

ГИДРОГЕОЛОГИЯ

УДК 556.3

О формировании химического и изотопного состава подземных вод иренского горизонта (на примере Кунгурской ледяной пещеры)А.С. Казанцева^{а,с}, О.И. Кадебская^а, Ю.В. Дублянский^б, **В.Н. Катаев^с**^аГорный институт Уральского отделения Российской академии наук

614007, Пермь, ул. Сибирская, д. 78А

^бИнститут Геологии Инсбрукского университета

6020, Инсбрук, Австрия, Innrain 52

^сПермский государственный национальный исследовательский университет

614990, Пермь, ул. Букирева, 15

E-mail: kasanalena@bk.ru; icecave@bk.ru; kyoto_yuri@mail.ru; kataev@psu.ru

(Статья поступила в редакцию 26 мая 2022 г.)

Изучены сезонные изменения химического и изотопного состава (дейтерия и кислорода-18) вод поверхностного руслового стока, атмосферных осадков, инфильтрационных и подземных вод Кунгурской ледяной пещеры. Исследование проведено с целью комплексного анализа подземных вод, определения закономерностей изменения и зависимостей между составом разных видов вод, необходимого для более эффективной оценки ресурсов подземных вод и осуществления прогнозирования состава и качества подземных вод. Установлены и подтверждены основные пути, временной интервал и некоторые особенности перемещения вод в карстовом массиве. Эти данные имеют ценное значение при проведении гидрохимического мониторинга в пещере.

Ключевые слова: *Кунгурская ледяная пещера, иренский горизонт, подземные воды, изотопный анализ, химический состав.*

DOI: 10.17072/psu.geol.21.4.326

Введение

Кунгурская ледяная пещера (далее КЛП) одна из немногих пещер в мире, где на протяжении 70 лет ведутся мониторинговые наблюдения. За это время накоплен огромный гидрохимический материал о составе атмосферных осадков, капли, пещерного льда, речных вод и вод пещерных озер. В результате продолжительных наблюдений установлено, что режим карстовых вод в пещере в значительной степени определяется режимом питающих их вод. Вода на изотопный анализ была отобрана однократно в весенний период 2014 г. из озер гротов Геологов, Атлантида, Дружбы Народов, Длинный, Перепутье, Близнецы и Бирюзовое озеро. Было выявлено, что вода в озерах по генезису относится к метеогенным (Кишин и др., 2014).

В данной работе приводятся результаты изотопного и химического анализов подземных вод иренского водоносного горизонта, формирующих водопроявления в КЛП, проведенных в период 2017–2018 гг. Поскольку для подземных вод КЛП характерна тесная гидравлическая связь с речными водами, также проанализирован химический и изотопный состав речных вод и атмосферных осадков. Комплексное изучение химического и изотопного состава различных типов вод позволило получить подробную информацию об их генезисе и взаимосвязи.

Характеристика района исследования

Район исследований находится на северо-восточной окраине г. Кунгура Пермского края, на правом берегу р. Сылвы. Вход в КЛП расположен у подножия Ледяной горы,

которая представляет собой платообразную закарстованную возвышенность и занимает водораздельное пространство между реками Сылвой и Шаквой.

Массив, в пределах которого расположена КЛП, приурочен к центральной части клиновидного тектонического блока северного окончания Башкирского свода (Дублянский и др., 2005, Катаев и Кадебская, 2010). С запада-северо-запада блок ограничен крутопадающим сбросо-взбросовым глубинным нарушением с падением. Разлом отделяет

окончание Башкирского свода от Сылвенского прогиба Камско-Кинельской системы. Восточной границей блока является сбросо-взбросовое глубинное нарушение, разделяющее Волго-Уральскую антеклизу (Русская плита) и Уфимско-Соликамскую мегавпадину (Предуральский краевой прогиб). В региональном плане разлом представляет собой границу структур третьего порядка: Пермско-Башкирского свода и Юрюзано-Сылвенской впадины.

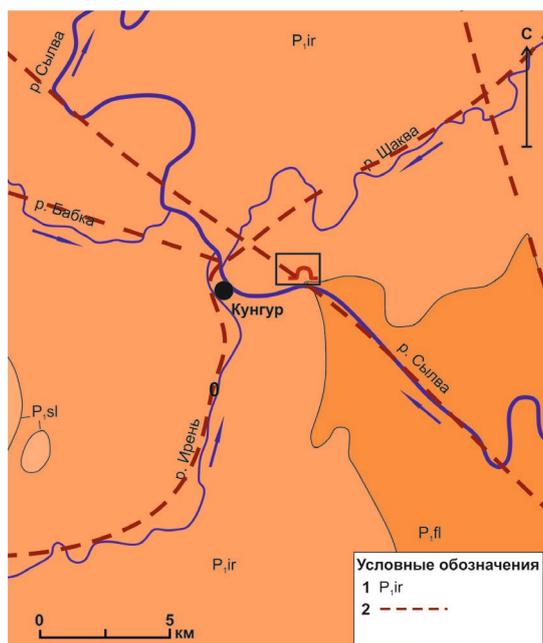


Рис. 1. Геологическая карта района исследования. Составлена по материалам геологической карты Пермского края масштаба 1:2500000: 1 – Стратиграфические подразделения – пермская система: P_{sl} – соликамская свита уфимского яруса; P_{ir} – иренская свита кунгурского яруса; P_{fl} – филипповская свита кунгурского яруса. 2 – тектонические нарушения (Чайковский, 2014); прямоугольником показан район Ледяной горы

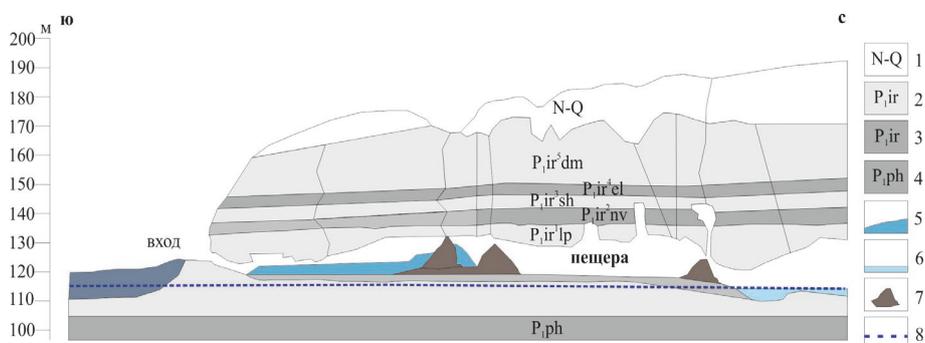


Рис. 2. Геологический разрез через Ледяную гору 1 – неоген-четвертичные отложения; 2 – сульфатные пачки иренской свиты (демидковская, шалашининская и ледянопещерская); 3 – карбонатные пачки иренской свиты (елкинская и неволинская); 4 – известняки и доломиты филипповского горизонта; 5 – ледяные образования; 6 – озера; 7 – осыпи; 8 – уровень водоносного горизонта

В строении осадочного чехла района исследования и КЛП принимают участие породы кунгурского яруса приуральского отдела пермской системы и породы неогеновой и четвертичной систем (рис. 1, 2). Кунгурский ярус разделен на два горизонта: филипповский и иренский.

Филипповский горизонт обнажается на востоке района исследования и сложен слоистыми желтовато-серыми и серыми доломитами, доломитизированными известняками. Породы содержат значительную примесь глинистого материала. Встречаются линзы гипса небольшой мощности, являющиеся причиной возникновения карстовых полостей. Мощность пород колеблется от 50 до 80 м.

Иренский горизонт представлен тремя сульфатными и двумя карбонатными пачками. *Ледянопещерская пачка* обнажается в нижних частях склонов долин рек Сылвы, Ирени и Шаквы. В составе пачки преобладают ангидриты (зернисто-кристаллические, скрытокристаллические, желвакообразные, слоисто-волнистые), меньше распространены гипсы. Гипс преобладает в присклоновых частях, встречается в местах интенсивной трещиноватости, а также вблизи контактов с карбонатными породами. Мощность пачки – 31,6 м.

Неволинская пачка сложена в основном доломитами и известняками доломитизированными, серыми, желто-серыми и темно-серыми, в подошве иногда с прослоем доломита оолитового мощностью до 1 см. В средней части пачки прослеживаются слои гипса мощностью до 6,5 м и прослой глины мощностью до 0,1 м. В известняках доломитизированных и вторичных доломитах содержится разнообразный комплекс фауны. Пачка обнажается у входа в КЛП в наиболее высоких обвальных гротах и в органических трубах. Мощность пачки – 14,0 м.

Шалаининская пачка представлена гипсами белыми, зернисто- и скрытокристаллическими, с неравномерно-волнистой текстурой от горизонтально-волнистослоистых примазок глины и доломита светло-серого, серого, глинистого, пелитоморфного, массивнослоистого. Вследствие карстовых процессов она сильно разрушена и сохранилась

в виде отдельных островов. Мощность пачки у входа в пещеру – 16,4 м.

Елкинская пачка представлена доломитами, известняками доломитизированными, известняками серыми, оолитовыми, пелитоморфными, детритовыми, органогенно-обломочными с различной фауной. Выход пород пачки зафиксирован на поверхности Ледяной горы. Мощность пачки – 3,8 м.

Демидковская пачка. Обнажения немногочисленны. В воронках на Ледяной горе над доломитами елкинской пачки залегает гипс серовато-белый видимой мощностью 4 м.

Четвертичные отложения представлены аллювиальными, делювиальными, аллювиально-делювиальными и пролювиальными отложениями мощностью до 40 м. Неогеновые образования сложены карстово-обвальными отложениями, состоящими из дресвы, щебня и глыб карбонатных и сульфатных пород с примесью песчано-глинистого материала и карстовой брекчии мощностью до 40–50 м. Основной водной артерией территории исследования является р. Сылва. Она является левым притоком р. Чусовой (бассейн р. Волги). 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 относится к восточноевропейскому типу с четко выраженным весенним половодьем, летне-осенними дождевыми паводками и длительной устойчивой зимней меженью (Алексеевский, Антонова, 2010). Р. Сылва характеризуется смешанным питанием с преобладанием снегового и дождевого (до 60% осадков стекает в реки, причем распределение речного стока внутри года является относительно равномерным). Расход воды колеблется в значительных пределах (рис. 3): от минимума в $53,1 \pm 4,0$ м³/с в марте до ярко выраженного максимума в $536,5 \pm 301,3$ м³/с в мае; среднегодовой расход составляет $1804,5 \pm 277,6$ м³/с (Максимович, 1969). Река замерзает в ноябре, вскрывается в апреле. Речные воды, особенно во время весеннего паводка, оказывают воздействие на развитие карстовых процессов.

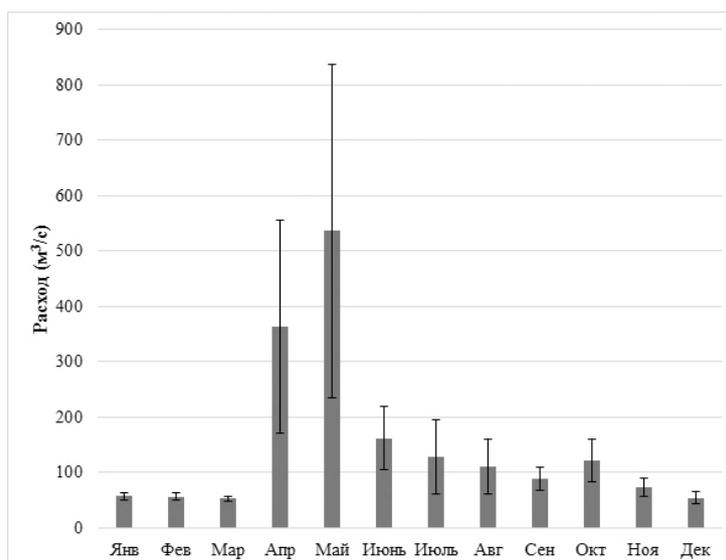


Рис. 3. Среднемесячный расход воды р. Сылвы (1948–1951 гг.). По данным гидрологического поста у д. Подкаменное. Вариабельность показана на уровне 1σ

Незамерзающие полыньи на участке реки свидетельствуют о наличии мощных выходов карстовых вод. Карстовые воды сульфатных пород подпитывают речные воды, что приводит к увеличению их минерализации. Повышенная водообильность района исследования характерна для зон, приуроченных к тектоническим нарушениям.

Зоны тектонических нарушений характерны для правобережья р. Сылвы на западной окраине г. Кунгура, водораздела рр. Сылвы и Шаквы и левобережья р. Сылвы на восточной окраине города. Ориентировка региональных трещинно-разрывных структур предполагает возможность локализованных перетоков подземных вод в соответствии с направлением регионального стока, обуславливаемого в данном случае направлением падения пород сульфатно-карбонатного комплекса с северо-восточного-восточного направления на запад, юго-запад, северо-запад. Предположение о гидрогеологической активности трещинно-разрывных структур подтверждается и их пространственным совпадением с участками локализованной разгрузки подземных вод в аллювий долины р. Сылвы.

Район пещеры расположен в северо-западной части бассейна трещинно-карстовых вод Уфимского вала (возвышенная часть Восточно-Европейской платформы). Подземные воды приурочены к четвертичным аллювиальным песчано-галечным и суглинистым отложениям, иренским карбо-

натно-сульфатным и артинско-филипповским карбонатным толщам пермского возраста (рис. 4). В сводовой части вала водоносными являются карбонатные отложения филипповского горизонта. По мере погружения на запад они приобретают роль регионального водоупора, на котором формируются подземные воды карстовых брекчий, трещиноватых закарстованных гипсов и ангидритов низов иренского горизонта.

Структурные особенности массива Ледяной горы (характер залегания пород, ориентировка и конфигурация трещинных зон) оказывают влияние на направленность перемещения подземных вод зоны активного водообмена, определяют характер их динамического режима. Относительно крупные системы полостей расположены на границе участков повышенной и средней плотности линеаментов и приурочены к «узлам трещинной тектоники», сформированным пересечением разноориентированных зон тектонических трещин (Горбунова и др., 1995; Кадебская, 2004; Катаев и Кадебская, 2010). Основными водными объектами пещеры являются подземные озера. Они располагаются у основания ангидритовых стен пещерных галерей на расстоянии 120–580 м от реки. Подземные воды пещеры приурочены к иренскому водоносному горизонту (рис. 4) и гидравлически связаны с грунтовыми водами аллювиальных отложений I и II террас и водами р. Сылвы.

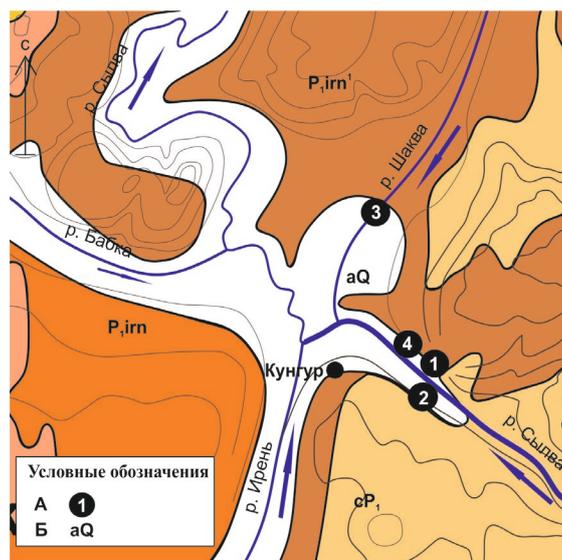


Рис. 4. Гидрогеологическая карта района исследования (120 м над у.м.). Составлена по материалам Е.А. Иконникова, Л.А. Алексеевой (Иконников и др., 1995), электронная версия А.В. Корякиной (Шиловой), Е.Н. Пыстоговой, 2017 : А – пункты отбора проб: 1 – Кунгурская Ледяная пещера; 2 – р. Сылта (гидропост у входа в пещеру); 3 – р. Шаква; 4 – атмосферные осадки. Б – гидрогеологические подразделения: аQ – водоносный четвертичный аллювиальный горизонт; P_{irt} – водоносная иренская карбонатно-сульфатная серия; P_{irt}' – водопроницаемая водоносная иренская карбонатно-сульфатная серия; cP_1 – водоносная нижнепермская карбонатная серия

Направление движения подземных вод в заповедной части пещеры (гроты Близнецы и Бирюзовое озеро) не определялось. Весной уровень воды в р. Сылве повышается. Речные воды внедряются в карстовый массив, разделяясь на два потока: первый направлен в сторону грота Вышка, второй – в сторону грота Крестовый.

В меженные периоды движение воды через карстовый массив осуществляется в обратном направлении: от грота Дружбы Народов (1.1) в сторону гротов Длинный (1.2) и Вышка (1.3) (рис. 5). Также с востока в районе грота Руины происходит питание карстовыми водами водоносной нижнепермской карбонатной серии (филипповский горизонт). В заповедной части поток воды направлен от грота Длинный в сторону Бирюзового озера (Дублянский и др., 2005). Для поступления речных вод в карстовый массив в период половодья требуется 7–9 дней.

Материалы и методы исследования

Объектами исследования являются подземные и инфильтрационные воды КЛП.

Проанализирован состав атмосферных осадков и поверхностных речных вод. Отбор проб 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. Пробы атмосферных осадков на изотопный анализ отбирались на станции Кунгур (57°26'27" с.ш.; 57°0'17" в.д.; высота 120 м н.у.м.) при помощи пробоотборника RS-1B (Palmex, Хорватия) по методике GNIP¹. Данные по химическому составу осадков заимствованы из архивных данных Кунгурской лабораторий-станции за 1968–1993 гг. (55 проб). Всего за 2017–2018 гг. для химического анализа было отобрано 68 проб воды, для изотопного анализа – 115 проб.

Определение изотопного состава воды выполнено в Инсбрукском университете (Австрия) на приборе L-2130-i (Picarro, США). Результаты обрабатывались статистически и нормализовались относительно

¹ IAEA/GNIP: IAEA/GNIP precipitation sampling guide (V2.02 September 2014), accessed at: http://www-naweb.iaea.org/napc/ih/documents/other/gnip_manual_v2.02_en_hq.pdf on December 20, 2014

стандарта V-SMOW. Средняя точность измерений $\delta^{18}\text{O}$ составила $\pm 0,1\%$, $\delta^2\text{H}$ – $\pm 0,4$ (1σ).

Анализ химического состава проводился в гидрохимической лаборатории Пермского государственного национального исследовательского университета (аттестат аккредитации № RA.RU.21HB29 от 06.03.2018) по 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). Макрокомпонентный состав определялся лабораторными методами (потенциометрическим, фотометрическим, титриметрическим и др.), микрокомпонентный – методом масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой на приборе Aurora M90 (Bruker, США).

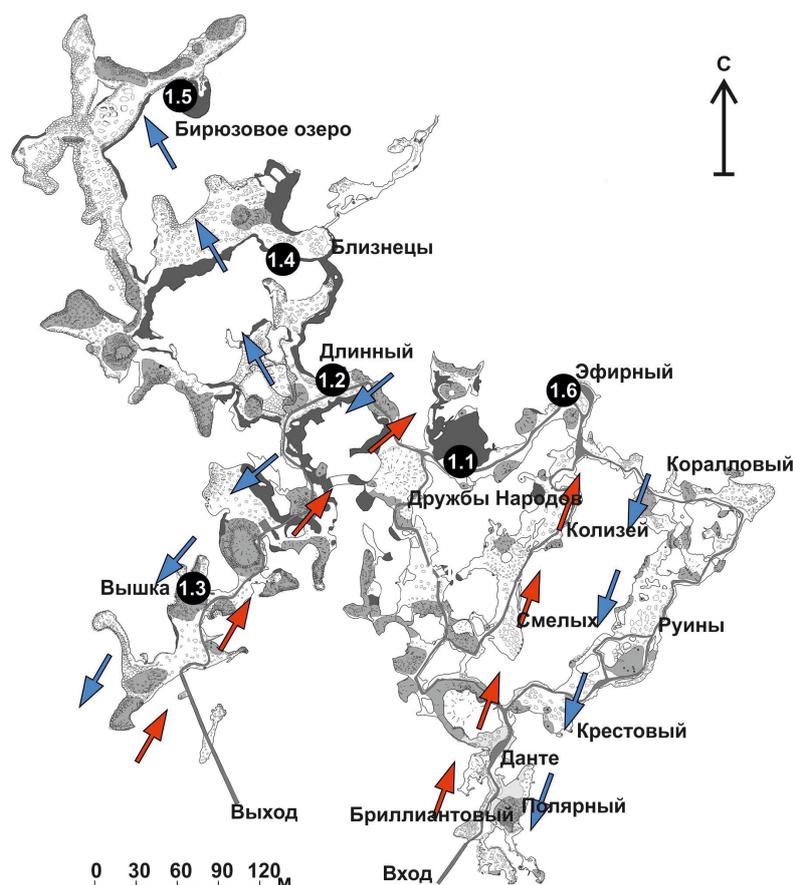


Рис. 5. План Кунгурской ледяной пещеры с точками отбора проб и направлением движения воды в периоды паводка (красные стрелки) и межени (синие стрелки). План КЛП составлен Е.П. Дорофеевым в 1964 г. и оцифрован И.А. Лавровым и А.А. Чугаевой в 2001 г. (Лавров и Чугаева, 2001): А – пункты отбора проб: 1.1. – озеро грот Дружбы Народов; 1.2. – озеро грот Длинный; 1.3. – озеро грот Вышка; 1.4. – озеро грот Близнецы; 1.5. – озеро грот Бирюзовое озеро; 1.6. – капель грот Эфирный

Типы вод определялись в соответствии с гидрохимической фацией, которая характеризуется одинаковыми гидрохимическими свойствами (Максимович, 1969). 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 (изотопный состав вод) оценивалась путем расчёта коэффициента корреляции Спирмена (r_s) за период измерений (12 месяцев, n), поскольку параметры изотопного состава не подчинялись закону нормального распределения. Проверка нормальности распределений по данным изотопных составов подземных вод, атмосферных осадков, речных вод проводи-

лась тремя способами: с помощью описательной статистики (значений медианы, среднего арифметического, коэффициентов асимметрии и эксцесса), графически (квантильные диаграммы и гистограммы), с использованием статистического критерия Шапиро-Уилка. Количественные критерии оценки силы корреляционной связи: 0–0,09 – связь практически отсутствует; 0,1–0,29 – очень слабая связь; 0,30–0,49 – слабая связь; 0,5–0,69 – средняя сила связи (заметная связь); 0,70–0,9 – сильная связь; > 0,9 – очень сильная связь; 1 – полная или функциональная связь. Корреляционный анализ проводился только по одному изотопу ($\delta^{18}\text{O}$ или $\delta^2\text{H}$), поскольку изотопный состав водорода и кислорода в исследуемых водах связан линейной зависимостью. При расчете корреляций для вод источников оказалось, что изотопные системы кислорода и водорода демонстрируют некоторые различия. В связи с этим корреляция рассчитывалась по комбинированному параметру $(\delta^2\text{H} + 8 \times \delta^{18}\text{O})/2$.

Результаты и обсуждение

Атмосферные осадки

Атмосферные осадки характеризуются низкой минерализацией ($22,07\text{--}1,9 \text{ мг/дм}^3$) и изменением ионного состава в течение всего периода исследований. Локальная линия метеорных вод (ЛЛМВ) для г. Кунгура описывается уравнением $\delta^2\text{H} = 7,8 \times \delta^{18}\text{O} + 5,1$ (рис. 6) (Казанцева, 2019, Казанцева и др., 2020).

Изотопный состав атмосферных осадков за период наблюдений изменялся в широком диапазоне от $-8,5\text{‰}$ до $-26,8\text{‰}$, по $\delta^{18}\text{O}$, от $-58,0\text{‰}$ до $-197,7\text{‰}$ по $\delta^2\text{H}$. За 2017 г. по полному ряду наблюдений с учетом количества выпавших осадков определены средневзвешенные значения дейтерия и кислорода $18 - \delta^{18}\text{O} = -12,2\text{‰}$ и по $\delta^2\text{H} = -90,8\text{‰}$.

Для атмосферных осадков прослеживается сезонное изменение изотопного состава и минерализации. Максимальное значение минерализации ($71,9 \text{ мг/дм}^3$) и наиболее тяжелый состав ($\delta^{18}\text{O} = -9,4\text{‰}$, $\delta^2\text{H} = -70,2\text{‰}$) характерны для летнего периода. Наименьшее значение минерализации ($22,0 \text{ мг/дм}^3$) и легкий изотопный состав ($\delta^{18}\text{O} = -22,6\text{‰}$, $\delta^2\text{H} = -170,5\text{‰}$) – для зимнего периода. Ионный состав характеризуется сложным составом и изменяется в зависимости от сезона. Зимой в атмосферных осадках отмечены повышенные значения ионов натрия и гидрокарбоната. Преобладающими в весенне-летне-осенний период наблюдений являются ионы гидрокарбоната и кальция. В весенних осадках повышается содержание сульфат иона, хлорида и магния, в летне-осенних – только магния.

Изменение изотопного состава атмосферных осадков зависит от приземной температуры воздуха, относительной влажности атмосферы и количества осадков. Корреляция между температурой и изотопным составом сильная и статистически значимая.

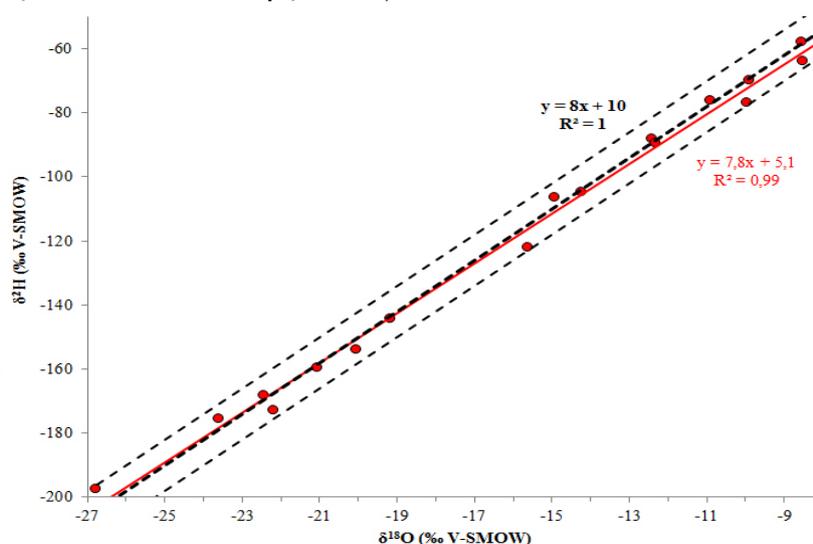


Рис. 6. Локальная линия метеорных вод для г. Кунгура. Штриховые линии ограничивают «коридор» $\pm 1\text{‰}$ $\delta^{18}\text{O}$, отражающий обычную вариабельность изотопных параметров атмосферных осадков

Коэффициент детерминации $r^2=0,75$ говорит о том, что 75% вариабельности изотопного состава можно объяснить вариабельностью температуры. Между количеством осадков и их изотопным составом корреляция средней силы ($r = 0,61$) и статистически значимая.

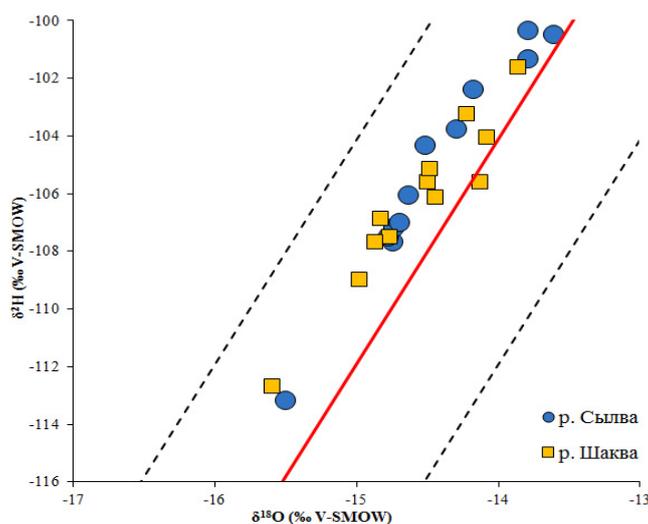
Речные воды

Основным постоянным водотоком на территории исследования является р. Сылва. Она относится к типу рек с преимущественно снеговым и дождевым питанием, доля подземного питания может составлять 15% [13].

Химический и изотопный состав р. Сылвы (рис. 7) подвержен сезонным изменениям, при этом воды имеют постоянный Ca-HCO₃-SO₄ состав. Наиболее низкие значения макрокомпонентов, минерализации (242,8–384,0 мг/дм³) и рН (7,1) и более легкий изотопный состав ($\delta^{18}\text{O} = -15,0\text{‰}$, $\delta^2\text{H} = -109,3\text{‰}$) характерны для весеннего периода, что связано с повышением роли талых вод в питании реки в это время. В летний период речные воды имеют наиболее тяжелый состав ($\delta^{18}\text{O} = -13,7\text{‰}$, $\delta^2\text{H} = -100,7\text{‰}$), что связано с увеличением доли относительно тяжелых атмосферных осадков теплого периода года ($\delta^{18}\text{O} = -9,4\text{‰}$, $\delta^2\text{H} = -70,2\text{‰}$). Изотопный состав вод р. Сылвы в летний пе-

риод в среднем наиболее близок к средне-взвешенному составу атмосферных осадков ($\delta^{18}\text{O} = -12,2\text{‰}$ и $\delta^2\text{H} = -90,8\text{‰}$), но остается изотопически легче, чем осадки этого периода. В осенний период воды р. Сылвы приобретают слабощелочной характер (рН = 8,1), минерализация повышается до 547,0 мг/дм³ и происходит облегчение изотопного состава ($\delta^{18}\text{O} = -14,3\text{‰}$, $\delta^2\text{H} = -103,5\text{‰}$). Повышение минерализации речных вод в этот период связано с их подпиткой подземными водами иренского горизонта, обусловленной тесной гидравлической связью между водами КЛП, р. Сылвой и филипповского горизонта. В зимний период также при преобладании подземного питания вода в реке легче летне-осеннего состава. Доломитовые пласты филипповского горизонта играют роль барражей, препятствуя движению вод вкост простирания пород, и способствуют стоку к р. Сылве. В зимний период на берегах р. Сылвы можно наблюдать разгрузку подземных вод из филипповских известняков и доломитов.

Р. Шаква является правым притоком р. Сылвы. Точка отбора воды находится ниже по течению р. Сылвы. Воды р. Шаквы в течение периода исследования являются слабощелочными (рН = 7,6-8,2), для них также характерна сезонная изменчивость химического состава. В 2017 г. речные воды имели постоянный Ca-Mg-HCO₃-SO₄ состав.



Весной 2018 г. воды р. Шаквы приобретают Ca-Mg-SO₄-HCO₃ состав. Изотопный состав вод изменяется в небольших пределах $\delta^{18}\text{O} = -14,1\text{‰} \div -15,0\text{‰}$, $\delta^2\text{H} = -102,9\text{‰} \div -109,2\text{‰}$, с облегчением в весенний период и утяжелением в летний.

Изотопный состав речных вод связан с изотопным составом атмосферных осадков в районе исследования. Корреляционный анализ показал, что между изотопным составом речных вод и атмосферных осадков статистически значимой корреляции не обнаружено ($r = 0,50$ при $r_{\text{crit}} = 0,58$ для р. Сыльва и р. Шаква). Это объясняется тем, что в течение года речные воды имеют не только атмосферное питание, но и подземное. При сдвиге значений $\delta^{18}\text{O}$ и $\delta^2\text{H}$ для речных вод на один-два месяца относительно атмосферных осадков корреляция для обеих рек становится сильной ($r = 0,72-0,94$ при $r_{\text{crit}} = 0,60-0,63$). То есть происходит задержка по времени от момента выпадения осадков до их поступления в реку.

Микроэлементный анализ состава речных вод показал, что содержание микроэлементов (Cu, Zn, Sr, Fe, Pb) подвержено сезонным изменениям и не превышает предельно допустимых концентраций (ГОСТ 2874-82).

Концентрация меди (ПДК = 1,0 мг/дм³) в речных водах изменяется от 0,001 до 0,002 мг/дм³. Для р. Сыльвы максимальное содержание (0,0019 мг/дм³) меди зафиксировано в зимний период, для р. Шаквы – в осенний (0,002 мг/дм³). Содержание цинка (ПДК = 5,0 мг/дм³) изменяется от 0,001 до 0,005 мг/дм³, содержание свинца (ПДК = 0,03 мг/дм³) – от 0,0002 до 0,0007 мг/дм³, достигая максимальных значений в летний период. Концентрация стронция (ПДК = 7,0 мг/дм³) колеблется от 0,008 до 2,85 мг/дм³, повышенные значения отмечены в осенний период, пониженные – в весенний. Содержание железа (ПДК = 0,3 мг/дм³) изменяется от 0,1–0,2 мг/дм³ в осенний период до 0,4–0,9 мг/дм³ – в весенний.

Инфильтрационные и подземные воды КЛП

Разгрузка инфильтрационных вод в виде капли из органной трубы в гроте Эфирный происходит постоянно из подошвы неволин-

ской пачки, представленной доломитами и известняками. Сезонные значения определены по архивным данным за 1953–1993 гг. (33 пробы). Максимальная минерализация капли характерна для осеннего периода (1813,2 мг/дм³), минимальная – для зимнего (1491,0 мг/дм³), весной и летом минерализация равна 1671,01–706,8 мг/дм³. Изотопный состав капли почти постоянен ($\delta^{18}\text{O} = -12,2\text{‰} \div -12,4\text{‰}$, $\delta^2\text{H} = -89,8\text{‰} \div -93,4\text{‰}$; рис. 8). Это предполагает, что участок разгрузки относится к гидродинамической зоне подвешенных вод, сформированной на местном водоупоре (неволинская пачка). Изотопно легкий состав капли характерен для зимнего периода ($\delta^{18}\text{O} = -12,8\text{‰}$, $\delta^2\text{H} = -93,4\text{‰}$), изотопно тяжелый – для летнего ($\delta^{18}\text{O} = -12,2\text{‰}$, $\delta^2\text{H} = -89,8\text{‰}$), что соответствует изменению изотопного состава атмосферных осадков. Практически в течение всего периода исследования изотопный состав инфильтрационных вод оказывается тяжелее средневзвешенного состава атмосферных осадков ($\delta^{18}\text{O} = -12,2\text{‰}$ и $\delta^2\text{H} = -90,8\text{‰}$; рис. 9). Только в декабре 2017 г. и январе 2018 г. воды капли изотопно легче осадков. Это объясняется отепляющим эффектом в зимний период в зонах выхода теплого воздуха из пещеры (Кадебская, 2016). В результате отепляющего эффекта происходило таяние снежного покрова и поступление влаги по органной трубе. Температура почвы в провалах над органной трубой грота Эфирного составляла $+0,5^\circ\text{C} \div +2,0^\circ\text{C}$, поэтому происходило просачивание талых вод с поверхности, обедненных тяжелыми изотопами кислорода и водорода. Корреляционный анализ показал, что между каплей и осадками нет зависимости ($r = 0,17$ при $r_{\text{crit}} = 0,58$). Таким образом, для капли выделено два вида просачивания воды: быстрое, обусловленное снеготаянием и резким облегчением изотопного состава, и медленное – перенос воды от подвешенной зоны до уровня пещеры.

Химический и изотопный состав подземных вод определен для пяти озер в пяти гротах. Минерализация подземных вод изменяется посезонно (рис. 10), но эти изменения не приводят к изменению химического типа воды. Озерная вода имеет постоянный Ca-SO₄ состав. Минерализация вод в 2017 г. изменяется от 1846 до 2260 мг/дм³. При этом

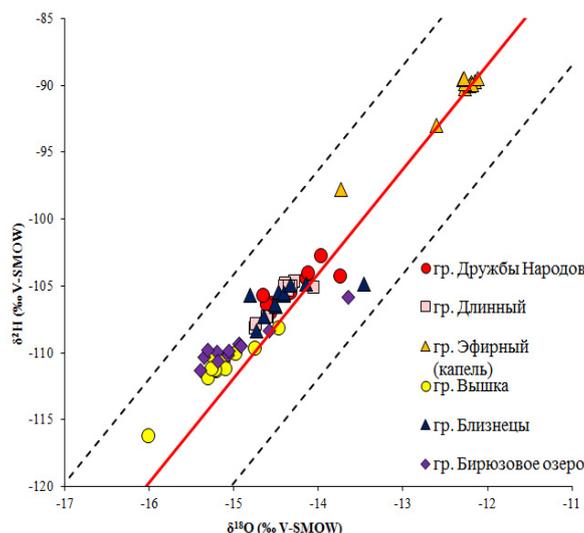


Рис. 8. Изотопный состав подземных и инфильтрационных вод. Сплошная красная линия – ЛЛМВ

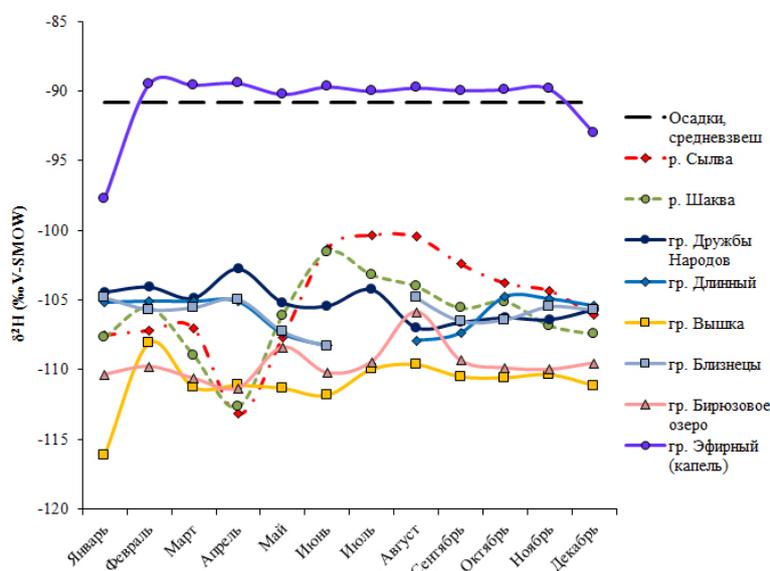


Рис. 9. Сезонный ход (δ^2H) изотопного состава подземных и инфильтрационных вод Кунгурской ледяной пещеры

максимальное значение минерализации достигается во всех гротах в весенний период, за исключением озера в гроте Близнецы (1.4). Высокая минерализация в осенний период для грота Близнецы обусловлена повышенной концентрацией ионов натрия ($113,7 \text{ мг/дм}^3$) и хлорид-иона ($34,6 \text{ мг/дм}^3$) по сравнению с весенним периодом ($1,9 \text{ мг/дм}^3$ и $0,5 \text{ мг/дм}^3$ соответственно). Ранее исследователи изменение минерализации воды в озерах пещеры связывали с поступлением речных вод во время весеннего половодья. Весной в период снеготаяния слабоминерализованные речные воды поступают в подземное пространство, после чего фиксирует-

ся уменьшение минерализации воды в озерах, что характерно, например, для весны 2016 г. Нами установлено, что весной 2017 г. повышенные значения минерализации были связаны с участием в питании вод нижележащей нижнепермской карбонатной серии (филипповский горизонт). Воды филипповского горизонта слабо минерализованы ($400\text{--}600 \text{ мг/дм}^3$), но на контакте с иренскими гипсами минерализация повышается до $1500\text{--}3600 \text{ мг/дм}^3$. В зимне-весенний период воды филипповского горизонта имеют Ca-SO_4 состав, в летне-осенний состав усложняется, и они становятся $\text{Ca-Mg-SO}_4\text{-HCO}_3$ и $\text{Ca-Na-Mg-SO}_4\text{-HCO}_3$ [2, 3]. При подъеме воды на

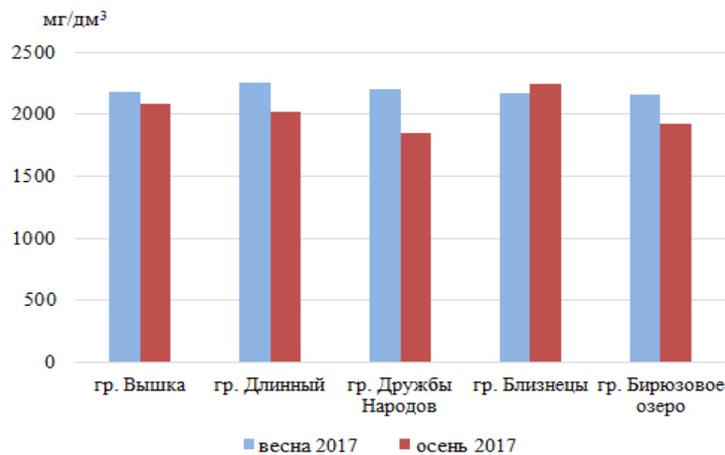


Рис. 10. Изменение общей минерализации подземных вод Кунгурской ледяной пещеры

р. Сылве происходит подпор вод нижнепермской карбонатной серии, по трещиноватому массиву они поступают в вышележащий иренский горизонт, что ведет к изменению минерализации вод. В осенний период в гроте Близицы (1.4) также зафиксирована подпитка вод из нижележащих горизонтов, вследствие чего воды обогатились ионами натрия и хлора.

Результаты изотопного анализа показали, что изотопный состав подземных вод изменяется в довольно узких пределах: от $-14,1\%$ до $-15,2\%$ по $\delta^{18}\text{O}$ и от $-104,3\%$ до $-111,8\%$ по $\delta^2\text{H}$, при этом состав вод в каждом гроте почти постоянен. Облегчение и утяжеление состава вод в каждом гроте происходит неравномерно. Это связано с режимом подъема уровня воды на р. Сылве и составом атмосферных осадков в разные периоды времени и перемещением воды внутри массива Ледяной горы. Значения $\delta^{18}\text{O}$ и $\delta^2\text{H}$ подземных вод легче средневзвешенного значения атмосферных осадков ($\delta^{18}\text{O} = -12,2\%$ и $\delta^2\text{H} = -90,8\%$) в течение всего года (рис. 9). Это предполагает, что в питании этих вод преобладают изотопно легкие воды зимнего и весеннего периода.

В зимне-весенний период в гротах Вышка (1.3) и Бирюзовое озеро (1.5) отмечен наиболее легкий состав вод, когда происходит влияние на них изотопно легких осадков и речных вод во время подъема уровня воды. В летний период они имеют наиболее изотопно тяжелый состав, формирующийся под влиянием тяжелых осадков, выпавших в этот пе-

риод, и состава речных вод. Корреляционный анализ подтверждает связь изотопного состава вод в гроте Бирюзовое озеро (1.5) с составом атмосферных осадков ($r = 0,59$ при $r_{\text{crit}} = 0,58$) и водами р. Сылвы ($r = 0,68$ при $r_{\text{crit}} = 0,58$). При этом связи между составами воды в гроте Вышка (1.3), атмосферными осадками и речными водами не выявлено ($r = 0,0$ и $r = 0,50$).

Для гротов Длинный (1.2) и Близицы (1.4) летом наблюдается облегчение изотопного состава, зимой – утяжеление. В летний период состав вод в гротах Длинный (1.2) и Близицы (1.4) сформировался под влиянием изотопно легких паводковых вод, поскольку состав вод р. Сылвы весной облегчен по сравнению с летними осадками. При этом корреляционной связи между составами воды в гротах Близицы (1.4), Длинный (1.2) и атмосферными осадками, речными водами не установлено.

Движение воды в период весеннего половодья осуществлялось со стороны р. Сылвы вглубь пещеры по направлению от грота Вышка (1.3) к гроту Дружбы Народов (1.1). Наши исследования позволили разделить воды в КЛП на две группы, связанные с передачей изотопного сигнала от речных вод к озерным. В первую группу включены воды гротов Вышка и Бирюзовое озеро, изотопный состав которых связан с изотопным составом речных вод. На рис. 9 отчетливо видно, что ход изменения изотопного состава вод в этих гротах повторяет ход речных вод, но с некоторой задержкой. Время, которое

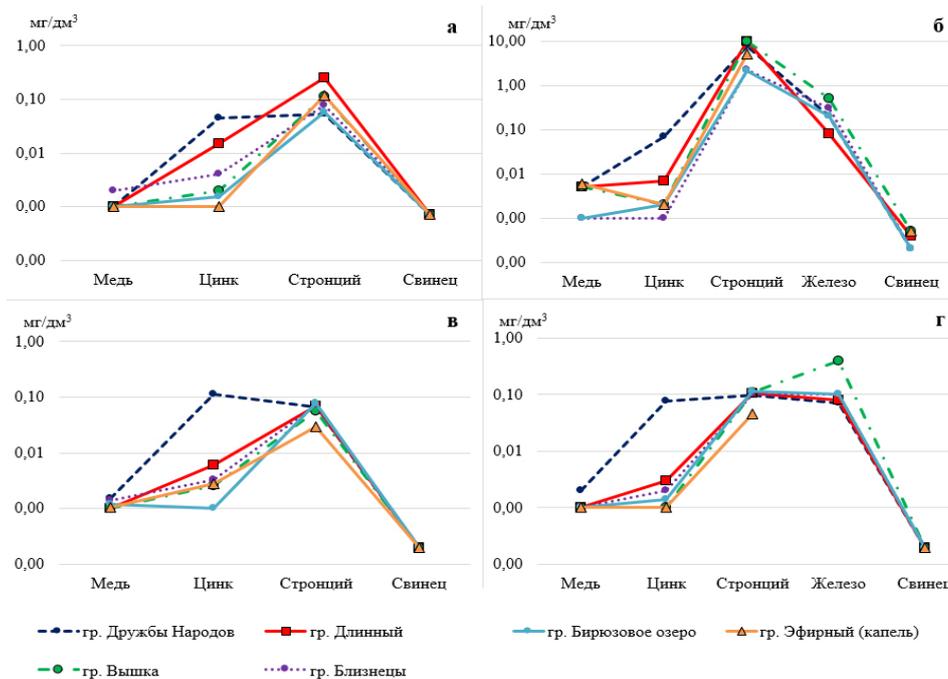


Рис. 11. Содержание (мг/дм^3) микроэлементов в подземных водах: а – зимний период 2018 г.; б – осенний период 2018 г.; в – летний период 2018 г.; г – осенний период 2018 г. Графики приведены в логарифмическом масштабе

требуется для транзита воды через карстовую систему и для формирования состава в гротах Вышка (1.3) и Бирюзовое озеро (1.6), составляет 1–2 месяца. Во вторую группу включены воды гротов Дружбы Народов, Длинный и Близнецы, не связанные с речными водами. На графике сезонного хода изотопного состава отражена идентичность изменения состава в этих гротах. Время транзита речной воды в гроты Длинный (1.2) и Близнецы (1.4) составляет три месяца. Учитывая, что в гроте Вышка (1.3) наиболее легкий состав вод характерен для зимнего периода, время транзита увеличивается до шести месяцев. Для грота Дружбы Народов (1.1) наиболее легкий состав отмечен осенью 2017 г., наиболее тяжелый – весной 2018 г. Таким образом, время прохождения речных вод до озера грота Дружбы Народов (1.1) при движении потока со стороны грота Вышка составляет девять месяцев. Зависимости между составом вод озера Дружбы Народов и поверхностными водами (атмосферные осадки и речные воды) не обнаружено. Малая корреляционная зависимость между изотопным составом подземных и речных вод подтверждают, что в питании подземных вод участвуют не только речные воды, но и воды нижележащих горизонтов.

Концентрация основных микроэлементов (Cu, Zn, Sr, Pb) в подземных и инфильтрационных водах КЛП изменяется посезонно (рис. 11). Содержание меди варьирует от 0,001 до 0,006 мг/дм^3 и не превышает предельно допустимых значений (ПДК = 1,0 мг/дм^3). Концентрация меди повышена в основном в осенний период, для двух гротов – в летний (Близнецы (1.4)) и зимний (Бирюзовое озеро (1.5)). Содержание цинка в водах КЛП изменяется от 0,0001 до 0,1140 мг/дм^3 при ПДК = 5,0 мг/дм^3 , достигая максимальных значений в летне-осенне-зимний периоды. Содержание железа (ПДК = 0,3 мг/дм^3) повышено во всех гротах в осенний период и колеблется от 0,1 до 0,5 мг/дм^3 . В гроте Вышка (1.3) концентрация железа (0,5 мг/дм^3) превышает предельно допустимое значение. Концентрация стронция минимальная в летне-зимний периоды, максимальная в осенний период и в трех гротах (Дружбы Народов (1.1), Длинный (1.2) и Вышка (1.3)) превышает ПДК = 7,0 мг/дм^3 . Повышенные значения стронция осенью в водах пещеры связаны с растворением гипсоангидритовых пород. Максимальные содержания свинца (0,0007 мг/дм^3 , ПДК = 0,03 мг/дм^3) зафиксированы в летний период во всех гротах.

Выводы

Комплексный изотопно-геохимический анализ вод Кунгурской ледяной пещеры, выполненный по результатам исследований за 2017–2018 гг., позволил выявить особенности формирования состава этих вод. Инфильтрационные воды капели из органной трубы в гроте Эфирный имеют практически постоянный изотопный состав в течение всего периода исследования. Это объясняется тем, что участок разгрузки относится к гидродинамической зоне подвешенных вод, сформированной на местном водоупоре – неволинской пачке. В течение года выделяется два типа просачивания воды через массив горных пород: быстрое, связанное с периодами снеготаяния на поверхности, когда происходит резкое облегчение изотопного состава капели, и медленное – инфильтрация основной массы воды, характеризующаяся малой вариабельностью изотопного состава.

Подземные воды иренского горизонта КЛП имеют постоянный Ca-SO₄ состав. Химический состав подземных вод изменяется в зависимости от сезона, изотопный состав практически постоянен для каждого грота. Последнее связано с режимом подъема уровня речных вод и перемещением карстовых вод внутри массива Ледяной горы. Движение подземных вод в КЛП имеет сложный характер и связано с режимом подъема уровня воды в р. Сылве. Весной движение вод осуществляется со стороны р. Сылвы через грот Вышка и далее к гроту Дружбы Народов и грот Длинный – грот Бирюзовое озеро. Выделены две группы озер, имеющие связь с речными водами. Гроты Вышка и Бирюзовое озеро, напрямую связанные с речными водами, относятся к первой группе. Время транзита речных вод через массив горных пород в гроты Вышка и Бирюзовое озеро составляет один-два месяца. Гроты Дружбы Народов, Длинный и Близнецы, не имеющие прямой связи с речными водами, относятся ко второй группе. Время движения воды в гроты Длинный и Близнецы составляет три-шесть месяцев, до грота Дружбы Народов – девять месяцев. В питании подземных вод преобладают изотопно легкие воды зимнего и весеннего периода, поскольку изотопный состав подземных вод оказы-

вается легче средневзвешенного состава осадков. Корреляционная зависимость между составом подземных вод, речными водами и атмосферными осадками слабая или вообще отсутствует. Это подтверждает, что в питании карстовых вод участвуют не только речные воды и атмосферные осадки, но и воды нижнепермской карбонатной серии филипповского горизонта. Химический анализ также подтверждает, что в течение года происходит подпитка подземных вод КЛП водами филипповского горизонта. В зимний период подземные воды иренского и филипповского горизонтов дренируют речные воды, вследствие чего минерализация речной воды повышается и воды приобретают наиболее легкий состав по сравнению с летне-осенним периодом. В это время на реках можно наблюдать незамерзающую полынью при выходе подземных вод.

Микроэлементный состав формируется под влиянием речных вод и подтока вод нижележащих горизонтов. Изменение концентрации микроэлементов в подземных и инфильтрационных водах в основном соответствует их изменению в речных водах в летне-осенний периоды. В зимний и весенний периоды накопление микроэлементов в водах отлично от их концентраций в речных водах, что предполагает преимущественно другой вид питания.

Библиографический список

- Алексеевский Н.И., Антонова М.М. Сылва [Электронный ресурс] URL: https://water-f.ru/Водные_объекты/619/Сылва (дата обращения: 15.12.2020).
- Горбунова К.А., Сычкина Г.А., Блинов С.М., Дорофеев Е. П. Режим карстовых вод Кунгурской пещеры // Кунгурская Ледяная пещера / Пермский ун-т. Пермь, 1995. Вып. 1. С. 63–80.
- ГОСТ 2874-82 Вода питьевая. Гигиенические требования и контроль за качеством.
- Дублянский В.Н. и др. Кунгурская Ледяная пещера: опыт режимных наблюдений. Екатеринбург: УрО РАН, 2005. 375 с.
- 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, Пермь, 1995 г.
- Кадебская О.И. Геологическое состояние Кунгурской ледяной пещеры и прилегающей территории, ее охрана и рациональное использо-

вание: Автореф. дис. ... канд. геогр. наук. Пермь, 2004.

Кадебская О.И. Минеральные и геохимические индикаторы природных процессов в подземных карстовых ландшафтах Урала: дис. ... доктора геогр. наук. Пермь, 2016.

Казанцева А.С. Исследование изотопного состава атмосферных осадков в г. Кунгуре в 2016–2018 гг. // Горное эхо. Пермь, 2019. № 1(74). С. 7–10.

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.

Катаев В.Н., Кадебская О.И. Геология и карст города Кунгура: монография. Пермь, 2010. 236 с.

Катаев В.Н., Копанцева Е.Н., Ермолович И.Г. Современный химический состав вод озер зоны сочленения Уфимского вала и Предуральяского прогиба // Вестник Пермского университета. Геология. Пермь, 2017. Т. 16, № 4. С. 3323–46.

Лавров И.А., Чугаева А.А. Электронный план кунгурской ледяной пещеры // Пещеры: Межвуз. сб. научн. тр. / Перм. ун-т. Пермь, 2001. С. 73–75.

Килин Ю.А., Минькевич И.И. и др. Гидрогеологическая обстановка района Кунгурской ледяной пещеры // Пещеры: сб. научн. тр. / Естественнонаучн. Ин-т Перм. гос. Нац. Иссл. Ун-та. Пермь, 2014. Вып. 37. С. 1411–49.

Максимович Г.А. Основы карстологии. Т. 2: Вопросы гидрогеологии карста, реки и озера карстовых районов, карст мела, гидротермокарст: учеб. пособие / Геогр. о-во СССР; Ин-т карстологии и спелеологии; Перм. ун-т. Пермь, 1969. 529 с.

Чайковский И.И. Структурно-тектоническое положение Ледяной горы и Кунгурской ледяной пещеры // Комплексное использование и охрана подземных пространств: Междунар. науч.-практ. конф., посвящ. 100-летию юбилею науч. и туристско-экскурсионной деятельности в Кунгурской ледяной пещере и 100-летию со дня рожд. В.С. Лукина. Пермь, 2014. С. 39–42.

On the Formation of the Chemical and Isotopic Composition of Groundwater of the Irenskiy Aquifer (on the example of the Kungur Ice Cave)

A.S. Kazantseva^a, O.I. Kadebskaya^a, Y.V. Dublyansky^b, V.N. Kataev^c

^a Mining Institute of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences
614007, Perm, Sibirskaya str. 78a

^b Institute of Geology, University of Innsbruck
6020, Innsbruck, Austria, Innrain 52

^c Perm State University, 614990, Perm, Bukireva str. 15

E-mail: kazanalena@bk.ru; icecave@bk.ru; kyoto_yuri@mail.ru; kataev@psu.ru

Seasonal changes in the chemical and isotopic composition (deuterium and oxygen-18) of surface runoff water, atmospheric precipitation, infiltration and groundwater of the Kungur Ice Cave were studied. The study was conducted for the purpose of a comprehensive analysis of groundwater, determination of patterns of change, and relationship between the characteristics of different water types, that is necessary for a more effective assessment of groundwater resources and prediction of the composition and quality of groundwater. The movement of groundwater in the cave has a complex character. The main flow paths, periodicity and some peculiarities of water movement in the karst massif have been determined and confirmed. Obtained data are valuable for hydrochemical monitoring in the cave.

Key words: *Kungur Ice Cave; Irenian horizon; groundwater; isotope analysis; chemical analysis.*

References

Alekseevskiy N.I., Antonova M.M. Sylva [Sylva] URL: https://water-uf.ru/Водные_объекты/619/Сылва (accessed 15.12.2020). (in Russian)

Gorbunova K.A., Sychkina G.A., Blinov S.M., Dorofeev E.P. 1995. Rezhim karstovykh vod Kungurskoy peshchery [Karst water regime in the

Kungur Cave]. In: Kungurskaya Ledyanaya peshchera. Permskiy univ. Perm, 1:63–80. (in Russian)

GOST 2874-82 Voda pitevaya. Gigienicheskie trebovaniya i kontrol za kachestvom [State Industrial Standard Requirements 2874-82. Potable water. Hygienic requirements and control for quality]. (in Russian)

- Dublyanskiy V.N. et al.* 2005. Kungurskaya Ledyanaya peshchera: opyt rezhimnykh nablyudeniya [Kungur Ice Cave: an experience of regime observations]. Ekaterinburg: UrO RAN, p. 375. (in Russian)
- Ikonnikov E.A. et al.* 1995. Otchet o rezultatakh rabot po sostavleniyu polistnoy gidrogeologicheskoy karty masshtaba 1:500000 listov R-39-G, R-40-V, G, 0-40-B [Report about study results on creation of listing hydrographic map of 1:500000 scale, Sheets R-39-G, R-40-V, G, 0-40-B]. Perm. (in Russian)
- Kadebskaya O.I.* 2004. Geologicheskoe sostoyanie Kungurskoy Ledyanoy peshchery i prilegayushchey territorii, eyo okhrana i ratsionalnoe ispolzovanie [Geological state of the Kungur Ice Cave and surrounding territory, its protection and rational usage]. Dis. kand. geogr. nauk. Perm. (in Russian)
- Kadebskaya O.I.* 2016. Mineralnye i geokhimicheskie indikatory prirodnykh protsessov v podzemnykh karstovykh landshaftakh Urala [Mineral and geochemical indices of natural processes in underground karst landscapes]. Dis. Dr. Geogr. Nauk, Perm. (in Russian)
- Kazantseva A.S.* 2019. Issledovanie izotopnogo sostava atmosferykh osadkov v g. Kungure v 2016-2018 gg [Study of precipitation isotopic composition in Kungur city]. Gornoe ekho. 1(74):7-10. (in Russian)
- Kazantseva A.S., Kadebskaya O.I., Dublyanskiy Yu.V., Kataev V.N.* 2020. Monitoring izotopnogo sostava atmosferykh osadkov na territorii Permskogo kraia (predvaritelnye rezultaty) [Isotopic composition monitoring of precipitation on Perm krai territory (Preliminary results)]. Meteorologiya i gidrologiya. 3:87-94. (in Russian)
- Kataev V.N., Kadebskaya O.I.* 2010. Geologiya i karst goroda Kungura [Geology and karst of Kungur city]. Perm, p. 236. (in Russian)
- Kataev V.N., Kopantseva E.N., Ermolovich I.G.* 2017. Sovremennyy khimicheskiy sostav vod ozer zony sochleneniya Ufimskogo vala i Preduralskogo progiba [The contemporary chemical composition of the lakes waters at zone of juncture of the Ufimian swell and Pre-Urals foredeep]. Vestnik Permskogo universiteta. Geologiya. 16(4):340-353. doi: 10.17072/psu.geol.16.4.340 (in Russian)
- Kilin Yu.A., Minkevich I.I. et al.* 2014. Gidrogeologicheskaya obstanovka rayona Kungurskoy Ledyanoy peshchery [Hydrogeological environment of the Kungur Ice Cave area]. In: Peshchery: Estestvennonauchn. Inst. PSU. Perm, 37:141-149. (in Russian)
- Lavrov I.A., Chugaeva A.A.* 2001. Elektronnyy plan kungurskoy ledyanoy peshchery [Electronic plan of the Kungur Ice Cave]. In: Peshchery: Estestvennonauchn. Inst. PSU. Perm, pp. 73-75. (in Russian)
- Maksimovich G.A.* 1969. Osnovy karstovedeniya. T. 2: Voprosy gidrogeologii karsta, reki i ozera karstovykh rayonov, karst mela, gidrotermokarst [Fundamentals of karst studies. T.2. Problems of karst hydrogeology, rivers and lakes of karst areas, chalk karst, hydrothermokarst]. Geogr. o-vo SSSR; Inst. karstovedeniya i speleologii; PSU, p. 529. (in Russian)
- Chaykovskiy I.I.* 2014. Strukturno-tektonicheskoe polozhenie Ledyanoy gory i Kungurskoy Ledyanoy peshchery [Structural tectonic location of Ledyanaya Mountain and Kungur Ice Cave]. In: Kompleksnoe ispolzovanie i okhrana podzemnykh prostranstv: Mezhdunar. nauch.-prakt. konf., posvyashch. 100-letnemu yubileyu nauch. i turistsko-ekskursionnoy deyatel'nosti v Kungurskoy Ledyanoy peshchere i 100-letiyu so dnya rozhd. V.S. Lukina. Perm, pp. 39-42. (in Russian)