного состава ($\delta^2\text{H}$) вод источника Параскевы Пятницы в зависимости от изотопного состава: а — атмосферных осадков; б — речных вод (р. Колва)

Fig. 3. Change in the isotopic composition ($\delta^2\text{H}$) of the waters of the Paraskeva Pyatnitsa spring from the isotopic composition: а — atmospheric precipitation; б — river waters (river Kolva)

Рис. 4. Сезонный ход изотопного состава ($\delta^2\text{H}$) подземных вод и атмосферных осадков

Fig. 4. Seasonal course of isotopic composition ($\delta^2\text{H}$) of groundwater and precipitation

статистически значимой ($r_s = 0.70$, $r_{s, 0.05} = 0.60$, $n = 11$). Корреляционная зависимость между изотопными составами Вильгортского источника и атмосферных осадков при сдвиге серии проб воды источника на 1 месяц вперед увеличилась, но осталась статистически незначимой ($r_s = 0.58$, $r_{s, 0.05} = 0.60$, $n = 11$). По графику сезонного хода осенью (октябрь) прослеживается изменение изотопного состава источников через 2 месяца после выпадения осадков, а зимой, в феврале, — на 3 месяца, что также предполагает небольшую задержку во времени поступления атмосферных вод в водоносный горизонт. Изотопные составы ($\delta^2\text{H}$) вод р. Колвы и источников не имеют прямых взаимосвязей ($r_s = 0.48$; 0.55 , $r_{s, 0.05} = 0.58$, $n = 12$; рис. 5, б).

Для источников, разгружающихся на контакте соликамской терригенно-карбонатной свиты и четвертичного аллювиального горизонта, отмечена зависимость изменения химического и изотопного состава. Разгрузка вод из нижележащих водоносных слоев приводит к увеличению минерализации и утяжелению изотопного состава источника. Такое распределение изотопно-гидрохимических характеристик характерно для обоих источ-

ников в летний период, для одного (Вильгортский) — только в зимний. Из вышесказанного следует, что воды нижележащих горизонтов имеют повышенную минерализацию и тяжелый состав по сравнению с подземными водами на контакте соликамской терригенно-карбонатной свиты и четвертичного аллювиального горизонта.

Нижнепермская водоносная кунгурская сульфатно-карбонатно-терригенная свита (P_1k). Рассматриваемую кунгурскую водоносную свиту можно характеризовать как сложную систему водоносных пластов и линз, переслаивающихся с водонепроницаемыми породами. По литологическому составу отличается большим разнообразием, связанным со сменой в западном направлении преимущественно песчаных отложений кошелевской свиты глинисто-мергельными породами поповской свиты. Фациальные изменения толщи по простиранию определяют отсутствие более или менее выдержанных на большом протяжении водоносных комплексов. Водоносными породами являются песчаники, конгломераты, известняки, мергели, алевролиты. Водоупорами служат нетрещиноватые разности этих пород, а также глины и мергели [3].

Таблица 3. Гидрохимическая характеристика вод контакта соликамской терригенно-карбонатной свиты и четвертичного аллювиального горизонта

Table 3. Hydrochemical characteristics of the contact waters of the Solikamsk terrigenous-carbonate formation and the Quaternary alluvial horizon

Сезон Season 2017–2018	Точка отбора на рис. 1 Samplig point in Fig. 1	Химический состав / Chemical composition (мг/дм ³) ¹												Изотопный состав (‰) ² Isotope composition (‰) ²		Химический тип воды Chemical type of water
		HCO ₃ [–]	SO ₄ ^{2–}	Cl [–]	NO ₃ [–]	NO ₂ [–]	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	NH ₄ ⁺	Минерализация Mineralization	pH	δ ¹⁸ O	δ ² H	
Лето Summer	1	207.4	13.5	2.7	1.4	0.2	44.3	11.6	2.5	0.7	0.5	284.0	7.2	–14.2 ÷ –15.5	–108.7 ÷ –111.4	HCO ₃ -Ca-Mg
	3	286.7	34.2	8.4	7.9	0.2	69.0	19.7	3.6	0.8	0.6	431.0	7.3	–14.2 ÷ –15.3	–108.0 ÷ –110.4	HCO ₃ -Ca-Mg
Осень Autumn	1	183.0	8.9	1.0	0.2	0.0	41.1	10.0	2.0	0.5	0.5	246.0	7.9	–15.3 ÷ –15.5	–109.8 ÷ –112.1	HCO ₃ -Ca-Mg
	3	250.1	26.8	3.9	4.5	0.3	62.4	16.8	3.0	0.6	0.5	369.0	7.7	–15.3 ÷ –15.4	–111.5 ÷ –111.7	HCO ₃ -Ca-Mg
Зима Winter	1	188.0	11.8	1.4	0.9	0.2	50.9	12.3	2.9	0.7	0.5	271.0	7.2	–15.3 ÷ –15.5	–111.9 ÷ –112.2	HCO ₃ -Ca-Mg
	3	256.0	18.6	4.2	6.2	0.2	69.6	18.4	4.3	1.2	0.9	381.0	7.3	–14.9 ÷ –15.7	–109.7 ÷ –112.7	HCO ₃ -Ca-Mg
Весна Spring	1	196.0	13.4	1.6	1.3	0.2	45.7	11.4	2.3	0.5	0.5	279.0	7.8	–15.1 ÷ –15.9	–111.1 ÷ –114.4	HCO ₃ -Ca-Mg
	3	217.0	13.5	10.7	6.0	0.2	56.2	12.6	2.8	1.7	0.5	327.0	7.6	–15.2 ÷ –16.3	–110.6 ÷ –119.4 ³	HCO ₃ -Ca-Mg

¹ значения определены по результатам отбора 1 пробы в каждом сезоне (n = 1).

² интервал определен по трем пробам (n = 3).

³ интервал определен по двум пробам (n = 2).

¹ defined by the first sampling each season (n = 1).

² defined by three samples (n = 3).

³ defined by two samples (n = 2).

Рис. 5. Изменение изотопного состава ($\delta^2\text{H}$) вод Покчинского и Вильгортского источников в зависимости от изотопного состава: а — атмосферных осадков; б — речных вод (р. Колва)

Fig. 5. Change in the isotopic composition ($\delta^2\text{H}$) of the waters of the Pokchinsky and Vilgortsky springs from the isotopic composition: а — atmospheric precipitation; б — river waters (river Kolva)

Рис. 6. Изменение изотопного состава ($\delta^2\text{H}$) воды Свято-Никольского источника в зависимости от изотопного состава: а — атмосферных осадков; б — речных вод (р. Колва)

Fig. 6. Change in the isotopic composition ($\delta^2\text{H}$) of the water of the Svyato-Nikol'sky spring from the isotopic composition: а — atmospheric precipitation; б — river waters (river Kolva)

К свите приурочены источник у входа в п. Дивья (7), источник Закаменка (8) и водопад Алалай (9). По химическому типу подземные воды относятся к гидрокарбонатно-магниево-кальциевым (табл. 4). Минерализация вод небольшая (213.0–298.0 мг/дм³), изотопный состав однороден ($\delta^{18}\text{O} = -15.1...-15.6$ ‰ и $\delta^2\text{H} = -108.4...-111.7$ ‰). Наиболее легкий состав характерен для летнего периода, утяжеляясь к осени. Поскольку данных по другим сезонам нет, то можно предполагать, что для поступления вод в горизонт требуется около трех месяцев, поскольку легкий состав свойствен осадкам зимнего и весеннего периодов. Формирование вод этого типа происходит за счет атмосферных осадков зимнего периода, поскольку зна-

чения $\delta^{18}\text{O}$ и $\delta^2\text{H}$ легче медианных значений атмосферных осадков района ($\delta^{18}\text{O} = -13.3$ ‰ и $\delta^2\text{H} = -97.3$ ‰), и за счет растворения вмещающих карбонатных пород.

Водоносный ассельско-артинский терригенный комплекс (Р_{1a-ar}) объединяет терригенные фации ассельского, сакмарского и артинского ярусов, представленные песчаниками, аргиллитами с прослоями и линзами конгломератов, известняков и мергелей. Характерной особенностью этих отложений является фациальная невыдержанность прослоев, замещение одних пород другими и полное отсутствие загипсованности, что отличает их от кунгурских терригенных отложений. Водоносными являются прослой и линзы конгломератов, песчаников, реже алевролитов, мергелей, известня-

Таблица 4. Гидрохимическая характеристика вод кунгурской карбонатно-сульфатной серии

Table 4 Hydrochemical characteristics of the waters of the Kungur carbonate-sulfate series

Сезон Season 2017–2018	Точка отбора English	Химический состав/ Chemical composition (мг/дм ³) ¹												Изотопный состав (‰) ¹ Isotope composition (‰) ¹		Химический тип воды Chemical type of water
		HCO ₃ [–]	SO ₄ ^{2–}	Cl [–]	NO ₃ [–]	NO ₂ [–]	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	NH ₄ ⁺	Минерализация Mineralization	pH	δ ¹⁸ O	δ ² H	
Лето Summer	7	172.0	28.2	6.9	0.8	0.2	46.8	14.4	5.8	0.5	0.5	285.0	7.8	–15.6	–111.7	HCO ₃ –Ca-Mg
	8	188.0	28.0	6.5	0.6	0.2	47.5	14.5	5.3	0.5	0.5	298.0	7.0	–15.4	–111.0	HCO ₃ –Ca-Mg
	9	145.0	4.0	0.5	0.4	0.2	49.4	2.6	1.5	0.5	0.5	213.0	8.0	–15.1	–109.0	HCO ₃ –Ca
Осень Autumn	7	189.1	24.7	6.3	1.0	0.0	44.3	14.2	4.9	0.5	0.5	285.0	7.1	–15.2	–110.5	HCO ₃ –Ca-Mg
	8	195.2	22.7	4.6	1.1	0.0	44.3	14.0	4.3	0.5	0.5	287.0	7.7	–15.3	–110.2	HCO ₃ –Ca-Mg
	9	170.8	4.2	0.5	1.1	0.0	47.5	2.5	1.4	0.5	0.5	228.0	8.2	–15.1	–108.4	HCO ₃ –Ca

¹ данные представлены по результатам отбора одной пробы в каждом сезоне (n = 1)¹ defined by the first sampling each season (n = 1).

Таблица 5. Гидрохимическая характеристика вод ассельско-артинского терригенного комплекса (Свято-Никольский источник)

Table 5. Hydrochemical characteristics of the waters of the Assel-Artinsky terrigenous complex (Svyato-Nikol'skij source)

Сезон Season 2017–2018	Химический состав (мг/дм ³) ¹ / Chemical composition (mg/dm ³) ¹											Изотопный состав (‰) ² Isotope composition (‰) ²		Химический тип воды Chemical type of water
	HCO ₃ [–]	SO ₄ ^{2–}	Cl [–]	NO ₃ [–]	NO ₂ [–]	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺⁺ K ⁺	NH ₄ ⁺	Минерализация Mineralization	pH	δ ¹⁸ O	δ ² H	
Лето / Summer	207.4	61.3	4.2	9.4	0.2	61.8	16.0	3.6	0.5	364.0	7.2	–14.4 ÷ –15.0	–107.3 ÷ –109.3	HCO ₃ –SO ₄ –Ca-Mg
Осень / Autumn	195.2	53.8	1.6	9.0	0.29	59.2	13.6	2.8	0.5	335.0	7.9	–15.0 ÷ –15.1	–107.7 ÷ –110.2	HCO ₃ –SO ₄ –Ca-Mg
Зима / Winter	195.0	56.8	1.4	8.9	0.2	64.9	16.0	3.8	0.7	349.0	7.2	–14.8 ÷ –15.5	–108.8 ÷ –110.0	HCO ₃ –SO ₄ –Ca-Mg
Весна / Spring	196.0	59.3	1.6	8.9	0.2	65.5	13.1	2.8	0.5	354.0	7.8	–14.6 ÷ –15.3	–108.1 ÷ –110.9	HCO ₃ –SO ₄ –Ca-Mg

¹ значения определены по результатам отбора 1 пробы в каждом сезоне (n = 1).² интервал определен по трем пробам (n = 3).¹ defined by the first sampling each season (n = 1).² defined by three samples (n = 3).

ков, водоупорными — глины, алевролиты и нетрещиноватые разности песчаников. Невыдержанность водоносных прослоев, залегание их среди водоупорных слоев, часто отсутствие между ними гидравлической связи заставляет объединить эти породы в водоносный комплекс [3]. Родники с высокими дебитами тяготеют к трещиноватым зонам и тектоническим нарушениям.

Водоносный ассельско-артинский терригенный комплекс охарактеризован на основании данных по Свято-Никольскому источнику (табл. 5). Опробованный источник сульфатно-гидрокарбонатно-магниево-кальциевого состава с небольшой минерализацией 335.0–364.0 мг/дм³ и относительно постоянным изотопным составом ($\delta^{18}\text{O} = -14.4...-15.5\text{‰}$ и $\delta^2\text{H} = -107.3...-110.9\text{‰}$). Химический состав источника соответствует составу атмосферных осадков осеннего и зимнего периодов. Гидрокарбонат-ион является главным компонентом вод ассельско-артинского комплекса, водоносными породами этого комплекса являются конгломераты, песчаники, мергели и известняки. Присутствие сульфатов и хлоридов объясняется приуроченностью источника к трещиноватой зоне, по которой возможно поступление вод повышенной минерализации, поскольку в данном комплексе отсутствуют сульфаты и соли.

Летний период характеризуется повышенной концентрацией ионов (HCO_3^- , SO_4^{2-} и Cl^-), минерализацией (364 мг/дм³) и обогащением вод тяжелыми изотопами ($\delta^{18}\text{O} = -14.4\text{‰}$, $\delta^2\text{H} = -107.3\text{‰}$; июль; табл. 5). Весной отмечен наиболее легкий состав вод ($\delta^{18}\text{O} = -15.3\text{‰}$, $\delta^2\text{H} = -110.9\text{‰}$; март), при этом минерализация повышена (354 мг/дм³) в отличие от осеннего периода. С одной стороны, это свидетельствует об их изолированности от поверхностного стока. То есть высокие значения минерализации в весенний, а также в летний периоды указывают на разгрузку вод из нижележащих горизонтов, имеющих повышенную минерализацию. С другой стороны, легкий изотопный состав весной говорит о прямой связи с осадками. Установлена статистически значимая корреляционная взаимосвязь между изотопными составами ($\delta^2\text{H}$) осадков и вод источника ($r_s = 0.65$, $r_{s,0.05} = 0.58$, $n = 12$; рис. 6, а). При сдвиге серии проб подземных вод на 1 месяц вперед относительно серии проб атмосферных осадков корреляционная связь между изотопными составами вод источника и атмосферных осадков усиливается и становится средней силы ($r_s = 0.66$, $r_{s,0.05} = 0.60$, $n = 11$). По графику сезонного хода изотопного состава (рис. 4) отчетливо прослеживается, что изотопный состав источника реагирует на изотопный состав летних осадков через два месяца. Взаимосвязь между изотопным составом ($\delta^2\text{H}$) вод источника и вод р. Колвы не обнаружена ($r_s = 0.57$, $r_{s,0.05} = 0.58$, $n = 12$; рис. 6, б).

Значения $\delta^{18}\text{O}$ и $\delta^2\text{H}$ Свято-Никольского источника легче медианных значений атмосферных осадков ($\delta^{18}\text{O} = -13.3\text{‰}$ и $\delta^2\text{H} = -97.3\text{‰}$). Такое взаимоотношение может указывать на то, что основная доля в питании источника принадлежит легким осадкам зимне-весеннего периода.

Выводы

Приуроченность подземных вод к зонам повышенной трещиноватости, невыдержанность водоупоров и разделение горизонтов на отдельные слои форми-

руют химический и изотопный облик подземных вод. Исследуемые источники пресные, преимущественно гидрокарбонатно-магниево-кальциевого и сульфатно-гидрокарбонатно-магниево-кальциевого состава. Минерализация вод изменяется от 213 до 431 мг/дм³, а изотопный состав в среднем идентичен и варьирует от -14.2 до -16.3‰ по $\delta^{18}\text{O}$ и от -107.3 до -119.4‰ по $\delta^2\text{H}$.

Для подземных вод характерно обеднение тяжелыми изотопами в весенний период и обогащение — в летний, что указывает на метеогенное влияние на их состав. Питание талыми водами в весеннее время приводит к облегчению состава вод, а питание дождями в летний и осенний периоды — к утяжелению состава. Формирование и питание подземных вод, приуроченных к нижнепермским отложениям Соликамской впадины и прилегающей территории, происходит не только за счет атмосферных осадков периода снеготаяния (зима — весна), но и за счет перетекания сульфатных и карбонатных вод из нижележащих горизонтов по зонам повышенной трещиноватости. Для исследованных источников разных гидрогеологических подразделений разгрузка из нижележащих горизонтов осуществляется в зимний, весенний и летний периоды.

Установлено, что изотопный состав источников реагирует на изменение состава осадков в осенний и зимний периоды с некоторой задержкой в один — три месяца. По нашему мнению, задержка объясняется тем, что для «прохождения» атмосферных осадков через поверхностный и почвенный слои в водоносный горизонт требуется некоторое время. Отсутствие корреляционной взаимосвязи между изотопными составами источников и водами поверхностного руслового стока (р. Колва) предполагает, что подземные воды, расположенные выше по течению, питают речные воды.

Исследование выполнено в рамках Программы ФНИ, проект № 0422-2019-0144-С-02 «Геохимическая и минералогическая эволюция осадконакопления в Соликамском палеобассейне».

Литература

1. Иконников Е. А. и др. Отчет о результатах работ по составлению полистной гидрогеологической карты масштаба 1:500000 листов Р-39-Г, Р-40-В, Г, 0-40-Б / Территориальный фонд геологической информации г. Перми. Пермь, 1995.
2. Казанцева А. С., Кадебская О. И., Дублянский Ю. В., Катаев В. Н. Мониторинг изотопного состава атмосферных осадков на территории Пермского края (предварительные результаты) // Метеорология и гидрология. 2020. № 3. С. 87–94.
3. Кудряшов А. И. Минерально-сырьевые ресурсы Пермского края. Пермь, 2006. 464 с.
4. Ревин А. В. и др. Отчет по результатам гидрогеологической съемки масштаба 1 : 200000 листов Р-40-XXVII, XXXIII за 1983–1988 гг. / Территориальный фонд геологической информации г. Перми. Пермь, 1988 г.
5. Шестов И. Н., 1967. Минеральные лечебные воды Пермской области и перспективы курортного строительства: Дис. ... канд. геол.-мин. наук. Пермь: Изд-во Перм. гос. ун-та им. А. М. Горького.
6. Шимановский Л. А., Шимановская И. А. Пресные подземные воды Пермской области. Пермь, 1973. 197 с.
7. Щербakov С. В., Шилова А. В., Золотарев Д. Р. Применение ГИС-технологий при мелкомасштабном районировании

гидрогеологических условий // Вестник Пермского университета. Геология. 2016. Выпуск 1(30). С. 6–12.

References

1. Ikonnikov E.A. et al. *Otchet o rezultatakh rabot po sostavleniyu polistnoy gidrogeologicheskoy karty masshtaba 1:500000 listov R-39-G, R-40-V, G, O-40-B* (Report on the results of work on the compilation of a hydro-geological map of a scale of 1: 500,000 sheets of P-39-G, P-40-B, G, O-40-B), 1995, Perm. *Territorial'nyj fond geologicheskoy informacii g. Permi*.
2. Kazantseva A. S., Kadebskaya O. I., Dublyanskij YU. V., Kataev V. N. *Monitoring izotopnogoso stave atmosferyh osadkov na territorii Permskogo kraja (predvaritelnye rezultaty)* (Monitoring of the isotopic composition of precipitation in the Perm region (preliminary results)). *Meteorologiya i gidrologiya*, 2020, No.3, pp. 7–94.
3. Kudryashov A. I., *Mineralno-syrevye resursy Permskogo kraja* (Mineral resources of the Perm region). 2006, Perm.
4. Revin A.V. et al. *Otchet po rezul'tatam gidrogeologicheskoy s"emki masshtaba 1:200000 listov R-40-XXVII, XXXIII za 1983–1988 gg* (Report on the results of hydrogeological surveys on a scale of 1: 200,000 sheets P-40-XXVII, XXXIII for 1983-1988). *Territorial'nyj fond geologicheskoy informacii g. Permi*, 1988.
5. Shestov I.N. *Mineralnye lechebnye vody Permskoj oblasti i perspektivy kurortnogo stroitel'stva* (Mineral curative waters of the Perm Region and prospects for resort construction): dis. ... Cand. geol-min. sc., 1967, Perm.
6. Shimanovskij L. A., Shimanovskaja I. A. *Presnye podzemnye vody Permskoj oblasti* (Fresh underground waters of the Perm Region). 1973, Perm.
7. Shcherbakov S. V., Shilova A. V., Zolotarev D.R. *Primenenie GIS-tehnologij pri melkomasshtabnom rajonirovanii gidrogeologicheskikh uslovij* (Application of GIS technologies for small-scale zoning of hydrogeological conditions). *Vestnik Permskogo universiteta. Geologiya*, 1(30), 2016, Perm, pp. 6–12.

Поступила в редакцию / Received 30.04.2020