

Исследование природных вод Колвинской седловины гидрохимическими и изотопными методами (Пермский край)

©2022 А. С. Казанцева^{1✉}, О. И. Кадебская¹, Ю. В. Дублянский², В. Н. Катаев³

¹Горный Институт УрО РАН, ул. Сибирская, д.78-А, 614007, Пермь, Российская Федерация

²Институт Геологии Инсбрукского университета. Инрайн 52, 6020 Инсбрук, Австрия

³Пермский государственный национальный исследовательский университет, ул. Букирева, 15, 614990, Пермь, Российская Федерация

Аннотация

Введение: Для северной части Предуральяского прогиба в пределах Колвинской седловины имеется только фрагментарный материал о распространении, гидрохимических особенностях и условиях формирования природных вод. Целью настоящей работы является установление условий формирования изотопного и химического состава природных вод (атмосферные осадки, поверхностные и подземные воды) Колвинской седловины на севере Пермского края. Методы изотопной гидрогеологии в рассматриваемом районе ранее не применялись. Основные задачи исследования состояли в посезонном опробовании водопроявлений для определения вариаций их изотопного и химического состава, установлении закономерностей изменения и зависимостей между составом подземных вод, речных вод и атмосферных осадков, а также уточнении генезиса подземных вод на основе установленных закономерностей.

Методика: Опробование водопроявлений было проведено в 2017–2018 гг. Из реки Колва и пяти источников пробы на изотопный анализ отбирались ежемесячно, на химический анализ – посезонно. Еще четыре источника были опробованы ранней осенью (сентябрь) и весной (апрель). Пробы атмосферных осадков на изотопный анализ были взяты с декабря 2016 г. по июнь 2018 г., на химический анализ отобрано две пробы (в октябре и июне). Всего было собрано 106 проб поверхностных вод, подземных вод и атмосферных осадков для изотопного анализа и 77 проб для химического анализа.

Результаты и обсуждение: Для водопроявлений впервые определены изотопные показатели и установлены следующие закономерности. Подземные воды Колвинской седловины пресные и имеют инфильтрационный генезис. Состав подземных вод формируется преимущественно за счет питания атмосферными осадками в периоды снеготаяния и обильных дождей, а также напорной разгрузки нижележащих горизонтов.

Выводы: Комплексный изотопно-гидрохимический анализ позволяет получить подробную гидрогеологическую информацию, важную для решения вопросов генезиса вод, а также для оценки состояния и качества водных ресурсов. В настоящей пилотной работе мы обсуждаем данные, полученные за полуторагодовой период опробования, и используем их для выявления взаимосвязей между различными типами природных вод.

Ключевые слова: подземные воды, химический состав, изотопный состав, Колвинская седловина.

Источник финансирования: Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ в рамках научных проектов № 17-45-590369 «Исследование формирования изотопного и химического состава природных вод на территории Пермского края» (2017 г.); № 16-55-14002 «Миграция границы многолетней мерзлоты на границе Европа – Азия в плейстоцене» (2016) и Австрийского фонда FWF № I 2707-N28 (Pleistocene permafrost boundary shifts at the Europe-Asia border).



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.

✉ Казанцева Алена Сергеевна, e-mail: kazanalena@bk.ru

Для цитирования: Казанцева А. С., Кадебская О. И., Дублянский Ю. В., Катаев В. Н. Исследование природных вод Колвинской седловины гидрохимическими и изотопными методами (Пермский край) // Вестник Воронежского университета. Серия: Геология. 2022. № 2. С. 77–89. DOI: <https://doi.org/10.17308/geology.2022.1/9102>

Введение

Для северной части Предуральяского прогиба в пределах Колвинской седловины имеется только фрагментарный материал о распространении, гидрохимических особенностях и условиях формирования природных вод [1–4]. Поскольку атмосферные осадки играют важную роль в формировании состава подземных и речных вод, данные по изотопному составу осадков (сезонные, годовые, многолетние) чрезвычайно важны для понимания процессов их формирования. На севере Пермского края наблюдения над изотопным составом осадков ранее не проводились. С 1980 по 1990 гг. на станции в г. Пермь изучался только изотопный состав осадков в рамках проекта GNIP¹. Эти наблюдения возобновились после тридцатилетнего перерыва в 2019 г.

Колвинская седловина расположена в Чердынском районе Пермского края и охватывает бассейн среднего и нижнего течения р. Колва. Колвинской седловиной называется тектоническая структура, выделяемая в северной части Предуральяского прогиба. В широтном направлении она сочленяет Тиманский кряж с Полудовско-Колчимским антиклинорием Западно-Уральской внешней зоны складчатости, а в меридиональном – разделяет Верхнепечерскую и Соликамскую впадины Предуральяского прогиба [5].

Седловина характеризуется повышенным, по сравнению с их положением в пограничных впадинах, уровнем залегания отложений нижнепермского структурного яруса. Центральная часть района исследований представляет собой эрозионно-структурную депрессию, поверхность которой перекрыта четвертичными аллювиальными отложениями. В формировании депрессии определенную роль сыграли реки Вишера и Колва.

В районе исследования широко развиты карбонатно-сульфатные породы нижнепермского возраста (рис. 1).

В северной части района, в окрестностях п. Ныроб, на поверхность выходят отложения лекской и кошелевской свит кунгурского яруса, представленные терригенными (песчаники, конгломераты, алевролиты) и карбонатными отложениями (известняки) с прослоями сульфатов (гипсы). Породы соликамской свиты уфимского яруса выходят на поверхность на значительной части территории. Они представлены плитчатыми известняками, доломитами, алевролитами, песчаниками, мергелями и гипсами. Мощность сульфатных пачек составляет от 20 до 180 м, карбонатных – 2–10 м. Четвертичные отложения представлены аллювием второй надпойменной террасы (галечники, гравий, пески, суглинки, глина) [1].

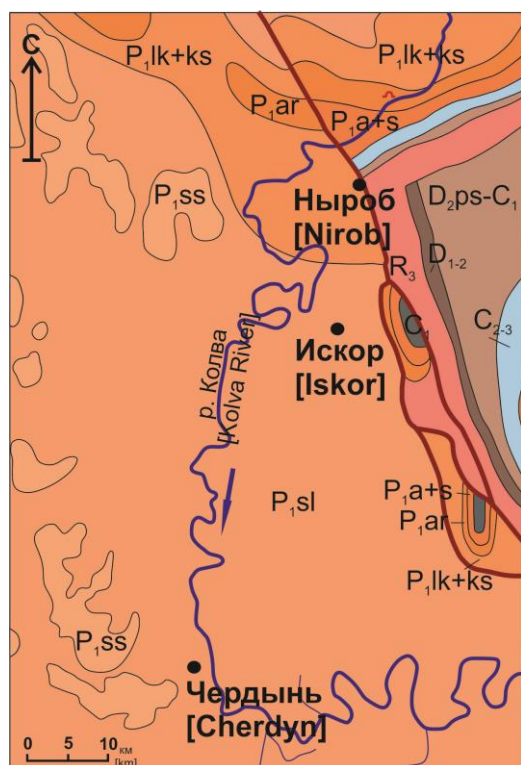


Рис. 1. Геологическая карта района исследования. Стратиграфические подразделения – пермская система: P_{1ss} – шешминская свита уфимского яруса, P_{1sl} – соликамская свита уфимского яруса, P_{1lk+ks} – лекская и кошелевская свиты кунгурского яруса, P_{1ar} – артинский ярус, P_{1a+s} – ассельский и сакмарский ярусы; каменноугольная система: C_{2,3} – средний и верхний отдел, C₁ – нижний отдел; D_{2ps-C₁} – девонско-каменноугольная система, девонская система: D_{1,2} – нижний и средний отделы; рифей: R₃ – басегская и каратауская серии. Тектонические нарушения выделены красным цветом. Составлена по материалам геологической карты Пермского края масштаба 1:2500000.

[Fig. 1. Geological map of the studied area. Stratigraphic units. Permian system: (P_{1ss}) Sheshminsk suite of the Ufimian stage, (P₁) Solikamsk suite of the Ufimian stage, (P_{1lk+ks}) Lekskaya and Koshelev suites of the Kungurian stage, (P_{1ar}) Artinian stage, (P_{1a+s}) Asselian and Sakmarian stages. Carboniferous system: (C_{2,3}) middle and upper period, (C₁) lower period; (D_{2ps-C₁}) Devonian-Carboniferous system. Devonian system: (D_{1,2}) lower and middle periods. Riphean: (R₃) Baseg and Karatau series. Tectonic disturbances are highlighted in red. The map is based on the data presented in the geological map of the Perm Territory on a scale of 1:2,500,000.]

¹ IAEA/WMO: Global Network of Isotopes in Precipitation. The GNIP Database. <http://www.iaea.org/water>, 2006.

Основной водной артерией на исследуемой территории является река Колва. Она является крупным притоком р. Вишеры (бассейн р. Камы). Её исток, расположенный на границе Пермского края и Республики Коми, находится на водоразделе бассейнов Каспийского и Баренцева морей. Протяженность реки составляет 460 км, площадь бассейна 13500 км², средняя высота водосбора – 233 м н.у.м., средний уклон – 0.3 м/км. Бассейн р. Колва лежит в зоне умеренно континентального климата и характеризуется избыточным увлажнением. Средняя температура января составляет $-16 \div -18^\circ\text{C}$ (в западной и восточной частях бассейна, соответственно). Средняя температура июля $+15 \div +17^\circ\text{C}$ (в северной и южной частях бассейна). Ежегодно выпадает от 700 до 1000 мм осадков. Средняя продолжительность залегания снегового покрова – 180 дней, при его средней высоте 80 см.

Река Колва имеет Восточноевропейский тип водного режима, с высоким весенним половодьем, низкой летней и зимней меженью, и несколько повышенным стоком осенью (Вода России²). Питание реки смешанное, с преобладанием снегового. Расход воды колеблется в значительных пределах (рис. 2), от минимума в $1.8 \pm 0.8 \text{ м}^3/\text{с}$ в марте до ярко выраженного максимума $860 \pm 407 \text{ м}^3/\text{с}$ в июне; среднегодовой расход составляет $165 \pm 32 \text{ м}^3/\text{с}$ (R-ArcticNET³). Ледостав на Колве начинается в начале ноября и завершается в конце апреля – начале мая; весеннее половодье начинается в конце апреля.

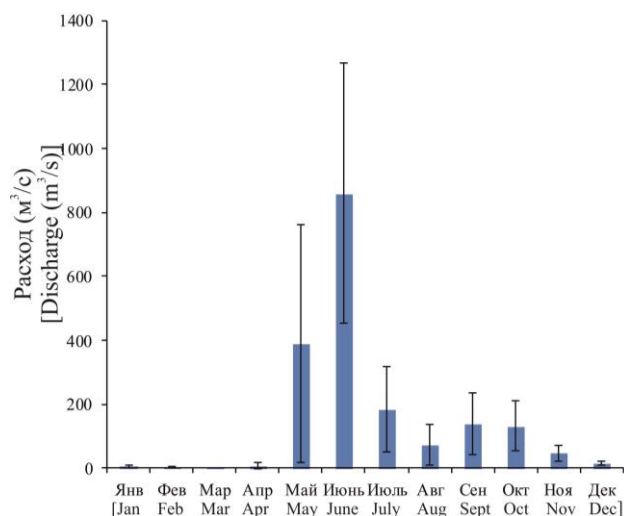


Рис. 2. Среднемесячный расход воды р. Колва (1975–1993 гг.). По данным гидрологического поста у п. Колва (R-ArcticNET). Вариабельность показана на уровне 1σ .

[Fig. 2. The average monthly water flow of the Kolva river (1975–1993). According to the data of the stream flow measuring station near Kolva settlement (R-ArcticNET). Variation is shown at level 1σ .]

К долине р. Колвы приурочены многочисленные источники (рис. 3). Здесь распространены грунтовые и трещинно-

трещинно-жильные безнапорные и напорные воды. Выходы подземных вод приурочены к проницаемым зонам литолого-фациального и тектонического генезиса – границам литологически различных пород и зонам разрывных нарушений с повышенной трещиноватостью.

Часто разгрузка подземных вод в виде групп источников в речных долинах приурочена к участкам пересечения ими положительных тектонических структур. Карст развит в основном в карбонатно-сульфатных породах кунгурского и уфимского ярусов. На водораздельных пространствах сульфатные отложения, вскрытые эрозией и находящиеся в зоне активного водообмена, подвержены интенсивному карстованию.

Методика

В работе представлены результаты изучения изотопного и химического состава атмосферных осадков, поверхностных (р. Колва) и подземных (природные источники) вод. Опробованные в рамках данной работы водопункты (рис. 3) расположены на западной границе Колвинской седловины и юго-восточного окончания Тиманского кряжа (№№ 1–4) и на северо-восточной окраине Колвинской седловины на границе с передовыми складками Урала (№№ 5–10) [6]. Пробы воды отбирались с лета 2017 г. по весну 2018 г. Из реки Колвы и пяти источников пробы на изотопный анализ отбирались ежемесячно, на химический анализ – посезонно. Еще четыре источника были опробованы ранней осенью (сентябрь) и весной (апрель). Пробы атмосферных осадков на изотопный анализ отбирались с декабря 2016 г. по июнь 2018 г., на химический анализ отобрано две пробы (в октябре и июне). Кумулятивные месячные пробы атмосферных осадков отбирались при помощи пробоотборника RS-1B (Palmex, Хорватия), установленного в с. Искор, в соответствии с рекомендациями GNIP⁴. Всего было отобрано 106 проб поверхностных вод, подземных вод и атмосферных осадков для изотопного анализа и 77 проб для химического анализа. До проведения анализа пробы хранились при температуре $+5^\circ\text{C}$.

Анализ состава стабильных изотопов кислорода и водорода проводился в Инсбрукском университете (Австрия) на анализаторе L2130-i (Picarro, США). Результаты обрабатывались статистически и нормализовались относительно стандарта V-SMOW.

2 https://water-rf.ru/Водные_объекты/1501/Колва#:~:text=Колва%20-%20река%20в%20Европейской%20части,Булгарское%20царство%20с%20северными%20регионами.

3 <https://www.r-arcticnet.sr.unh.edu/v4.0/index.html>

4 IAEA/GNIP: IAEA/GNIP precipitation sampling guide (V2.02 September 2014), accessed at: http://www-naweb.iaea.org/naweb/ih/documents/other/gnip_manual_v2.02_en_hq.pdf on December 20, 2014

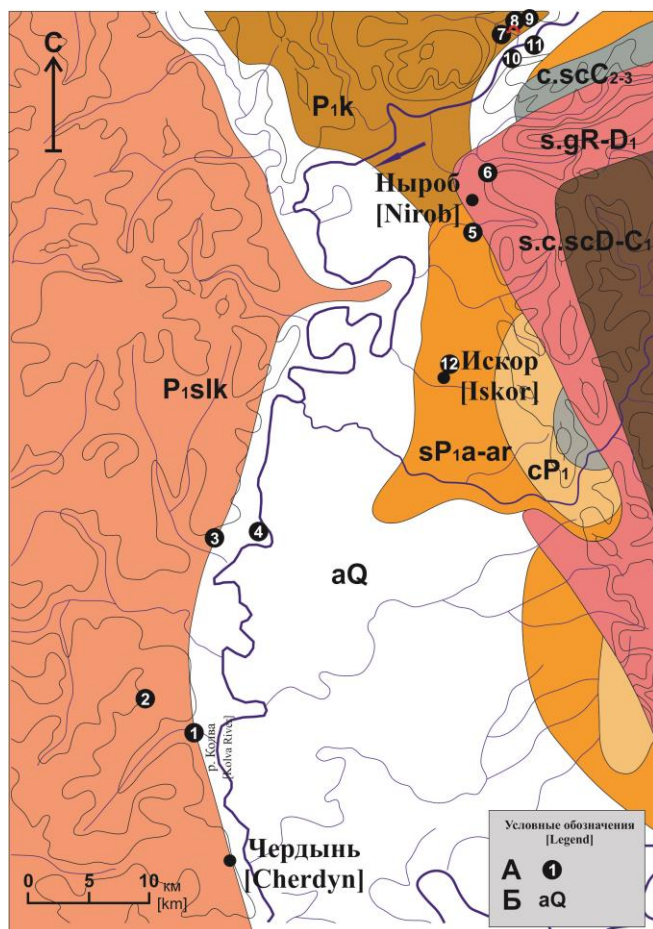


Рис. 3. Гидрогеологическая карта района исследования (150 м над уровнем моря, шаг горизонталей 50 м). *А* – водопункты: 1 – Покчинский источник; 2 – источник Параскевы Пятницы; 3 – Вильгортский источник; 4 – р. Колва с. Камгорт; 5 – Свято-Никольский источник; 6 – Вилипский источник; 7 – источник у входа в пещеру Дивья; 8 – источник Закаменка; 9 – водопад Алалай; 10 – источник у бывшего п/л «Жемчужина Урала»; 11 – р. Колва у п. Дивья; 12 – отбор атмосферных осадков с Искор. *Б* – гидрогеологические подразделения: *aQ* – водоносный четвертичный аллювиальный горизонт; *P_{1k}* – водоносная кунгурская карбонатно-сульфатная серия; *P_{1slk}* – водоносная соликамская терригенно-карбонатная свита; *sP_{1a-ar}* – водоносный ассельско-артинский комплекс; *cP₁* – водоносная нижнепермская карбонатная серия; *c.scC₂₋₃* – водоносная надзона средне-верхнекаменноугольных карбонатных и терригенно-карбонатных пород; *s.gR-D₁* – слабоводоносная надзона рифейско-нижнедевонских терригенных и метаморфических кварцитовидных пород; *s.c.scD-C₁* – водоносная надзона девонско-нижнекаменноугольных терригенных карбонатных и терригенно-карбонатных пород. Карта составлена по материалам Е. А. Иконникова, Л. А. Алексеевой, электронная версия А. В. Корякиной (Шиловой), Е. Н. Пыстоговой, 2017.

[Fig. 3. Hydrogeological map of the studied area (150 m above sea level, 50 m contour interval). (A) – water occurrences: (1) – Pokchinsky spring; (2) – Paraskeva Pyatnitsa spring; (3) – Vilgortsky spring; (4) – Kolva river, Kamgort settlement; (5) – Svyato-Nikolsky spring; (6) – Vilipsky spring; (7) – spring at the entrance to the Divya cave; (8) – Zakamenka spring; (9) – Alalai waterfall; (10) – a spring near the former pioneer camp “Zhemchuzhina Urala”; (11) – Kolva river near the Divya village; (12) – a precipitation sampling site near the settlement Iskor. (B) – Hydrogeological units: (*aQ*) – Quaternary alluvial aquifer; (*P_{1k}*) – Kungur carbonate-sulphate aquifer series; (*P_{1slk}*) – Solikamsk terrigenous carbonate aquifer suite; (*sP_{1a-ar}*) – Asselian-Artinian terrigenous aquifer system; (*cP₁*) – Nizhneperm carbonate series aquifer; (*c.scC₂₋₃*) – aquifer over Middle-Upper Carboniferous carbonate and terrigenous-carbonate rocks; (*s.gR-D₁*) – low-yield aquifer over Riphean-Lower Devonian terrigenous and metamorphic quartzitic rocks; (*s.c.scD-C₁*) – aquifer over Devonian–Lower Carboniferous terrigenous, carbonate, and terrigenous-carbonate rocks. The map was compiled based on the data provided by E. A. Ikonnikov, L. A. Alekseeva. The electronic version was made by A. V. Koryakina (Shilova), E. N. Pystogova, 2017.]

Средняя точность измерений $\delta^{18}\text{O}$ составила $\pm 0.1\%$, $\delta^2\text{H}$ – $\pm 0.4\%$ (1 σ).

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 (аттестат аккредитации №RA.RU.21NB29 от 06.03.2018). Макрокомпонентный состав определялся лабораторными методами (потенциометрическим, фотометрическим, титриметрическим и др.), микрокомпонентный – методом масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой на приборе Aurora M90 (Bruker, США).

Для характеристики химического состава подземных вод использовалась химическая классификация Г. А. Максимовича [7]. Типы воды определялись в

соответствии с гидрохимической фацией, которая характеризуется одинаковыми гидрохимическими свойствами. В наименование гидрохимической фации включены компоненты с содержанием более 10% от величины общей минерализации и в порядке убывания их значений (сначала анионы, потом катионы).

Взаимосвязь между параметрами (температура воздуха, количество осадков, изотопный состав вод) оценивалась путем расчёта коэффициента корреляции Спирмена (r_s) за период измерений (10–13 месяцев, n), поскольку закон распределения выбора отличен от нормального. Корреляция определяется как очень сильная при $r_s > 0.9$, сильная при $r_s = 0.7–0.89$, средняя сила связи при $r_s = 0.5–0.69$, слабая и очень слабая при $r_s < 0.49$. Для оценки значимости корреляции, рассчитанные значения r_s сравнивались с критическими значениями, соответствующими уровню значимости $\alpha=0.05$ при числе степеней свободы $df = n-2$.

Результаты исследований

Сводный результат анализов ионного состава опробованных вод приведен в форме диаграммы Пайпера на рис. 4.

Нами были проанализированы две пробы атмосферных осадков, отобранные в осенний и зимний периоды 2017–2018 гг. Осенью осадки имеют вдвое более низкую минерализацию, чем зимой (6 мг/дм³ и 12 мг/дм³, соответственно⁵). Следует отметить, что из-за низкой минерализации, анализы продемонстрировали довольно высокое отклонение от электронейтральности (5–6%). Преобладающими в оба сезона являются ионы гидрокарбоната и кальция.

Зимние осадки относятся к простому типу Ca-HCO₃, осенние характеризуются сложным составом Ca-Mg-Na-HCO₃-SO₄.

Река Колва является основным водотоком исследуемого района. По водородному показателю речные воды близки к нейтральным, значения pH варьируют от 6.5 до 7.9, в среднем составляя 7. Минерализация вод р. Колвы меняется в течение года (рис. 5): в летне-осенний период она остается в пределах 230–290 мг/дм³, в зимний период достигает максимальной величины 380 мг/дм³, а в весенний период уменьшается до 100 мг/дм³.

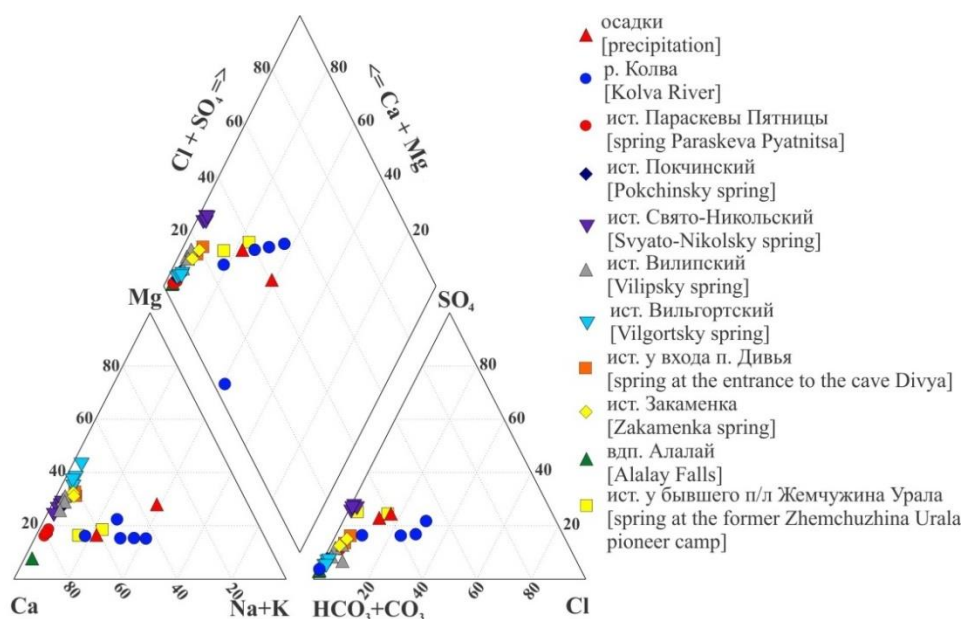


Рис. 4. Ионный состав атмосферных осадков, а также поверхностных и подземных вод, опробованных в пределах Колвинской седловины.

[Fig. 4. The ionic composition of atmospheric precipitation and surface water and groundwater sampled within the Kolva saddle.]

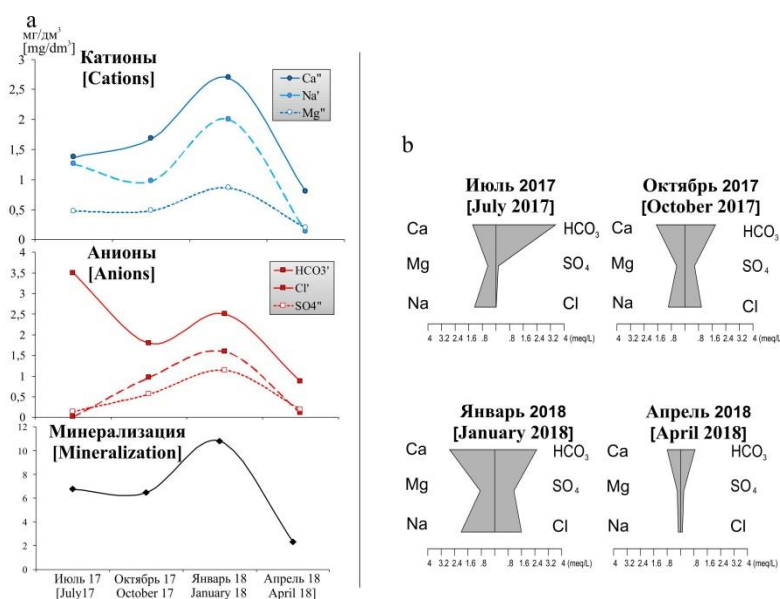


Рис. 5. Изменение содержания основных компонентов и общей минерализации вод р. Колвы по сезонам: а – временные ряды; б – диаграммы Стиффа.

[Fig. 5. Changes in the content of the main components and the total mineralisation of the waters of the Kolva river by seasons: (a) – time series; (b) – Stiff diagrams.]

⁵ Данные по минерализации округлены до единиц [Mineralization data rounded to units]

В течение года HCO_3^- и Ca^{2+} являются доминирующими ионами. При этом в летний и зимний периоды повышается роль Na^+ , а в осенний и зимний – несколько повышается содержание иона Cl^- . Наиболее низкая минерализация и наиболее простой ионный состав (Ca-HCO_3) ожидаемо наблюдаются весной, что связано с повышением роли талых вод в питании реки в это время.

Подземные воды, разгружающиеся в виде источников в долине р. Колва, относятся к различным водоносным горизонтам, свитам, комплексам и зонам (рис. 3). Несколько из них расположены на или вблизи контакта водоносных коренных соликамских и локально водоносных аллювиальных четвертичных отложений (P₁slk и aQ) на западной границе эрозионно-структурной депрессии (ист. Покчинский (1), Вильгортский (3) и Параскевы Пятницы (2)). Водоносными породами этой зоны являются известняки, мергели, песчаники и алевролиты.

В северо-восточной части района выделяются две зоны пресных вод. Южная зона приурочена к ассельско-артинскому терригенному комплексу (sP₁a-ar).

Здесь водоносными являются прослои и линзы конгломератов, песчаников, реже алевролитов, мергелей, известняков (ист. Свято-Никольский (5)). Севернее развиты воды слабоводоносной надзоны рифейско-нижнедевонских терригенных и метаморфических кварцитовидных пород (s.gR-D₁, ист. Вилипский (6)). В долине р. Колва источники у пещеры Дивья (7), Закаменка (8) и водопад Алалай (9) разгружаются из пород кунгурской карбонатно-сульфатной серии (P₁k). Источник бывшего у пионерского лагеря «Жемчужина Урала» (10) приурочен к локально-слабоводоносному четвертичному аллювиальному горизонту (aQ).

Минерализация вод источников изменяется по сезонам (рис. 6). В шести источниках (ист. Параскевы Пятницы (2), ист. Вилипский (6), ист. у пещеры Дивья (7), Закаменка (8), водопад Алалай (9) и ист. бывшего пионерлагеря «Жемчужина Урала» (10)) сезонные изменения незначительны и не превышают 20 мг/дм³, тогда как в остальных источниках (ист. Покчинский (1), Вильгортский (3), Свято-Никольский (5)) минерализация изменяется в пределах 30–100 мг/дм³.

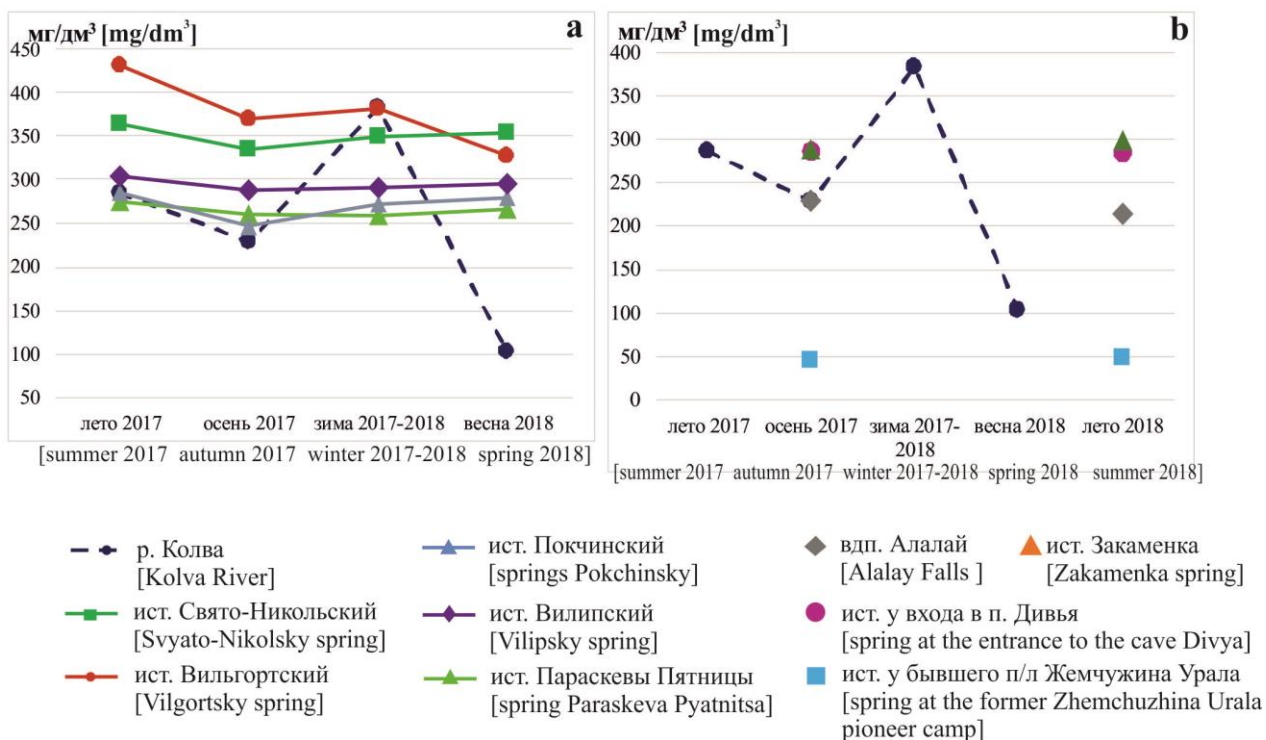


Рис. 6. Изменение общей минерализации опробованных источников и р. Колвы по сезонам: *a* – источники Покчинский (1 на рис. 3), Параскевы Пятницы (2), Вильгортский (3), Свято-Никольский (5), Вилипский (6); *b* – источники у входа в п. Дивья (7), Закаменка (8), водопад Алалай (9), у бывшего п/л «Жемчужина Урала» (10).

[Fig. 6. Changes in the total mineralisation of the sampled springs and the Kolva river by seasons: (a) – Pokchinsky spring (1 in Fig. 3), Paraskeva Pyatnitsa spring (2), Vilgortsky spring (3), Svyato-Nikolsky spring (5), Vilipisky spring (6); (b) – spring at the entrance to the Divya cave (7), Zakamenka spring (8), Alalay waterfall (9), spring near the former pioneer camp “Zhemchuzhina Urala” (10).]

Максимальная амплитуда колебания минерализации (100 мг/дм³) зафиксирована для Вильгортского источника (3). Воды источников разделяются на три химические типа: Ca-HCO_3 (ист. Параскевы Пятницы (2), вдп. Алалай (9)), Ca-Mg-HCO_3 (ист. Покчинский

(1), Вильгортский (3), Вилипский (6), около пещеры Дивья (7), Закаменка (8)), и $\text{Ca-Mg-HCO}_3\text{-SO}_4$ (ист. Свято-Никольский (5)). Для большинства источников сезонные изменения минерализации не приводят к изменению химического типа вод. Исключением яв-

ляется источник у бывшего п/л «Жемчужина Урала» (10), приуроченный к четвертичному аллювиальному водоносному горизонту. Он отличается от остальных источников значительно более низкой минерализацией (46 мг/дм³) и изменчивым химическим составом (осенью 2017 – Ca-HCO₃-SO₄; летом 2018 – Ca-Na-HCO₃-SO₄).

Содержания основных микроэлементов (Sr, Cu, Zn, Pb) в водах р. Колва не превышает соответствующих ПДК. Исключение составляет Fe, содержание которого в летне-осенний период повышается до 0.72 мг/дм³, превышая ПДК (0.3 мг/дм³) более чем вдвое. Вероятно, это связано с поступлением в речную воду органических соединений железа с заболоченных участков р. Колва и ее притоков.

Содержание основных микроэлементов в водах источников подвержено сезонным изменениям. Содержание железа в подземных водах изменяется от 0.05 до 0.16 мг/дм³. Максимальное содержание зафиксировано в летний период в источнике, расположенном у входа в п. Дивья (7). Концентрация меди (ПДК = 1.0 мг/дм³) изменяется от 0.001 до 0.012 мг/дм³, максимальные значения отмечены осенью в пяти источниках (Покчинский (1), Вилипский (6), Параскевы Пятницы (2), у бывшего п/л «Жемчужина Урала» (10) и у входа в п. Дивья (7)). Содержание цинка (ПДК = 5.0 мг/дм³) изменяется от 0.001 до 0.009 мг/дм³, повышенные концентрации отмечены в летне-осенний и зимний перио-

ды почти во всех источниках, а минимальные – в весенний период. Концентрация стронция (ПДК = 7.0 мг/дм³) в источниках колеблется от 0.003 до 2.26 мг/дм³. Значения повышаются в весенний, летний и осенний периоды; максимальное значение зафиксировано в источнике у бывшего п/л «Жемчужина Урала» (10), дренирующем четвертичные аллювиальные отложения. Содержание свинца (ПДК = 0.03 мг/дм³) в подземных водах изменяется от 0.0002–0.0006 мг/дм³, достигая максимальных значений в летне-осенний период почти во всех источниках, за исключением водопада Алалай (9) и источника Закаменка (8). Изменения содержания большинства микроэлементов соответствуют по направлению изменениям в речных водах (р. Колва) и в атмосферных осадках. Исключением является железо, содержание которого почти не меняется в водах источников, но колеблется в широких пределах в речных водах и в атмосферных осадках.

Данные о содержании стабильных изотопов водорода и кислорода в атмосферных осадках в районе исследования с декабря 2016 г. по июнь 2018 г. представлены на рис. 7. Уравнение регрессии (локальная линия метеорных вод; ЛЛМВ) имеет вид $\delta^2\text{H} = 7.7 \times \delta^{18}\text{O} + 4.1$ ($r^2 = 0.99$). Из расчётов были исключены несколько значений, смещённых относительно ЛЛМВ более чем на 1‰ $\delta^{18}\text{O}$ (февраль, апрель, июнь 2017 г., март 2018 г.). Такое смещение указывает на возможное испарение проб.

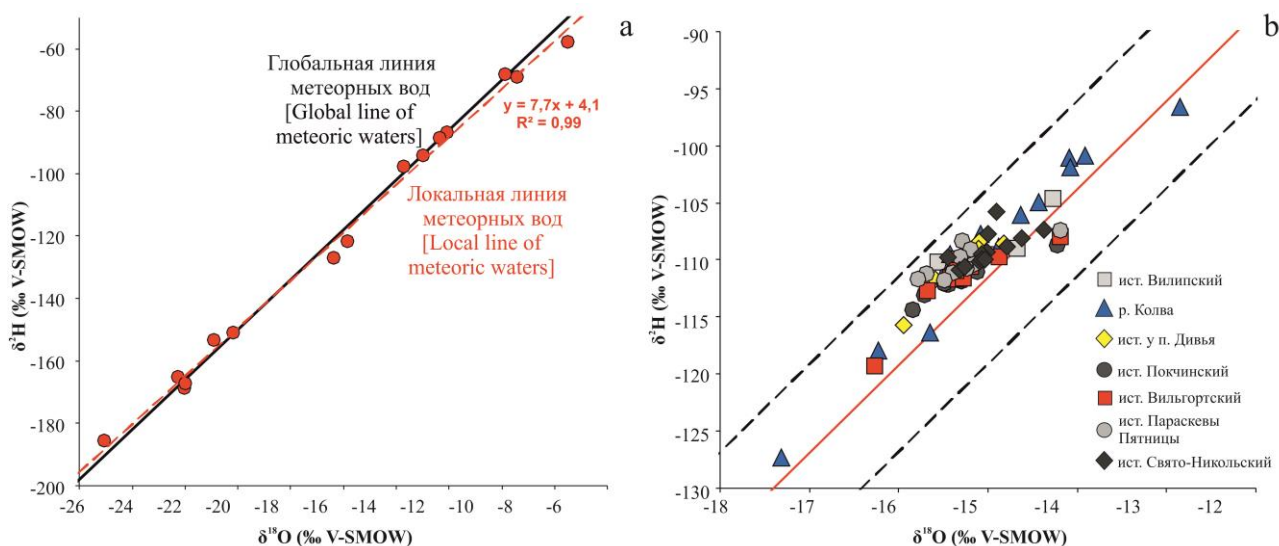


Рис. 7. Изотопный состав атмосферных осадков (а) и подземных вод (б) в период с декабря 2016 г. по июнь 2018 г.; штриховые линии ограничивают коридор $\pm 1\text{‰}$ $\delta^{18}\text{O}$, соответствующий обычной вариабельности изотопного состава осадков.

[Fig. 7. The isotopic composition of precipitation (a) and groundwater (b) from December 2016 to June 2018; dashed lines limit the corridor of $\pm 1\text{‰}$ $\delta^{18}\text{O}$, which corresponds to the usual variability in the isotopic composition of sediments.]

Изотопный состав осадков показывает годовой ход, характерный для континентальных регионов, с минимальными значениями (до $\delta^2\text{H} = -186\text{‰}$ и $\delta^{18}\text{O} = -25\text{‰}$) зимой и максимальными (до $\delta^2\text{H} = -68\text{‰}$ и $\delta^{18}\text{O} = -9\text{‰}$) – летом. Средневзвешенный изотопный состав атмосферных осадков: $\delta^{18}\text{O} = -14.7\text{‰}$ и $\delta^2\text{H} = -108.3\text{‰}$.

Диапазон изменения $\delta^{18}\text{O}$ и $\delta^2\text{H}$ в подземных водах довольно узок: от -14.2‰ до -16.3‰ и от -104.7‰ до -119.4‰ , соответственно. Наиболее тяжелый изотопный состав отмечен в июле-августе ($\delta^{18}\text{O} = -14.2\text{‰} \div -14.4\text{‰}$, $\delta^2\text{H} = -104.7\text{‰} \div -107.3\text{‰}$) для всех опробованных источников. Наиболее легкий состав ($\delta^{18}\text{O} = -15.5\text{‰} \div -16.3\text{‰}$, $\delta^2\text{H} = -110.6\text{‰} \div -119.4\text{‰}$) – в янва-

ре для трех источников (Вилипский (6), Свято-Никольский (5) и Параскевы Пятницы (2)), и в марте-апреле для остальных источников (Покчинский (1), Вильгортский (3)).

Обсуждение

В целом, химический характер вод реки Колва меняется по сезонам, будучи наиболее простым весной и летом, и становясь многокомпонентным осенью и зимой. Отмечается, также, изменчивость от года к году (например, опробование осенью 2017 и 2018 гг.). Исходя из характера водного режима Колвы (рис. 2), минимальные значения минерализации речной воды весной связаны с повышением роли талых вод в питании реки в это время. Преобладающими ионами в речной воде в это время являются HCO_3^- и Ca^{2+} ; они же доминируют и в зимних атмосферных осадках. Оценочный расчет с использованием этих ионов по-

казывает, что доля талых вод в питании реки в весеннее время может превышать 70%.

По аналогии, высокую минерализацию в зимнюю межень логично было бы объяснить тем, что основное питание в это время Колва получает из подземных вод (поскольку в это время поверхностный сток практически отсутствует). Следует отметить, что зимняя речная вода несёт значительно больший набор ионов, чем воды исследуемых источников (табл. 1). Расхождение в составе главных ионов можно объяснить тем, что основная часть зимнего стока реки в створе опробования формируется за счёт подземных вод, питающих реку выше по течению. Химический состав источников, опробованных в пределах Колвинской седловины, поэтому может быть не представительным для подземных вод, питающих реку в это время.

Табл. 1. Типизация вод опробованных источников по химическому составу
[Table 1. Types of water in sampled springs by chemical composition]

Гидрогеологическое подразделение [Hydrogeological unit]	Название и номер источника [Spring name and number]	Химический тип воды [Chemical type of water]
Аллювиальные четвертичные отложения [Alluvial Quaternary deposits (aQ)]	У бывшего п/л «Жемчужина Урала» (10) [Near the former pioneer camp "Zhemchuzhina Urala" (10)]	$\text{Ca-HCO}_3\text{-SO}_4$; $\text{Ca-Na-HCO}_3\text{-SO}_4^*$
Соликамская терригенно-карбонатная свита [Solikamsk terrigenous-carbonate suite (P ₁ slk)]	Параскевы Пятницы (2) [Paraskeva Pyatnitsa (2)]	Ca-HCO_3
Контакт Соликамской терригенно-карбонатной свиты с четвертичным аллювием [Contact of the Solikamsk terrigenous-carbonate suite with the Quaternary alluvial aquifer (aQ/P ₁ slk)]	Покчинский (1), Вильгортский (3) [Pokchinsky (1), Vilgortsky (3)]	Ca-Mg-HCO_3
Ассельско-артинский терригенный комплекс [Asselian-Artinian terrigenous system (sP ₁ a-ar)]	Свято-Никольский (5) [Svyato-Nikolsky (5)]	$\text{Ca-Mg-HCO}_3\text{-SO}_4$
Кунгурская карбонатно-сульфатная серия [Kungur carbonate-sulphate aquifer series (P ₁ k)]	У входа в п. Дивья (7), Закаменка (8), Водопад Алалай (9) [At the entrance to the Divya cave (7), Zakamenka (8), Alalai waterfall (9)]	Ca-Mg-HCO_3 (7, 8) Ca-HCO_3 (9)
Рифейско-нижнедевонские терригенные и метаморфические кварцитовидные породы [Riphean-Lower Devonian terrigenous and metamorphic quartzitic rocks (s.gR-D ₁)]	Вилипский (6) [Vilipsky (6)]	Ca-Mg-HCO_3

Примечания: * химический тип воды демонстрирует сезонную изменчивость.
[Notes: * The chemical type of water shows seasonal variability.]

Несмотря на то, что опробованные источники дренируют различные водоносные породы, по химическому типу (выделяемому по преобладающим ионам) большинство из них довольно монотонны, и относятся к Ca-Mg-HCO_3 (4 источника) и Ca-HCO_3 (2 источника) типам. Только в источнике, приуроченном к ассельско-артинскому терригенному комплексу (Вилипский (6)), в качестве основного иона появляется ещё и сульфат ($\text{Ca-Mg-HCO}_3\text{-SO}_4$). Химический тип вод всех, за исключением одного, источников постоянен, и не меняется в течение года.

Исключение составляет источник около бывшего п/л «Жемчужина Урала» (10), связанный с четвертичными аллювиальными отложениями. В его составе

присутствует сульфат ион, состав воды изменяется сезонно, при этом он обладает наиболее низкой, среди источников, общей минерализацией.

В большинстве источников, для которых проводилось посезонное опробование (№1, 2, 5, 6, 7, 8, 9, 10), весной фиксируется небольшое повышение минерализации (по сравнению с зимним периодом), что свидетельствует об их изолированности от поверхностного стока. Существенное снижение минерализации в весенний период показывает только вода Вильгортского источника (3), разгружающегося на контакте нижнепермских соликамских и аллювиальных четвертичных отложений. Это говорит о возможности участия талых вод в его питании.

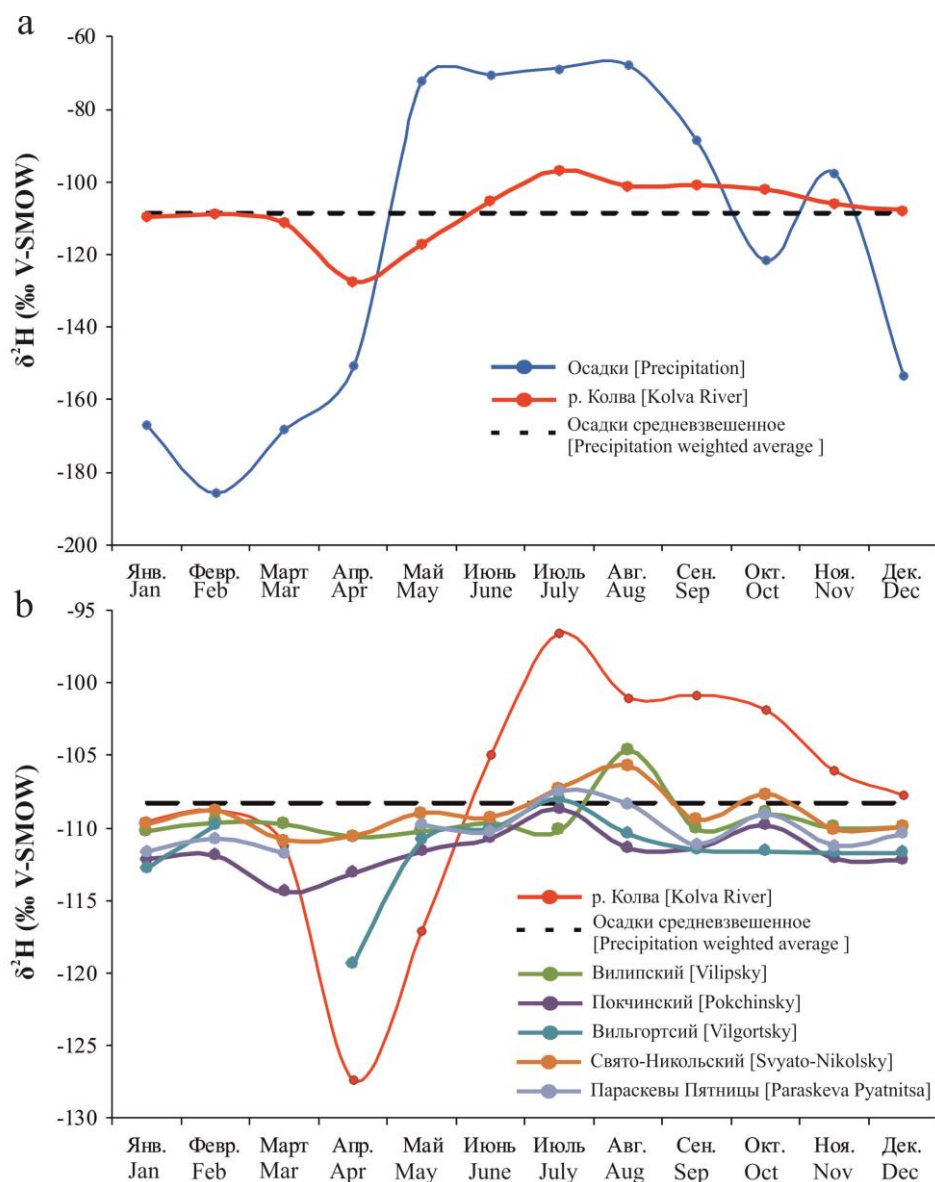


Рис. 8. Сезонный ход изотопного состава природных вод Колвинской седловины, на примере $\delta^2\text{H}$: *a* – речные воды и атмосферные осадки; *b* – подземные воды. Отсутствующие данные по осадкам (июнь и март) получены интерполяцией. Данные за май получены осреднением значений за 2017 и 2018 гг.

[**Fig. 8.** Seasonal variation of the isotopic composition of natural waters of the Kolva saddle shown for $\delta^2\text{H}$: (*a*) – river waters and precipitation; (*b*) – groundwater. The missing precipitation data (June and March) were obtained by interpolation. The data for May were obtained by averaging the values for 2017 and 2018.]

На диаграмме $\delta^{18}\text{O}$ – $\delta^2\text{H}$ (рис. 7) данные для р. Колва не обнаруживают существенного влияния испарения, что выразилось бы в смещении точек вправо относительно ЛЛМВ. Изотопный состав источников (опробованы многократно), в целом, соответствует составу атмосферных осадков, показывая при этом значительно меньшую вариабельность. Воды реки показывают наиболее «тяжелый» состав ($\delta^{18}\text{O} = -13\text{‰}$, $\delta^2\text{H} = -97\text{‰}$) в летнее время (июль 2017 г.), и наиболее «легкий» ($\delta^{18}\text{O} = -17\text{‰}$, $\delta^2\text{H} = -127\text{‰}$) – в весеннее (апрель 2018 г.; рис. 8). Последнее объясняется таянием снежного покрова. Изотопные данные соответствуют представлениям о том, что основную роль в питании реки в зимнее время играют подзем-

ные воды. Состав вод р. Колвы в этот период ($\delta^{18}\text{O} = -15.1\text{‰}$, $\delta^2\text{H} = -108.7\text{‰}$) близко отвечает среднему составу подземных вод ($\delta^{18}\text{O} = -15.3 \pm 1.0\text{‰}$, $\delta^2\text{H} = -110.8 \pm 3.9\text{‰}$ (1σ)), рассчитанному по пяти источникам, опробованных ежемесячно.

Значения $\delta^{18}\text{O}$ и $\delta^2\text{H}$ подземных вод легче средневзвешенного значения атмосферных осадков ($\delta^{18}\text{O} = -14.7\text{‰}$ и $\delta^2\text{H} = -108.3\text{‰}$) практически в течение всего года, за исключением июля, августа и октября в некоторых точках отбора (Вильгортский (3), Параскевы Пятницы (2), Свято-Никольский (5) и Вилипский (6); рис. 8). Такое взаимоотношение может указывать на некоторое преобладание зимнего питания подземных вод. Утяжеление состава водопроявлений в июле, ав-

густе и октябре может быть вызвано смещением подземных вод с атмосферными осадками (дожди) более тяжелого состава, выпавших в этот период. В отношении осадков, 2017 г. был аномальным: за три месяца (июль, август, октябрь) этого года выпало около 32% годовой нормы. В связи с этим, вопрос о характере питания подземных вод на настоящий момент остаётся открытым; для его решения систематическое опробование-мониторинг следует продолжить.

Поскольку изотопный состав водорода и кислорода в исследуемых водах связан линейной зависимостью, корреляционный анализ проводился только по одному из изотопов ($\delta^{18}\text{O}$ или $\delta^2\text{H}$). При расчете корреляций для вод источников оказалось, что изотопные системы кислорода и водорода демонстрируют некоторые различия. В связи с этим, в дальнейшем корреляция рассчитывалась по комбинированному параметру $(\delta^2\text{H} + 8 \delta^{18}\text{O})/2$.

Известно, что наиболее важным параметром, контролирующим изотопный состав атмосферных осадков в условиях континентов, является температура воздуха [8–11]. При этом в тропиках и в условиях близости океанов, состав осадков в большей степени контролируется их количеством [9, 12]. Корреляционный анализ рядов наблюдения, полученных в этой работе, показал сильную и статистически значительную корреляцию между изотопным составом атмосферных осадков и температурой воздуха. Коэффициент детерминации $r^2 = 0.81$ говорит о том, что 81% вариабельности изотопного состава осадков можно объяснить годовым ходом температуры. Корреляция между изотопным составом осадков и их количеством слабая и статистически незначительная (коэффициент детерминации $r^2 = 0.23$; только 23% вариабельности изотопного состава осадков можно объяснить вариабельностью их количества).

При прямом сравнении 13-месячных серий наблюдений, корреляция между изотопным составом речных вод и атмосферных осадков установлена ($r_s = 0.58$ при $r_{\text{crit}} = 0.58$). Однако, сдвиг серии речных вод на 1 и 2 месяца относительно серии атмосферных осадков, приводит к резкому возрастанию корреляции, которая становится сильной и очень сильной (при сдвиге на 1 месяц $r_s = 0.91$ при $r_{\text{crit}} = 0.60$, при сдвиге на 2 месяца $r_s = 0.84$ при $r_{\text{crit}} = 0.63$). Такой характер взаимоотношения рядов наблюдения объясняется задержкой передачи изотопного сигнала от атмосферных осадков к речной воде. Можно отметить два механизма такой задержки. Зимние (декабрь-март) «легкие» осадки задерживаются на длительное время (порядка двух месяцев), поскольку они выпадают в твердой форме и попадают в р. Колву только во время снеготаяния (апрель-май). В теплое время года, в связи с тем, что осадки выпадают на большой площади водосбора, на то, чтобы они, через поверхностный и подповерхностный сток, попали в реку, также требуется некоторое время («время добегаания»).

Изотопный состав большинства источников не коррелирует с составом атмосферных осадков напря-

мую. Исключением является Свято-Никольский (5) и Покчинский (1) источники, демонстрирующие статистически значимую корреляцию средней силы, ($r_s = 0.59-0.65$). При сдвиге ряда данных подземных вод на 1 месяц относительно атмосферных осадков корреляция возрастает до 0.7 для Покчинского (1) источника и до 0.66 для Свято-Никольского (5). При сдвиге на 2 месяца корреляция увеличивается между изотопными составами Покчинского источника и атмосферными осадками ($r_s = 0.75$), а для Свято-Никольского перестает быть значимой.

Корреляционной взаимосвязи между изотопными значениями источников и речных вод не выявлено, что подтверждает вышесказанное: формирование состава речных вод происходит за счет подземных вод, питающих реку выше по течению.

Заключение

В результате годового исследования на территории Колвинской седловины (север Пермского края) получены сезонные вариации изотопного и химического состава природных вод, установлены закономерности их изменения в течение года, выявлена взаимосвязь между разными видами вод, а также уточнены особенности питания водоносных горизонтов.

Уточнены параметры локальной линии метеорных вод для севера Пермского края ($\delta^2\text{H} = 7.7 \times \delta^{18}\text{O} + 4.1$ (‰)), которые оказались близки к глобальной линии метеорных вод. При этом ионный состав осадков изменяется в зависимости от сезона: осенние осадки характеризуются сложным составом, зимние – относятся к простому типу. Подтверждена связь формирования изотопного состава атмосферных осадков от температуры данного района.

Изотопно-гидрохимические параметры поверхностного руслового стока также изменяются посезонно и имеют несколько источников питания. В зимний период доминирующая роль в питании рек принадлежит разгрузке подземных вод, весной – талые воды, а летом и осенью – атмосферные осадки. Выявлено запаздывание речных вод по отношению к осадкам в один-два месяца, которое объясняется существованием «времени передачи» изотопного сигнала от атмосферных осадков к речной воде, связанное с иммобилизацией осадков в виде снега в зимние месяцы, а также временем «прохождения» осадков через стадию поверхностных и подповерхностных (почвенных) вод.

Подземные воды Колвинской седловины относятся к разным гидрогеологическим подразделениям, для которых в результате исследований установлены основные источники питания.

Воды аллювиального четвертичного горизонта (источник у бывшего п/л «Жемчужина Урала» (10)) метеогенного генезиса, о чем свидетельствует низкая минерализация источника, единство химического и изотопного состава с атмосферными осадками. Формирование и питание подземных вод соликамского водоносного горизонта, водоносной кунгурской карбонатно-сульфатной серии, ассельско-артинского

терригенного комплекса, рифейско-нижнедевонских терригенных и метаморфических кварцитовидных пород и на контакте соликамской терригенно-карбонатной свиты и четвертичного аллювиального горизонта имеет смешанный характер. Состав подземных формируется преимущественно за счет питания атмосферными осадками зимне-весеннего периода и обильных дождей, а также напорной разгрузки нижележащих водообильных сульфатных и карбонатных прослоев в весенне-летний и зимний периоды.

Конфликт интересов: Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

ЛИТЕРАТУРА

1. Горбунова К. А., Андрейчук В. Н., Костарев В. П., Максимович Н.Г. Карст и пещеры Пермской области. Пермь: Изд-во Перм. ун-та, 1992. 200 с.
2. Дублянский В. Н. К гидрохимии Дивьей пещеры // *Пещеры* 7(8). 1969. С. 54–56.
3. Шестов И. Н. Минеральные лечебные воды Пермской области и перспективы курортного строительства: дис. ... канд. геол-мин. наук. Пермь, 1967. 267 с.
4. Шимановский Л. А., Шимановская И. А. Пресные подземные воды Пермской области. Пермь: Пермское книжное изд-во, 1973. 197 с.
5. Проворов В. М. Тектоника // *Минерально-сырьевые ресурсы Пермского края*. 2006. С. 63–74.
6. Печеркин А. И. Геодинамика сульфатного карста. Иркутск: Изд-во Иркут. Ун-та. 1986. 169 с.
7. 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.
8. Fricke H. C., O'Neil J. R. The correlation between $18\text{O}/16\text{O}$ ratios of meteoric water and surface temperature: its use in investigating terrestrial climate change over geologic time Earth Planet // *Sci. Let.* 1999. P. 181–196.
9. Gat J. R., Mook W. G., Meijer H. A J. Environmental Isotopes in the Hydrological Cycle: Principles and Applications. UNESCO/IAEA. Paris, 2001. Vol II. 73 p.
10. Sonntag, C., Münnich, K. O., Jacob, H., Rozanski, K. Variations of deuterium and oxygen-18 in continental precipitation and groundwater, and their causes. In: Street-Perrott, F.A., Beran, M., Ratcliff, R. (eds.): *Variations in the Global Water Budget*, D. Reidel, Dordrecht. 1983. P. 107–124.
11. Yurtsever Y. Worldwide survey of stable isotopes in precipitation Rep. Sect. Isotope Hydrol., IAEA. 1975. 73 p.
12. Dansgaard W. Stable isotopes in precipitation // *Tellus*. Vol. 16. 1964. P. 436–468.

The study of natural waters of the Kolva saddle by hydrochemical and isotope methods (Perm Territory)

©2022 A. S. Kazantseva^{1✉}, O. I. Kadebskaya¹, Yu. V. Dublyansky², V. N. Kataev³

¹*Mining Institute of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, 78-A Sibirskaya ul., 614007, Perm, Russian Federation*

²*Institute of Geology, University of Innsbruck, Innrain 52, 6020, Innsbruck, Austria*

³*Perm State National Research University, 15 Bukireva ul., 614990, Perm, Russian Federation*

Abstract

Introduction: There are only fragmentary data on the distribution, hydrochemical features, and the conditions for the formation of natural waters in the northern part of the Cis-Ural foredeep within the Kolva saddle. The purpose of this work is to establish the conditions for the formation of the isotopic and chemical composition of natural waters (atmospheric precipitation, surface and groundwater) of the Kolva saddle in the north of the Perm Territory. The methods of isotope hydrogeology have not previously been used in the studied area. The main objectives of the study were to conduct seasonal sampling of water seeps to determine variations in their isotopic and chemical compositions, to establish patterns of changes and relationships between the composition of groundwater, river water, and precipitation, as well as to clarify the genesis of groundwater based on the established patterns.

Methodology: Sampling of water seeps was carried out in 2017 and 2018. The samples were taken from the Kolva river and five springs every month for the isotope analysis and every season for the chemical analysis. Samples were also taken from four more springs in early autumn (September) and spring (April). Atmospheric precipitation samples for the isotope analysis were taken between December 2016 and June 2018, two samples were taken for the chemical analysis (in October and June). A total of 106 samples of surface water, groundwater, and precipitation were collected for the isotope analysis and 77 samples were taken for the chemical analysis.

Results and discussion: For the first time, isotopic indicators were determined for water seeps and the following regularities were established. The underground waters of the Kolva saddle are fresh and have an infiltration genesis. The composition of groundwater is formed mainly due to the supply of atmospheric precipitation during the periods of snowmelt and heavy rains, as well as the ascending discharge of underlying horizons.

Conclusions: A comprehensive isotope and hydrochemical analysis makes it possible to obtain detailed hydrogeological information which is important in order to answer questions relating to the genesis of waters and to assess the state and quality of water resources. This pilot work discusses the data obtained as a result of sampling that was conducted for a year and a half. These data were used to identify relationships between different types of natural waters.

Keywords: groundwater, chemical composition, isotopic composition, Kolva saddle.

Funding: The work was conducted as part of projects supported by the Russian Foundation for Basic Research No. 17-45-590369 “Research of the formation of the isotopic and chemical composition of natural waters in the Perm Territory” (2017); No. 16-55-14002 “Pleistocene permafrost boundary shifts at the Europe-Asia border” (2016) and the Austrian FWF No. I 2707-N28 (Pleistocene permafrost boundary shifts at the Europe-Asia border).



The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.

✉ Alena S. Kazantseva, e-mail: kazanalena@bk.ru

For citation: Kazantseva A. S., Kadebskaya O. I., Dublyansky Y. V., Kataev V. N. The study of natural waters of the Kolva saddle by hydrochemical and isotope methods (Perm Territory). *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Geologiya – Proceedings of Voronezh State University. Series: Geology*, 2022, no. 1, pp. 77–89 DOI:

<https://doi.org/10.17308/geology.2022.1/9102>

Conflict of interests: The authors declare the absence of obvious and potential conflicts of interest related to the publication of this article.

REFERENCES

1. Gorbunova K. A., Kostarev V. P., Andreychouk V. N., Maksimovich N.G. *Karst i pescheri Permskoi oblasti* [Karst and caves of Perm region]. Publishing House of Perm State University, Perm, 1992. 200 p. (in Russ.)
2. Dublyansky V. N. К гидрoхимии Div'ei peshchery [To the hydrochemistry of the Divya Cave]. *Peshchery – Caves*, 1969, pp. 54–56. (in Russ.)
3. Shestov I. N. *Mineral'nye lechebnye vody Permskoi oblasti i perspektivy kurortnogo stroitel'stva*: dis. ... kand. geol.-min. nauk. [Mineral curative waters of the Perm Region and prospects for resort construction. Cand. geol.-min. sci. diss.]. Perm, 1967, 267 p. (in Russ.)
4. Shimanovskiy L. A., Shimanovskaya I. A. *Presnye pod-*

zemnye vody Permskoi oblasti [Fresh underground waters of the Perm Region]. Perm, Permskoe knizhnoe izd-vo publ., 1973, 197 p (in Russian)

5. Provorov V. M. Tektonika [Tectonics]. *Mineral'nye resursy Permskogo kraja – Mineral resources of the Perm Territory*, 2006, pp. 63–74. (in Russ.)
6. Pecherkin A. I. *Geodinamika sulfatnogo karsta* [Sulfate Karst Geodynamics]. Irkutsk, Irkutsk University Publishing House, 1986, 169 p. (in Russ.)
7. Maksimovich G. A. *Osnovy karstovedeniya* [Fundamentals of karst studies]. Institute of Karst Studies and Speleology. Perm University. Perm, 1969, vol. 2, 529 p. (in Russ)
8. Fricke H.C., O'Neil J.R. The correlation between 18O/16O ratios of meteoric water and surface temperature: its use in investigating terrestrial climate change over geologic time Earth Planet. *Sci. Lett.*, 1999, pp. 181–196.
9. Gat J. R., Mook W. G., Meijer H. A. J. *Environmental Isotopes in the Hydrological Cycle: Principles and Applications. UNESCO/IAEA*. Paris, 2001, vol. II, 73 p.
10. Sonntag, C., Münnich, K. O., Jacob, H., Rozanski, K. Variations of deuterium and oxygen-18 in continental precipitation and groundwater, and their causes. In: Street-Perrott, F.A., Beran, M., Ratcliff, R. (eds.): *Variations in the Global Water Budget*, D. Reidel, Dordrecht, 1983, pp. 107–124.
11. Yurtsever Y. Worldwide survey of stable isotopes in precipitation Rep. Sect. Isotope Hydrol., IAEA. 1975. 73 p.
12. Dansgaard W. Stable isotopes in precipitation. *Tellus*, vol. 16, 1964. pp. 436–468.

Казанцева Алена Сергеевна – инженер, «Горный институт Уральского отделения РАН» филиал ПФИЦ УрО РАН, Пермь, Российская Федерация; E-mail: kazanalena@bk.ru; ORCID <http://orcid.org/0000-0001-7129-9861>

Кадебская Ольга Ивановна – д.г.н., Горный институт Уральского отделения РАН» филиал ПФИЦ УрО РАН, Пермь, Российская Федерация; E-mail: icescave@bk.ru; ORCID <http://orcid.org/0000-0001-8414-5925>

Дублянский Юрий Викторович – к.г.-м.н., Институт Геологии Инсбрукского университета, Инсбрук, Австрия; E-mail: kyoto_yuri@mail.ru; ORCID <http://orcid.org/0000-0003-1433-9999>

Катаев Валерий Николаевич – д.г.-м.н., Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь, Российская Федерация; E-mail: kataev@psu.ru; ORCID <http://orcid.org/0000-0001-9300-0015>

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Alena S. Kazantseva – engineer, Mining Institute of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Perm, Russian Federation; E-mail: kazanalena@bk.ru; ORCID <http://orcid.org/0000-0001-7129-9861>

Olga I. Kadebskaya – PhD, Mining Institute of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Perm, Russian Federation; E-mail: icescave@bk.ru; ORCID <http://orcid.org/0000-0001-8414-5925>

Yuri V. Dublyansky – PhD, Institute of Geology, University of Innsbruck, Innsbruck, Austria; E-mail: kyoto_yuri@mail.ru; ORCID <http://orcid.org/0000-0003-1433-9999>

Valery N. Kataev – PhD, Perm State University, Perm, Russian Federation; E-mail: kataev@psu.ru; ORCID <http://orcid.org/0000-0001-9300-0015>

All authors have read and approved the final manuscript.