

На правах рукописи



Казанцева Алена Сергеевна

**ИЗОТОПНО-ГЕОХИМИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ
СОСТАВА ПОДЗЕМНЫХ ВОД В НИЖНЕПЕРМСКИХ ОТЛОЖЕНИЯХ
КАРСТОВЫХ РАЙОНОВ СРЕДНЕГО ПРЕДУРАЛЬЯ**

Специальность 1.6.6. – Гидрогеология

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата геолого-минералогических наук

Москва – 2022

Работа выполнена на кафедре динамической геологии и гидрогеологии Пермского государственного национального исследовательского университета и в «Горном институте Уральского отделения Российской академии наук» – филиале Пермского федерального исследовательского центра Уральского отделения РАН

Научный
руководитель:

Катаев Валерий Николаевич,
доктор геолого-минералогических наук, доцент.
Заведующий кафедрой динамической геологии и гидрогеологии
Пермского государственного
национального исследовательского университета

Официальные
оппоненты:

Абдрахманов Рафил Фазылович,
доктор геолого-минералогических наук, профессор, заслуженный
деятель науки РФ.
Заведующий лабораторией гидрогеологии и геоэкологии
Федерального государственного бюджетного учреждения науки
Института геологии Уфимского федерального
исследовательского центра РАН, г. Уфа

Токарев Игорь Владимирович,
кандидат геолого-минералогических наук.
Ведущий специалист Научного парка Федерального
государственного бюджетного образовательного учреждения
высшего профессионального образования "Санкт-
Петербургского государственного университета», г. Санкт-
Петербург

Ведущая организация: **Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт земной коры Сибирского отделения российской
академии наук (ИЗК СО РАН), г. Иркутск**

Защита состоится «28» апреля 2022 года в 15:00 часов на заседании диссертационного совета 24.2.364.01, созданного на базе ФГБОУ ВО «Российский государственный геологоразведочный университет имени Серго Орджоникидзе (МГРИ)», по адресу: 117997, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, д.23, в аудитории 4-73 (зал диссертационных советов).

С диссертацией можно ознакомиться в Научной библиотеке и на сайте ФГБОУ ВО «Российский государственный геологоразведочный университет имени Серго Орджоникидзе (МГРИ)», по адресу: 117997, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, д.23, <http://mgri.ru/>.

Автореферат разослан «__» _____ 2022 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
24.2.364.01,
д-р геол.-минерал. наук, профессор



Вязкова Ольга Евгеньевна

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность работы. На современном этапе в условиях использования новейших технологий, возникает необходимость широкого внедрения новых прецизионных методов исследований для решения гидрогеологических задач. Сегодня особое внимание уделяется изотопно-геохимическим методам исследования подземных вод.

На сегодняшний день в Федеральном агентстве по недропользованию разработана стратегическая программа развития минерально-сырьевой базы России в области гидрогеологии «Долгосрочная государственная программа изучения недр и воспроизводства минерально-сырьевой базы России на основе баланса потребления и воспроизводства минерального сырья» (от 15.05.2006). Отдельные исследования данной программы связаны с определением химического состава, исследованием изотопного состава подземных вод для установления их генезиса и возраста, необходимые для разработки методов прогноза ресурсов и качества их при эксплуатации.

За период многолетних исследований, начиная с конца XIX в., накоплен большой гидрогеохимический материал по условиям распространения и формирования подземных вод в пределах карстовых районов средней части Предуралья. Работы представителей (Г.А. Максимович, Л.А. Шимановский и И.А. Шимановская, А.М. Кропачев, И.Н. Шестов, Е.А. Иконников, Г.К. Михайлов и др.) Пермской гидрогеологической школы послужили основанием для составления кадастра подземных вод и различных сводок. Данные исследования проводились без привлечения методов тонкого анализа, таких как микроэлементный и изотопный, которые в комплексе имеют большой потенциал для получения информации, необходимой для более эффективной оценки ресурсов подземных вод и осуществление прогнозирования состава и качества подземных вод.

Работ по изучению условий формирования природных вод, основанных на изучении вариаций изотопных соотношений водорода и кислорода на территории средней части Предуралья, было выполнено крайне мало, и большая часть их них посвящена изотопному составу атмосферных осадков (1980-1990 гг., 2011-2014 гг.). С 2016 г. сотрудники Кунгурской лаборатории-стационара «Горного института УрО РАН» совместно с сотрудниками кафедры динамической геологии и гидрогеологии ПГНИУ занимаются исследованием стабильных изотопов водорода и кислорода атмосферных осадков, речных вод, выходов подземных вод, поверхностных и подземных карстовых озер Северного и Среднего Урала.

Данная работа в своей методической направленности развивает гидрогеохимические подходы к решению вопросов генезиса подземных вод, вопросов формирования и динамики изменения состава и качества подземных вод. В основе работы заложены результаты комплексного изучения состава подземных вод, вод руслового стока и атмосферных осадков, полученные на основе использования сочетания современных методов изотопного и химического (включая и микроэлементный) анализа.

Главная научная идея работы – изучение сезонных вариаций стабильных изотопов водорода и кислорода в сочетании с вариациями химического состава подземных вод позволяет устанавливать особенности их формирования в зоне активного водообмена в карстовых массивах.

Целью работы является установление условий формирования изотопного и химического состава подземных вод, распространенных в нижнепермских отложениях карстовых районов средней части Предуралья.

Для достижения поставленной цели **были решены следующие задачи:**

- систематизация данных, полученных отечественными и зарубежными авторами в гидрогеологических исследованиях, на основе применения изотопного анализа;
- обоснование и создание сети наблюдательных постов в районах исследований;
- посезонное опробование водопроявлений на наблюдательных постах с последующим лабораторным определением изменений изотопного и химического состава вод;
- создание базы данных изотопов водорода ($\delta^2\text{H}$) и кислорода ($\delta^{18}\text{O}$) подземных вод, речных вод и атмосферных осадков;
- установление закономерностей изменения и зависимостей между составом подземных вод, речных вод и атмосферных осадков;
- уточнение генезиса подземных вод на основе установленных закономерностей изменения их изотопно-геохимического состава.

Объектом исследования являются подземные воды, распространенные в нижнепермских отложениях карстовых районов средней части Предуралья.

Предметом исследования являются закономерности и особенности формирования изотопного и химического состава подземных вод в нижнепермских отложениях карстовых районов средней части Предуралья.

Научная новизна результатов работы заключается в следующем:

- впервые для исследуемых районов получены изотопные характеристики атмосферных осадков, подземных вод и вод поверхностного руслового стока;
- на основе комплексного анализа изотопного, макро- и микроэлементного состава вод определены основные особенности формирования состава подземных вод в нижнепермских отложениях карстовых районов Среднего Предуралья и представлены концептуальные модели их формирования;
- впервые установлена широтная зональность распределения изотопов водорода и кислорода в подземных водах, распространённых в нижнепермских отложениях карстовых районов;
- прослежено влияние литологического состава вмещающих пород на формирование изотопно-гидрохимического облика подземных вод.

Практическая значимость работы определяется следующими результатами:

- изучение стабильных изотопов воды рекомендуется в качестве дополнительного метода при гидрогеологических исследованиях для получения

новой количественной информации и понимания механизмов формирования состава подземных вод и особенностей питания водоносных горизонтов;

- по изотопным данным выявлены временные периоды транзита поверхностных вод к водоносным горизонтам, что рекомендуется учитывать при проведении гидрогеохимического мониторинга;

- полученные данные по изотопному составу подземных вод в карбонатно-сульфатных, терригенно-карбонатных и терригенных отложениях на территории Среднего Предуралья, рекомендуются к использованию в качестве природных фоновых значений для нормирования антропогенных воздействий;

- создана база данных по изотопам, которая внесена в международную базу данных GNIP (Global Network of Isotopes in Precipitation) и IAEA (International Atomic Energy Agency), и предназначена для решения информационно-исследовательских задач. Данные изотопного состава речных и подземных вод внесены в дополнительный раздел международной базы. Картографический и графический материалы, построенные на базе данных изотопов, использовались в диссертационной работе и мониторинговых исследованиях в Кунгурской Ледяной пещере;

- отдельные результаты исследования используются в учебном процессе в рамках дисциплины «Изотопные методы в гидрогеологии», читаемой на геологическом факультете Пермского государственного национального исследовательского университета.

Предметом защиты являются следующие положения:

1. Изменения изотопного состава водорода и кислорода и химического состава подземных вод в нижнепермских отложениях в карстовых массивах Среднего Предуралья свидетельствуют, что их питание в весенний, летний и зимний периоды осуществляется за счет атмосферных осадков и разгрузки напорных вод из нижележащих водоносных горизонтов, а в осенний период исключительно за счет атмосферных осадков;

2. Изотопный состав подземных вод зоны активного водообмена карстовых массивов полностью определяется изотопным составом поверхностных вод в течение 1-3 месяцев, что следует использовать при гидрогеохимическом мониторинге;

3. Подземные воды в карбонатно-терригенных и в карбонатно-сульфатно-терригенных нижнепермских породах Предуралья отличаются не только минерализацией, но и изотопным составом, что главным образом определяется взаимодействием «вода-порода» и в меньшей мере – релеевской дистилляцией. Это следует считать дополнительным критерием оценки качества подземных вод и изучения длительных циклов водообмена.

Достоверность результатов работы обеспечивается углубленным анализом состояния решаемых проблем; применением обоснованного комплекса методов лабораторного анализа водных проб, теории и методологии гидрогеологических концептуальных построений, основанных на исследованиях отечественных и зарубежных ученых. Для достижения поставленной цели большой объем фактического материала (более 700 водных проб на 38 пунктах), в первую очередь полученный автором по результатам посезонного мониторинга

химического и изотопного состава водопроявлений на опорных участках, позволил оперировать большими массивами количественных параметров состояния водной среды.

Аналитические исследования химического состава вод производились в аккредитованной гидрохимической лаборатории Пермского государственного национального исследовательского университета согласно стандартным методам и ГОСТам; изотопного состава – в Инсбрукском университете (Австрия) на анализаторе L-2130-i (Picarro, США).

Дополнительные сведения по районам исследований были получены в процессе выполнения научно-исследовательских работ в рамках гранта РФФИ и ФНИ.

Личный вклад автора в получение научных и практических результатов, изложенных в данной работе, выражается в его участии в период с 2013 г. и по настоящее время в ведении гидрогеологического и гидрохимического мониторинга в Кунгурской Ледяной пещере, с 2016 по 2018 гг. в исследовании по теме «Исследование формирования изотопного и химического состава природных вод на территории Пермского края» (17-45-590369 p_a). Все материалы исследований, положенные в основу диссертации, обработаны автором лично. Все результаты и выводы получены самостоятельно. Материалы, представленные в данной работе без библиографических ссылок, принадлежат автору.

Публикация и апробация работы. По теме диссертационных исследований автором опубликовано 19 работ, в том числе 3 в рецензируемых научных изданиях, входящих в перечень ВАК, 3 – индексированы в базе данных Scopus. Результаты исследований докладывались и обсуждались на научных форумах различного масштаба, в том числе: ежегодной научной сессии Горного института УрО РАН (Пермь, 2016-2021), X Международной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых (Пермь, 2017), Всероссийской конференции II Крымские карстологические чтения (Симферополь, 2018), XXIII Международного симпозиума им. академика М.А. Усова (Томск, 2019, 2021), XXII симпозиум по геохимии изотопов им. академика А.П. Виноградова (Москва, 2019), Всероссийской молодежной геологической конференции памяти В.А. Глебовицкого (Санкт-Петербург, 2020), XXIII Всероссийском совещании по подземным водам востока России (Иркутск, 2021).

Структура и объем работы. Работа объемом 151 страницы состоит из введения, четырех разделов, заключения, библиографического списка (119 наименований). Работа содержит 34 рисунка, 24 таблицы.

Благодарности. Автор выражает глубокую признательность научному руководителю, д.г.-м.н., заведующему кафедрой динамической геологии и гидрогеологии ПГНИУ В.Н. Катаеву. Автор искренне благодарен заведующей Кунгурской лаборатории-стационара д.г.н. Кадебской О.И., к.г.-м.н. Дублянскому Ю.В. и отдельным сотрудникам Кунгурской лаборатории-стационара «ГИ УрО РАН» (Красикову А.В. и Богомазу М.В.) за помощь и поддержку в написании работы, сборе фактического материала.

ОБЩЕЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

1. Обобщение результатов изучения подземных вод с использованием изотопных данных

В данном разделе представлены ключевые исторические события, связанные с развитием и применением изотопных методов на мировом уровне отечественными и зарубежными специалистами в области гидрогеологии от начала открытия изотопов воды до современного этапа. Отдельно проведен обзор исследований, выполненных на территории средней части Предуралья, в частности, Пермском крае, поскольку изучение подземных вод на основе применения изотопных данных здесь только набирает обороты.

Исследования природных вод с применением изотопного анализа начались после открытия американскими учеными в начале 30-х г. XX в. изотопов кислорода и водорода. С созданием и усовершенствованием масс-спектрометрического (20-е-70-е гг.) оборудования определение изотопного состава, в том числе подземных вод, стало достаточно точным и быстрым. Изотопные данные для решения научных и прикладных задач в области гидрогеологии используются с конца 30-х начала 40-х гг. Значительный вклад за первое десятилетие в изучении природных вод внесли исследования, выполнявшиеся У. Бликни, А. Гулдом, У. Смайт, В. Маниани, Г. Юри, А.И. Бродским, В.И. Вернадским, А.П. Виноградовым, Р.В. Тейсом, К.П. Флоренским.

На территории средней части Предуралья до XXI в. подобные исследования не проводились. В начале XXI в. изучением подземных вод с использованием стабильных изотопов водорода и кислорода занимались пермские ученые, которые впервые получили данные распределения изотопов ($\delta^2\text{H}$ и $\delta^{18}\text{O}$) в снежном покрове, поверхностных и подземных водах, но исследования носили нерегулярный характер. Опыт российских и зарубежных коллег, а также приборная оснащенность позволяет проводить исследования водных ресурсов для решения гидрогеологических задач на территории средней части Предуралья изотопными методами на постоянной основе.

2. Методы исследования

В данном разделе описаны основные методы исследований, в соответствии с которыми выполнялась диссертационная работа. На первом этапе осуществлялся отбор проб воды из поверхностных вод, родников, подземных озер и анализ архивной информации и баз данных. Для решения поставленных задач использовались химический и изотопный методы анализа вод, которые проводились на втором этапе исследований.

Химическое исследование воды направлено на выявление органических и неорганических составляющих, определение степени жесткости, кислотности и других показателей пригодности и качества. Формирование химического состава вод обусловлено характером гидродинамических и гидрогеохимических процессов. Применение изотопного метода обусловлено тем, что стабильные изотопы воды, а именно изотопы водорода ($\delta^2\text{H}$) и кислорода ($\delta^{18}\text{O}$), сохраняют свою концентрацию и являются индикаторами геохимических условий, которые

обусловили их накопление. При движении подземных вод происходит перераспределение этих изотопов вследствие смешения вод различных типов, изотопно-обменных процессов, испарения и конденсации. Измеряя их концентрации, можно получить информацию о генезисе воды и установить связь между поверхностными и подземными водами.

На основе изотопных данных для каждого района исследований определялась локальная линия метеорных вод, которая является основой для понимания процессов формирования состава как подземных, так и поверхностных вод. Сравнение данных (сезонных, месячных) по распределению изотопов в осадках, подземных и поверхностных водах позволило определить основные закономерности формирования изотопного состава этих вод в карстовых районах средней части Предуралья.

3. Характеристика районов исследований

В данном разделе приведена краткая характеристика физико-географических, геологических и гидрогеологических условий исследованных районов, приуроченных к пяти карстовым районам средней части Предуралья (Ксенофонтовский, Соликамский, Нижнесылвинский, Иренский и Кишертский; рис. 1), в пределах которых изучены особенности формирования изотопного и химического состава подземных вод в нижнепермских отложениях. Здесь известны многочисленные выходы на поверхность подземных вод различного состава пригодные и малопригодные для хозяйственно-бытового и питьевого водоснабжения, а также для бальнеологии.

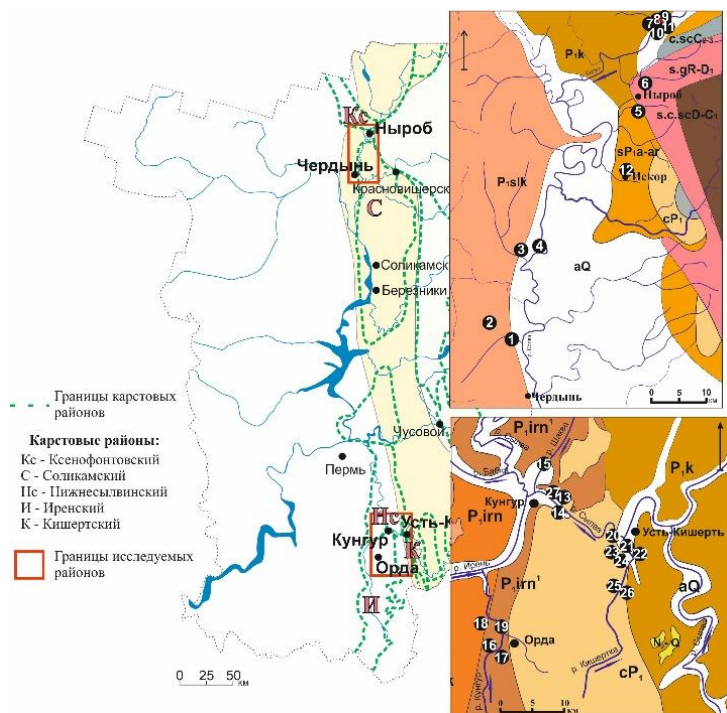


Рис. 1. Приуроченность районов исследований к карстовым районам

Районы исследования характеризуются наличием дизъюнктивных нарушений различного порядка, водообильными трещинными зонами. В

пределах изученных районов активно проявляются процессы гидродинамического и гидрохимического взаимодействия различных по составу вод четвертичных аллювиальных, нижнепермских, девонско-нижнекаменноугольных, рифейско-нижнедевонских карбонатно-сульфатных, терригенно-карбонатных и терригенных отложений. Приведена краткая характеристика основных гидрогеологических подразделений.

4. Особенности формирования состава природных вод исследуемых районов на основе изотопно-гидрохимических данных

В разделе приведены основные результаты комплексного изотопно-гидрохимического изучения атмосферных осадков, речных вод и вод источников, проведенных в период 2016-2018 гг. на участках исследований в пределах Нижнесысвинского, Иренского, Кишертского, Ксенофонтовского и Соликамского карстовых районах, раскрывающие суть трех защищаемых положений [1-19].

4.1. Роль атмосферных осадков в формировании состава подземных вод.

Определенная роль в формировании состава подземных и поверхностных, в частности речных вод, принадлежит атмосферным осадкам, поэтому интерпретация данных химического и изотопного состава атмосферных осадков (сезонные, годовые, многолетние изменения) является основой для понимания процессов формирования состава как подземных, так и поверхностных вод.

Так, данные изотопных составов атмосферных осадков *северного* и *южного* районов исследований впервые позволили получить средние значения дейтерия и кислорода-18 вод атмосферного происхождения (локальная линия метеорных вод, ЛЛМВ) и для Пермского края в целом, которые оказались близки к параметрам глобальной линии метеорных вод (ГЛМВ; $\delta^2\text{H}=8\cdot\delta^{18}\text{O}+10$; табл. 1). ЛЛМВ *северного* района имеет вид $\delta^2\text{H}=7,7\cdot\delta^{18}\text{O}+4,1$, *южного* – $\delta^2\text{H}=7,8\cdot\delta^{18}\text{O}+5,1$, в целом для Пермского края с учетом изотопных данных по станции Пермь за 1980-1990 гг. – $\delta^2\text{H}=7,9\cdot\delta^{18}\text{O}+8,4$.

Таблица 1

Уравнение ЛЛМВ и изотопно-гидрохимические параметры атмосферных осадков северного и южного районов исследований

Район исследований	Станция	Уравнение ЛЛМВ	Средневзвешенное значение изотопного состава, ‰	Минерализация, мг/дм ³	Среднегодовая температура, °С
Северный	Искор	$\delta^2\text{H}=7,7\cdot\delta^{18}\text{O}+4,1$	$\delta^{18}\text{O} = -14,7$ $\delta^2\text{H} = -108,4$	6,0-12	+1,5
	Пермь	$\delta^2\text{H}=7,9\cdot\delta^{18}\text{O}+8,4$	$\delta^{18}\text{O} = -12,9$ $\delta^2\text{H} = -93,9$		
Южный	Кунгур	$\delta^2\text{H}=7,8\cdot\delta^{18}\text{O}+5,1$	$\delta^{18}\text{O} = -12,2$ $\delta^2\text{H} = -90,8$	22,0-71,9	+4,0
Уравнение ГЛМВ $\delta^2\text{H}=8\cdot\delta^{18}\text{O}+10$					

Угол наклона ЛЛМВ (7,7; 7,8; 7,9 в уравнении) говорит о некотором влиянии на изотопный состав осадков испарительного фракционирования при движении осадков со стороны Атлантического океана. Изотопный состав осадков

напрямую зависит от климатических условий (температура воздуха) и изменяется в соответствии с экваториально-полярным эффектом. Полученные средневзвешенные годовые значения изотопного и химического состава осадков для станций Искор и Кунгур демонстрируют широтную зональность, снижаясь в направлении с юга на север, что соответствует изменению среднегодовой температуры воздуха в исследуемых районах и что с большой вероятностью отразится на изменении состава подземных вод и вод поверхностного руслового стока. Полученные данные по распределению стабильных изотопов в атмосферных осадках являются основой для интерпретации подземных и речных вод.

4.2. Влияние вод руслового стока на формирование состава подземных вод. Воды поверхностного руслового стока являются важным элементом в процессе водообмена. Одна из стадий процесса круговорота воды в природе характеризуется водообменом между поверхностной и подземной частями гидросферы. Характер взаимосвязи между речными и подземными водами различен. Изотопно-гидрохимический облик вод поверхностного руслового стока подчиняется и формируется в зависимости от распределения изотопного и химического состава атмосферных осадков и подземных вод. Качественная интерпретация изотопного и химического состава речных вод и установление взаимосвязи с подземными водами позволяют оценить вклад в формировании изотопно-гидрохимического облика и питания друг друга.

Для характеристики состава вод руслового стока в пределах *северного* и *южного* районов исследований было проведено опробование основных водных артерий, которые протекают на территории разных карстовых районов (Ксенофонтовский, Соликамский, Иренский, Нижнесыльвинский, Кишертский), и определены их основные гидрохимические и изотопные параметры. Исследуемые реки (Колва и Сылта) относятся к восточноевропейскому типу с четко выраженным весенним половодьем, летне-осенними дождевыми паводками и длительной устойчивой зимней меженью.

Изучение химического и изотопного состава речных вод *северного* и *южного* районов позволило установить, что речные воды характеризуются общими условиям питания и имеют несколько источников питания. Расход, минерализация, химический и изотопный составы речных вод изменяются сезонно (табл. 2). В зимний период в связи с отрицательными температурами воздуха, когда поверхностный сток почти отсутствует, доминирующая роль в питании рек принадлежит разгрузке подземных вод. В этот период минерализация речных вод достигает максимума (383 мг/дм³ (р. Колва) / 500-700 мг/дм³ (р. Сылта (по данным архива Кунгурской лаборатории-стационара)), при этом химический состав вод руслового стока *северного* района (р. Колва) наиболее сложный (HCO₃-Cl-SO₄-Ca-Na) по сравнению с *южным* (р. Сылта; HCO₃-SO₄-Ca).

Характер водного режима рек Колвы и Сылты, минимальные значения минерализации (103 мг/дм³ / 384 мг/дм³) и наиболее легкий изотопный состав речных вод ($\delta^{18}\text{O} = -16,1\text{‰}$, $\delta^2\text{H} = -118,3\text{‰}$ / $\delta^{18}\text{O} = -15,0\text{‰}$, $\delta^2\text{H} = -109,3\text{‰}$)

показывают, что весной основная доля в питании рек принадлежит талым водам, поскольку именно в зимний период атмосферные осадки обеднены стабильными изотопами ($\delta^{18}\text{O} = -22,7\text{‰}$, $\delta^2\text{H} = -168,8\text{‰}$ / $\delta^{18}\text{O} = -22,6\text{‰}$, $\delta^2\text{H} = -170,5\text{‰}$). В летний период речные воды имеют наиболее тяжелый изотопный состав ($\delta^{18}\text{O} = -13,8\text{‰}$, $\delta^2\text{H} = -100,9\text{‰}$ / $\delta^{18}\text{O} = -13,7\text{‰}$, $\delta^2\text{H} = -100,7\text{‰}$), что связано с увеличением доли относительно тяжелых атмосферных осадков ($\delta^{18}\text{O} = -9,7\text{‰}$, $\delta^2\text{H} = -68,4\text{‰}$ / $\delta^{18}\text{O} = -9,4\text{‰}$, $\delta^2\text{H} = -70,2\text{‰}$) теплого периода года. Стоит отметить, что речные воды *северного* района меняют свой состав в зависимости от сезона и преобладающей долей различных источников питания, воды *южного* района имеют постоянный состав. Так, сезонные изменения ведут к прогрессивному усложнению ионного состава вод р. Колвы от летнего ($\text{HCO}_3\text{-Ca-Na}$) к осеннему периоду ($\text{Ca-Na-HCO}_3\text{-Cl}$), состав вод южного района исследований (р. Сылта) не меняется, минерализация при этом у всех рек повышается ($228\text{-}285 \text{ мг/дм}^3$ / $470\text{-}547 \text{ мг/дм}^3$). Повышение минерализации речных вод исследованных районов в осенний период можно объяснить повышением роли поверхностного стока и разгрузкой вод из нижележащих горизонтов.

Таблица 2

Изотопно-гидрохимические параметры вод поверхностного руслового стока северного и южного районов исследований

Сезон	р. Колва (северный район)			р. Сылта (г. Кунгур, южный район)		
	Изотопный состав, ‰		Минерализация, мг/дм ³	Изотопный состав, ‰		Минерализация, мг/дм ³
	$\delta^{18}\text{O}$	$\delta^2\text{H}$		$\delta^{18}\text{O}$	$\delta^2\text{H}$	
Лето 2017	-13,8	-100,9	285,0	-13,7	-100,7	470,0-500,0*
Осень 2017	-14,2	-102,9	228,0	-14,3	-103,5	547,0
Зима 2017-2018	-15,1	-108,7	383,0	-14,7	-106,9	500,0-700,0*
Весна 2018	-16,1	-118,3	103,0	-15,0	-109,3	384,0
* - по данным архива Кунгурской лаборатории-стационара						

Годовой ход изотопного состава речных вод, в целом, подобен годовому ходу состава атмосферных осадков, отличаясь от последнего существенно меньшей амплитудой и некоторым сдвигом по времени. Оценена связь между изотопными составами речных вод и атмосферными осадками ($r_s = 0,50\text{-}0,58$ при $r_{s\ 0,05} = 0,58$), при которой выявлена задержка времени передачи изотопного сигнала от атмосферных осадков к речным водам в один месяц. Статистически это выразилось в усилении корреляционной взаимосвязи между изотопными составами атмосферных осадков и речных вод при сдвиге серии речных вод на один месяц вперёд относительно серии атмосферных осадков ($r_s = 0,91\text{-}0,94$ при $r_{s\ 0,05} = 0,60$). Запаздывание речных вод по отношению к осадкам объясняется существованием «времени передачи» изотопного сигнала от атмосферных осадков к речной воде, которое определяется иммобилизацией осадков в виде снега в зимние месяцы, а также временем «прохождения» осадков через стадию поверхностных и подповерхностных (почвенных) вод. Вместе с тем такая корреляционная связь между изотопными составами атмосферных осадков и

речных вод указывает на то, что питание речной воды смешанное и осуществляется не только атмосферными осадками, но и подземными водами.

Наряду с подземными водами речные используются в хозяйственно-бытовых и питьевых целях, поэтому важно было оценить уровень их загрязнения. Результаты микроэлементного анализа позволили нам установить еще один дополнительный источник питания вод поверхностного руслового стока. Содержания основных микроэлементов (Sr, Cu, Zn, Pb) в речных водах в течение года не превышают ПДК. Однако, концентрация железа в речных водах в разные сезоны года (*северный* район летне-осенний периоды, *южный* район – весенне-осенний периоды) в разы отличается от нормы ПДК. Это указывает на то, что речные воды подпитываются водами, поступающих с заболоченных участков, или происходит процесс заболачивания реки или активное поступление органических веществ из почвы. О поступлении вод богатых органикой указывает и повышенные значения перманганатной окисляемости.

4.3. Особенности формирования изотопно-гидрохимического состава подземных вод

Охарактеризованы подземные воды аллювиальных четвертичных отложений (aQ), соликамской терригенной карбонатной свиты (P₁slk), воды на контакте соликамской терригенно-карбонатной свиты с четвертичным аллювием (P₁slk//aQ), иренской карбонатно-сульфатной серии (P₁irn), кунгурской карбонатно-сульфатной серии (P₁k), ассельско-артинского терригенного комплекса (sP₁a-ar), нижнепермской карбонатной серии (сP₁) и рифейско-нижнедевонских терригенных и метаморфических кварцитовидных пород (s.gR-D₁), приуроченные к трем гидродинамическим зонам, выделенным Г.А. Максимовичем: зоне вертикальной нисходящей циркуляции, зоне горизонтальной циркуляции и зоне сифонной циркуляции напорных вод.

На график распределения изотопного состава разных типов вод, который был обобщен автором по материалам отечественных и зарубежных ученых, нанесены данные изотопного состава подземных вод в нижнепермских отложениях, полученные в период исследований (рис. 2).

По изотопным данным следует, что подземные воды в нижнепермских отложениях карстовых районов средней части Предуралья пресные или слабоминерализованные инфильтрационного генезиса. Данные комплексного изотопного и химического анализов показывают, что питание подземных вод смешанное, которое происходит за счет атмосферных осадков в основном зимнего и весеннего периодов, напорной разгрузки вод и внедрения вод поверхностного руслового стока.

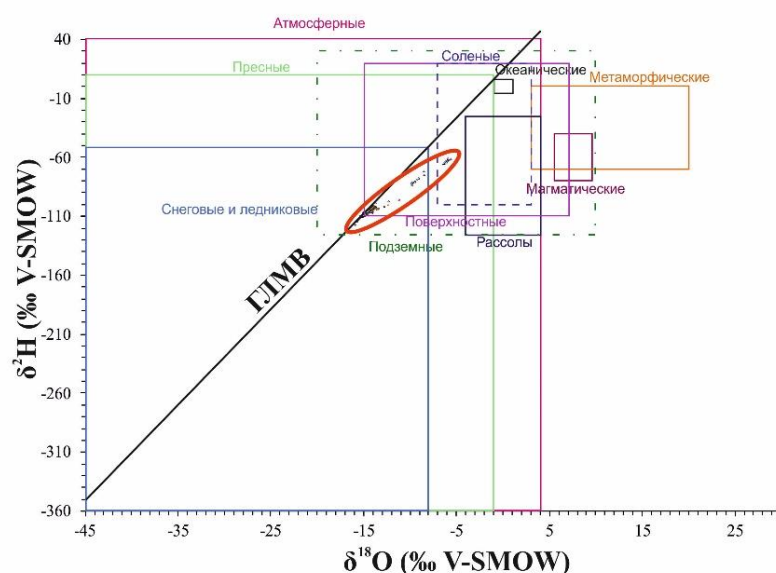


Рис. 2. Распределение типов воды по изотопному составу. Красным выделены вариации изотопного состава исследованных вод в нижнепермских отложениях

Сезонные изменения изотопного и химического состава, соотношение со средневзвешенным составом атмосферных осадков позволяют установить источники питания подземных вод по сезонам года. Подземные воды приурочены к водоносной соликамской терригенно-карбонатной свите (P_{1slk}), водоносной кунгурской карбонатно-сульфатной серии (P_{1k}), водоносному ассельско-артинскому терригенному комплексу (sP_{1a-ar}), локально-слабоводоносной нижнепермской карбонатной серии (cP_1) и разгружаются на контакте соликамской терригенно-карбонатной свиты и четвертичного аллювиального горизонта (P_{1slk}/aQ). Для них установлено, что основная роль в питании принадлежит атмосферным осадкам и напорной разгрузке. Первое подтверждается обычным распределением содержаний стабильных изотопов водорода и кислорода в подземных водах: питание талыми водами в весеннее время приводит к облегчению состава вод, а питание дождями в летний период – к утяжелению состава летом и осенью. Соотношение изотопного состава источников со средневзвешенным составом атмосферных осадков, также подтверждает то, что основная доля в питании источников принадлежит относительно легким атмосферным осадкам зимне-весеннего периода. Значения $\delta^{18}O$ и δ^2H источников в течение года легче средневзвешенных значений атмосферных осадков (рис. 3), а поскольку легкий состав свойственен осадкам зимнего и весеннего периодов, сделан вывод о питании подземных вод атмосферными осадками преимущественно этого времени.

Подземные воды разных гидрогеологических подразделений оказались разными по режиму питания, что обусловлено разным литологическим строением районов исследований, климатическими факторами, геоморфологией и др. Это отразилось на динамике изменения минерализации в течение года (рис. 4.).

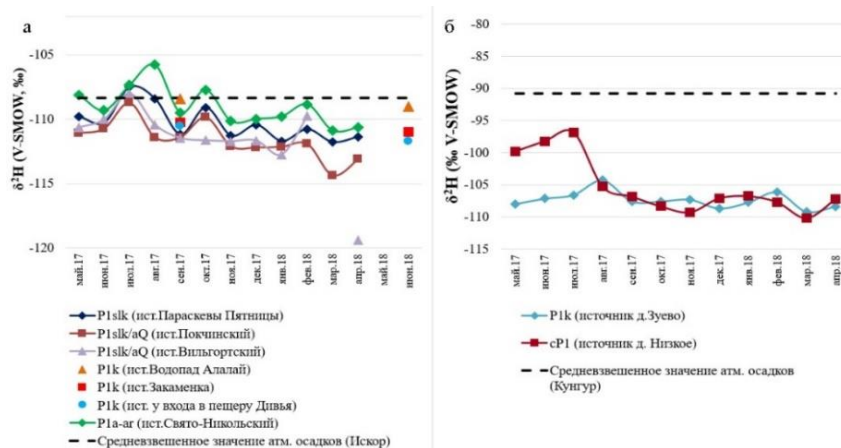


Рис. 3. Сезонное изменение изотопного состава источников северного и южного районов исследования

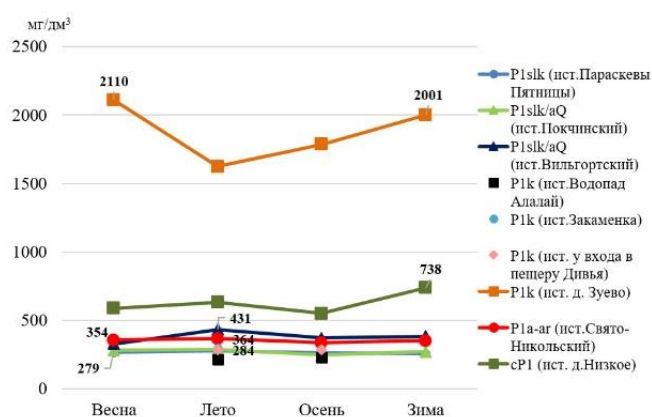


Рис. 4. Сезонное изменение минерализации источников северного и южного районов исследования

Повышенные значения минерализации в весенний и летний периоды свидетельствуют об отсутствии связи с поверхностным стоком и о наличии напорной разгрузки, которая осуществляется в подземные воды соликамской терригенно-карбонатной свиты (P_{1slk}), ассельско-артинского терригенного комплекса (sP_{1a-ar}) и на контакте соликамской терригенно-карбонатной свиты с четвертичным аллювиальным горизонтом (P_{1slk}/aQ).

Стоит отметить, что повышенная минерализация в водах вышеуказанных гидрогеологических подразделений в летний период сопровождается повышением сульфат-, хлорид- и гидрокарбонат-ионов. Это можно объяснить геологическим и гидрогеологическим строением территории исследования. Источники соликамской терригенно-карбонатной свиты (P_{1slk}), ассельско-артинского терригенного комплекса (sP_{1a-ar}) и на контакте соликамской терригенно-карбонатной свиты с четвертичным аллювиальным горизонтом (P_{1slk}/aQ) тяготеют к трещиноватым зонам и тектоническим нарушениям. Водоупоры часто невыдержанны и разделяют горизонт на отдельные водоносные слои, и в ряде случаев обуславливают появление напорных вод.

Для вод на контакте соликамской терригенно-карбонатной свиты с четвертичным аллювиальным горизонтом (P_{1slk}/aQ) и нижнепермской карбонатной серии (cP_1), расположенных в зоне интенсивной трещиноватости напорная разгрузка выявлена и в зимний период, поскольку минерализация в это

время повышена. Для подземных вод кунгурской карбонатно-сульфатной серии (P_{1k}) напорная разгрузка установлена весной и зимой, когда зафиксированы высокие значения минерализации, но легкий изотопный состав. Для вод ассельско-артинского терригенного комплекса (sP_{1a-ar}) установлено, что атмосферные осадки питают их еще и в зимний период, поскольку химический состав осадков источника соответствует составу атмосферных осадков не только осеннего, но и зимнего периода.

Таким образом, на основе только изотопно-гидрохимических параметров подземных вод установлено, что в весенний, летний и зимний периоды питание вод происходит за счет атмосферных осадков и напорной разгрузки из нижележащих отложений, в осенний период – только за счет атмосферных осадков.

Для оценки влияния атмосферных осадков и речных вод на формирование изотопного состава подземных вод нами был использован корреляционный и графический анализы. Взаимосвязь изотопных составов оценивалась путем расчёта коэффициента ранговой корреляции Спирмена r_s и построения графиков сезонных вариаций изотопных соотношений водорода и кислорода.

На основе соотношения сезонных изменений изотопных данных подземных вод разных гидродинамических зон и атмосферных осадков установлено время инфильтрации и фильтрации вод до уровня водоносного горизонта. Изучены временные параметры перемещения вод от источника питания к зоне разгрузки и формирования состава вод.

Данные корреляционного анализа подтверждают, что питание *источников* смешанное. Формирование и питание подземных вод, сосредоточенных в нижнепермских отложениях, происходит за счет атмосферных осадков периода снеготаяния и обильных дождей и напорной разгрузки сульфатных и карбонатных вод нижележащих горизонтов. Для исследованных источников разных гидрогеологических подразделений подток осуществляется в зимний, весенний и летний периоды.

Время фильтрации вод зависит от удаленности источника питания и мощности слагающих пород. Для трех источников на контакте соликамской терригенно-карбонатной свиты и четвертичного аллювиального горизонта (P_{1slk}/aQ), соликамской терригенно-карбонатной свиты (P_{1slk}) и кунгурской карбонатно-сульфатной серии (P_{1k} ; Вильгортский, Параскевы Пятницы и в д. Зуево) взаимосвязи между изотопными составами с атмосферными осадками не установлено ($r_s = 0,35-0,52$ при $r_{s\ 0,05} = 0,58$). Это и указывает на то, что атмосферные осадки не единственный источник питания. Для источников на контакте соликамской терригенно-карбонатной свиты и четвертичного аллювиального горизонта (P_{1slk}/aQ), ассельско-артинского терригенного комплекса (sP_{1a-ar}) и нижнепермской карбонатной серии (cP_1 ; Покчинский, Свято-Никольский и в д. Низкое) взаимосвязь между изотопными составами с атмосферными осадками подтверждается статистически ($r_s = 0,59-0,75$ при $r_{s\ 0,05} = 0,58$).

По графическим данным и по результатам статистического анализа для большинства источников отмечено некоторое расхождение экстремальных значений $\delta^2\text{H}$ и $\delta^{18}\text{O}$ атмосферных осадков и подземных вод во времени (один-три месяца) в разные периоды года, связанное с изменением фазового состава вод и их фильтрацией через массив пород (рис. 5).

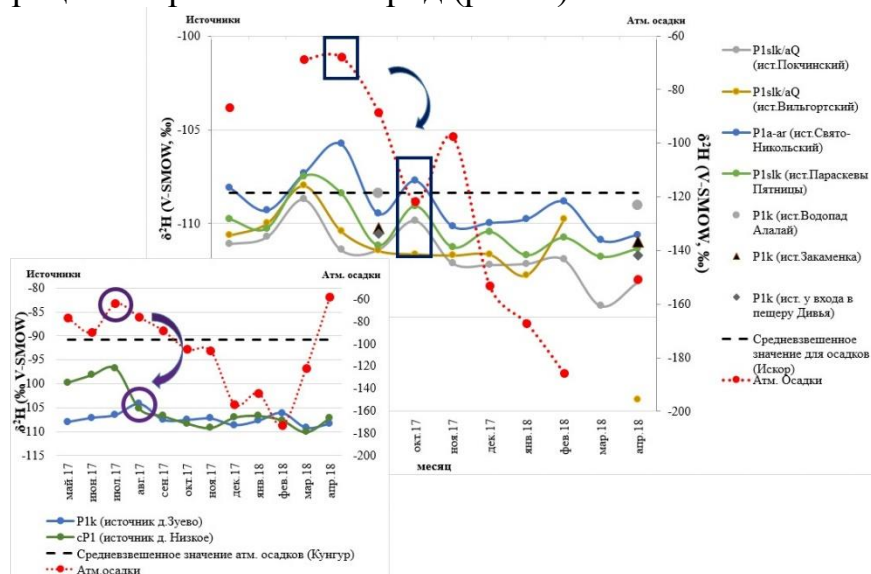


Рис. 5. Годовое изменение изотопного состава источников северного и южного районов исследования

Хотелось бы подчеркнуть, атмосферные осадки попадают в водоносный горизонт ассельско-артинского терригенного комплекса, кунгурской карбонатно-сульфатной серии и на контакте соликамской терригенно-карбонатной свиты и четвертичного аллювиального горизонта через один месяц после выпадения, что отражается в увеличении корреляционной взаимосвязи между изотопными составами атмосферных осадков и источников при сдвиге ряда данных источников на один месяц относительно осадков ($r_s = 0,65-0,70$ при $r_{s, 0,05} = 0,60$). Для остальных подразделений графически установлено, что изменения изотопных составов источников в летний период происходит через месяц после выпадения атмосферных осадков, осенью – через два месяца, зимой – через один-три месяца. То есть для «прохождения» атмосферных осадков в водоносный горизонт требуется некоторое время.

Воды кунгурской карбонатно-сульфатной серии (P_{1k}), и нижнепермской карбонатной серии (cP_1) расположены гипсометрически выше уреза воды и поэтому они подпитывают речную сеть (р. Сылва), а речные воды никак не влияют на химический и изотопный состав источников, что также подтверждается статистическими методами ($r_s = 0,69-0,79$ при $r_{s, 0,05} = 0,58$).

Данные комплексного изотопного и химического анализов позволили выявить некоторые особенности формирования состава вод подземных озер и определить основные пути движения подземных вод в карстовых массивах Кунгурской Ледяной пещеры. Неравномерное распределение изотопных параметров в течение года в подземных озерах пещер связано с несколькими факторами: режимом подъема уровня воды основных водотоков исследуемых

районов, инфильтрационной разгрузкой, подпиткой вод нижележащих горизонтов и временем транзита вод внутри карстового массива. Так, для вод подземных озер Кунгурской Ледяной пещеры по сезонному изменению изотопного и химического составов установлено, что весной большую роль в питании и формировании состава играют воды филипповского горизонта, речные воды и атмосферные осадки зимнего и весеннего периодов. В то время как ранее исследователи связывали изменение минерализации воды в озерах Кунгурской Ледяной пещеры с поступлением речных вод во время весеннего половодья и считали, что именно они играют основную роль в этот период. Обычно весной в период снеготаяния слабоминерализованные речные воды поступают в подземное пространство, после чего фиксируется уменьшение минерализации воды в озерах, что характерно, например, для весны 2016 г. В 2017 г. весной (2157-2260 мг/дм³) нами зафиксирована повышенная минерализация вод по сравнению с осенним периодом (1846-2241 мг/дм³). Высокая минерализация вод озер обусловлена участием в их питании вод нижележащей нижнепермской карбонатной серии (филипповский горизонт).

По архивным данным Кунгурской лаборатории-стационара был определен химический состав вод филипповского горизонта и оказалось, что воды слабоминерализованы (400-600 мг/дм³), но на контакте с иренскими гипсами минерализация вод повышается до 1500-3600 мг/дм³. Еще одним доказательством подпитки вод из филипповского горизонта является изменение уровня воды в реке и в пещерных озерах. Так, например, в 2020 г. незначительный подъем (3,5 м) на р. Сылве (абс. отметка 116,8 м) привели к высокому уровню воды в пещере, где произошло подтопление некоторых гротов (Хлебникова, Романтиков, Длинный). В то время как в 2017 г. при этой же абсолютной отметке речной воды и общем подъеме на 4,1 м уровень воды в пещере был на 0,8-1,1 м ниже уровня 2020 г. Но это не указывает на то, что речные воды не участвуют в питании вод пещеры, они лишь подпирают воды филипповского горизонта, который в свою очередь разгружаются в озера пещеры.

Применение статистических и графических методов также позволили нам выделить в Кунгурской Ледяной пещере две группы озер по их связи с водами поверхностного руслового стока. Первая группа (грот Вышка, Бирюзовое озеро) связана с водами р. Сылва ($r_s = 0,50-0,68$, $r_{s\ 0,05} = 0,58$, $n = 12$) и ход изменения изотопного состава озер повторяет ход речных вод. При этом между изотопными составами речных вод статистически значимая корреляция установлена только для вод грота Бирюзовое озеро ($r_s = 0,68$, $r_{s\ 0,05} = 0,58$, $n = 12$). Речные воды поступают в карстовый массив только примерно через один месяц, о чем говорит повышение корреляционной зависимости между изотопными составами озер и речных вод при сдвиге ряда данных озер на один месяц относительно изотопного состава вод р. Сылва ($r_s = 0,85$, $r_{s\ 0,05} = 0,60$, $n = 11$). Вторая группа озер (гроты Длинный, Дружба Народов и Близнецы) не связана с речными водами ($r_s = -0,69$ - $-0,05$, $r_{s\ 0,05} = 0,58$, $n = 12$). Поступление вод поверхностного руслового стока происходит, но за время транзита речной воды озера настолько меняют свой состав, что статистически связь с речными водами не устанавливается.

Время транзита речной воды в гроты в разное время года различно: весной изменение изотопного состава вод в этих озерах происходит через месяц после поступления речных вод, летом интервал увеличивается до двух месяцев, а осенью – до трех месяцев. Учитывая, что в гроте Вышка наиболее легкий состав вод характерен для зимнего периода, то время транзита увеличивается до шести месяцев. Для грота Дружбы Народов наиболее легкий состав отмечен осенью 2017 г., наиболее тяжелый – весной 2018 г. Таким образом, время прохождения речных вод до озера грота Дружбы Народов при движении потока со стороны грота Вышка, составляет примерно девять месяцев. То есть для второй группы озер время поступления речных вод составляет один-девять месяцев. Отсутствие статистически значимой корреляции между изотопными составами подземных и речных вод также связано с напорной разгрузкой вод филипповского горизонта, что подтверждается и химическим анализом (весной для вод озер Кунгурской Ледяной пещеры отмечена повышенная минерализация, нехарактерная для этого периода). Поскольку значения $\delta^2\text{H}$ и $\delta^{18}\text{O}$ легче средневзвешенного значения атмосферах осадков, основная доля в питании подземных озер принадлежит изотопно легким осадкам зимне-весеннего периодов.

Как известно, состав подземных вод отражает минералогические особенности той породы, через которые она фильтровалась, при этом химический состав вод формируется за счет процессов выщелачивания солей. Поэтому изменение изотопного состава вод, так же, как и изменение их химического состава зависит от состава вмещающих пород.

По химическому составу изученные подземные воды были разделены на типы (фаии). Было выделено четыре основных типа вод: гидрокарбонатно-кальциевые, гидрокарбонатно-сульфатно-кальциевые; сульфатно-гидрокарбонатно-кальциевые и сульфатно-кальциевые (табл. 3). Первые два типа вод ($\text{HCO}_3\text{-Ca}$ и $\text{HCO}_3\text{-SO}_4\text{-Ca}$) относятся к соликамской терригенно-карбонатной свите и ассельско-артинскому терригенному комплексу, где основные вмещающие породы этих подразделений являются мергели, известняки, песчаники, алевролит, то есть карбонатные и терригенные породы.

Таблица 3

Распределение средних гидрохимических показателей подземных вод по типу воды

Химический тип воды	Минерализация (мг/дм ³)	Изотопный состав (‰)	
		$\delta^{18}\text{O}$	$\delta^2\text{H}$
$\text{SO}_4\text{-Ca}$	2267,6	-14,5	-106,4
$\text{SO}_4\text{-HCO}_3\text{-Ca}$	1880,3	-14,7	-107,4
$\text{HCO}_3\text{-SO}_4\text{-Ca}$	400,2	-14,7	-107,6
$\text{HCO}_3\text{-Ca}$	296,4	-15,2	-110,6

Подземные воды $\text{SO}_4\text{-HCO}_3\text{-Ca}$ и $\text{SO}_4\text{-Ca}$ составов относятся к водоносной иренской карбонатно-сульфатной серии, частично кунгурской карбонатно-сульфатной серии и нижнепермской карбонатной серии. Основными водоносными породами этой серии являются гипсы, ангидриты, доломиты, мергели, известняки, песчаники, то есть карбонатные, сульфатные и

терригенные породы. Воды сульфатно-кальциевого состава распространены только в *южном* районе исследований.

По изотопным и химическим данным были обобщены изотопно-гидрохимические характеристики вод, залегающих в нижнепермских отложениях, и представлены в виде диапазонов изменения минерализации и изотопного состава. Из расчетов исключили данные изотопного состава карстовых озер Молебное и Провальное *южного* района исследований, поскольку большую роль в формировании их состава играет испарение с поверхности. Поэтому их первоначальный изотопный состав значительно тяжелее относительно исследуемых.

Установлено, что при смене гидрохимической формации с гидрокарбонатной на сульфатную происходит увеличение минерализации и обогащение вод тяжелыми изотопами. Легкий изотопный состав и низкую минерализацию имеют подземные воды соликамской терригенно-карбонатной свиты и ассельско-артинского терригенного комплекса, повышенной минерализацией и наиболее тяжелым изотопным составом обладают воды водоносной иренской карбонатно-сульфатной серии, частично кунгурской карбонатно-сульфатной серии и нижнепермской карбонатной серии.

Относительно литологического состава вмещающих пород низкую минерализацию и относительно легкий изотопный состав имеют подземные воды в карбонатно-терригенных отложениях, а воды в карбонатно-сульфатно-терригенных отложениях характеризуются повышенной минерализацией и тяжелым изотопным составом. Появление сульфатов привело к изменению изотопного состава вод. Полученные сравнительные результаты позволили сделать предварительный вывод о том, что изотопный состав подземных вод зависит от состава вмещающих пород, но практически не зависит от возраста гидрогеологического подразделения, в которых сосредоточены подземные воды.

В растворимых горных породах активно протекают карстовые процессы с образованием различных специфических форм рельефа. Карстовые озера – одна из характерных форм проявления карста. На примере поверхностных карстовых озер отчетливо прослеживается зависимость изменения изотопного состава вследствие испарения воды. Формирование изотопного состава озер отличается от закономерностей, выявленных для подземных вод.

Изотопный состав озер значительно подвержен испарительному фракционированию, то есть большое влияние на изотопный состав оказывают процессы испарения, происходящие на поверхности озер, поэтому их изотопный состав изначально тяжелее состава ($\delta^{18}\text{O} = -5,0\text{‰} \div -9,6\text{‰}$ и $\delta^2\text{H} = -60,0\text{‰} \div -84,1\text{‰}$) местных атмосферных осадков.

По данным химического анализа было установлено, что одно озеро характеризуется низкой минерализацией (Молебное – 144-236 мг/дм³), а другое повышенной (Провальное – 340-535 мг/дм³). Эти данные с учетом вертикальной зональности изменения минерализации позволили сделать вывод о том, что в озерных котловинах происходит разгрузка подземных вод из различных по составу пород: для озера Молебное – из карбонатных отложений (мергель), а для озера Провальное – из сульфатных отложений (гипс, ангидрит). Стоит отметить,

что атмосферные осадки после выпадения попадают в озеро Провальное через один месяц (статистически это выражено в усилении корреляции). Для озера Молебное связи с атмосферными осадками не выявлено. Изотопное распределение показало, что при разгрузке вод из сульфатных отложений состав вод наиболее легкий, по сравнению с водами, где разгрузка осуществляется из карбонатных пород. Предполагается, что такое распределение вызвано активными процессами при взаимодействии вода-порода, то есть связано с процессами выщелачивания сульфатно-карбонатных пород, при котором происходит изотопный обмен.

По данным, полученным в результате исследований, мы оценили влияние релеевской дистилляции на фракционирование изотопов между жидкостью и паром и определили, в каких условиях оно происходило: равновесных или неравновесных. В задачи исследований не входило определять изотопный состав паровозной фазы, поэтому судить о влиянии релеевского испарения на формирования изотопного состава вод возможно из расчетов тангенса угла наклона прямой для подземных вод Среднего Предуралья по изотопным данным.

Расчёты показали, что тангенс угла наклона прямой для подземных вод равен 4,9, при этом при релеевском испарении он равен ~ 8 . То есть, накопление изотопов водорода и кислорода в подземных водах не подчиняется уравнению Рэлея, испарение происходит в неравновесных условиях, при котором вступает в действие кинетический фактор, а также происходит изотопный обмен между жидкостью и паром. То есть, помимо температуры на разделение изотопов в неравновесных условиях влияют другие факторы.

Для уточнения процессов фракционирования в системе гипс-вода и карбонат-вода, мы рассчитали коэффициенты фракционирования для каждого источника, определили индекс насыщения (И.н.) и коэффициент растворимости (К.р.). Данные по кислороду-18 для карбонатов и сульфатов заимствованы из ранее выполненных работ Кадебской О.И. и Дублянского Ю.В. Оказалось, что при взаимодействии гипс-вода коэффициент фракционирования меньше нормы, при котором происходит изотопный обмен ($\alpha = 0,332-0,938$, при $\alpha = 1,004$), а в системе карбонат-вода, наоборот, α в основном больше 1,031 ($\alpha = 1,504-1,631$), что указывает на обменные процессы в этой системе. Полученные данные индекса насыщения и коэффициента растворимости показали, что подземные воды в районах исследований в основном перенасыщены карбонатом кальция (И.н. > 0 , К.р. ≥ 1) и недосыщены (И.н. < 0 , К.р. < 1) или находятся в равновесии (И.н. $= 0$, К.р. $= 1$) с сульфатом кальция.

Поэтому можно сделать вывод, что изменение минерализации, а также изотопного состава вод, сосредоточенных в разных вмещающих породах Среднего Предуралья, главным образом определяется взаимодействием «вода-порода» и в меньшей мере – релеевской дистилляцией.

Поскольку атмосферные осадки являются одним из основных источников питания подземных вод зоны активного водообмена, поэтому их состав напрямую влияет на состав подземных вод. Изотопный состав осадков напрямую

зависит от климатических условий (температура воздуха) и изменяется в соответствии с экваториально-полярным эффектом. Соответственно изотопный и химический состав подземных вод также должен изменяться соответственно широтной зональности.

Как было установлено ранее, изотопный состав атмосферных осадков изменяется в широтном направлении утяжеляясь с севера на юг. Большой объем данных по изотопному и химическому составу водопроявлений позволил определить средние показатели химического и изотопного состава подземных вод, сосредоточенных в нижнепермских отложениях. Анализ изотопно-химического состава подземных вод позволил впервые установить широтную зональность изменения состава подземных вод с севера на юг. Средние изотопного состава рассчитаны без учета состава вод карстовых озер Кишертского карстового района, поскольку они имеют особые условия формирования изотопного состава, связанные с испарением. Для *северного* района средние значения минерализации составляют $302,7 \pm 8,9$ мг/дм³, изотопного состава – $\delta^{18}\text{O} = -15,2 \pm 0,05\text{‰}$ и $\delta^2\text{H} = -110,5 \pm 0,27\text{‰}$ (1 σ), для *южного* – $2091,0 \pm 73,6$ мг/дм³, $\delta^{18}\text{O} = -14,5 \pm 0,06\text{‰}$ и $\delta^2\text{H} = -106,4 \pm 0,29\text{‰}$ (1 σ). Распределение гидрохимических характеристик подземных вод демонстрирует широтную зональность: состав вод утяжеляется, минерализация увеличивается с севера на юг (рис. 6).

Такое распределение в основном связано с изменением климатических условий. Наряду с метеорологическими факторами, особую роль в формировании состава подземных вод, в основном химического, играет состав вмещающих пород.

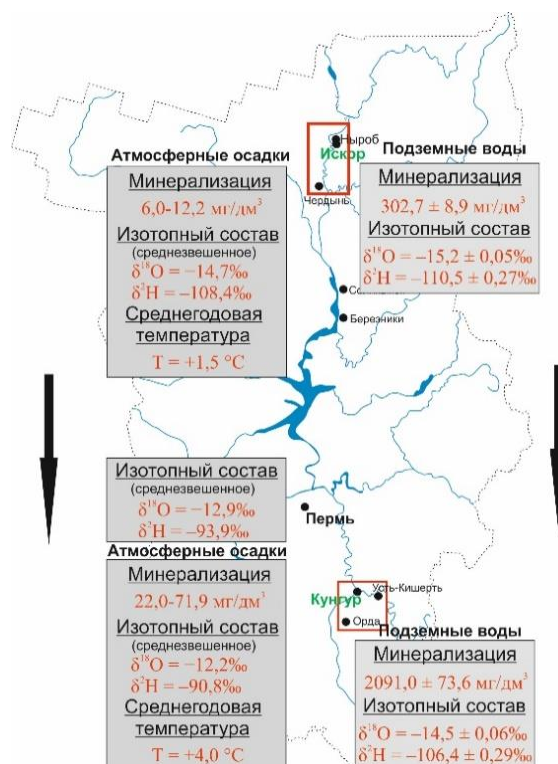


Рис. 6. Зональное изменение изотопного и химического состава атмосферных осадков и подземных вод

Заключение

На основании выполненных исследований можно сделать следующие выводы.

1. Изучение сезонных вариаций изотопов в природных водах позволило получить новую количественную информацию и понять механизмы формирования состава подземных вод в нижнепермских отложениях карстовых районов Среднего Предуралья, а также установить особенности питания водоносных горизонтов. Это позволяет использовать изотопный анализ в качестве дополнительного метода при гидрогеологических исследованиях.

2. Анализ результатов комплексных изотопно-гидрохимических исследований свидетельствует, что подземные воды в нижнепермских отложениях карстовых районов Среднего Предуралья с учетом сезонных изменений изотопно-гидрохимических параметров и влияния структурных, геологических, гидрологических, гидрогеологических и климатических факторов относятся к пресным или слабоминерализованным смешанного генезиса. Формирование состава подземных вод происходит за счет питания атмосферными осадками периода снеготаяния, а также за счет напорной разгрузки.

3. Выявлены временные периоды транзита поверхностных вод к водоносным горизонтам, которые варьируют от одного до девяти-двенадцати месяцев и зависят от удаленности источника питания и мощности слагающих пород. Эти данные рекомендуется использовать при проведении гидрогеохимического мониторинга для решения вопросов поступления загрязняющих веществ и уточнения процессов растворения сравнительно легкорастворимых горных пород. Подобные исследования осуществляются сотрудниками Кунгурской лаборатории-стационара в естественных условиях на базе Кунгурской Ледяной пещеры.

4. На основе обобщения и систематизации данных о составе подземных вод в нижнепермских отложениях карстовых районов Среднего Предуралья автором впервые выявлена широтная зональность распределения изотопов водорода и кислорода в подземных водах в данном регионе. Утяжеление изотопных параметров и увеличением минерализации вод с севера на юг, что определяется климатическими условиями региона. При широтном изменении минерализации также важную роль играет состав вмещающих пород.

5. Установлены основные закономерности влияния литологического состава вмещающих пород на изотопный и химический состав подземных вод. При смене гидрохимической формации с гидрокарбонатной на сульфатную при увеличении минерализации подземных вод происходит их обогащение тяжелыми изотопами, что определяется взаимодействием в системе «вода-порода» и в меньшей степени – релеевской дистилляцией. Формирование изотопного состава поверхностных карстовых озер отличается от подземных вод, что обусловлено проявлением испарительного фракционирования на поверхности озер и обменными процессами в системе «вода-порода», которое приводит к значительному обогащению вод тяжелыми изотопами.

6. Данные изотопных соотношений водорода и кислорода в подземных водах рекомендуется использовать в качестве природных фоновых значений для нормирования антропогенных воздействий на территории Среднего Предуралья.

7. В результате исследований создана база изотопов атмосферных осадков, поверхностных и подземных вод, данные которой внесены в международную базу данных GNIP (Global Network of Isotopes in Precipitation) и IAEA (International Atomic Energy Agency). Эти данные находятся в открытом доступе и могут быть использованы учеными в научных целях. В настоящее время полученные данные внедрены в мониторинговые исследования Кунгурской Ледяной пещеры.

Опубликованные работы по теме диссертации

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК России:

1. **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.

2. **Казанцева А. С.**, Кадебская О. И., Дублянский Ю. В., Катаев В. Н. Гидрогеохимическая характеристика подземных вод зоны сочленения Уфимского вала и Предуральского прогиба // Известия УГГУ. 2020. Вып. 2(58). – С. 83-96.

3. **Казанцева А. С.** Характеристика подземных вод в нижнепермских отложениях Соликамской впадины // Вестник геонаук. – Сыктывкар, 2020. – №8. – С. 18-27. DOI: 10.19110/geov.2020.8.3

Публикации в изданиях, входящих в системы цитирования

Web of Science и Scopus:

4. Красиков А. В., **Казанцева А. С.**, Богомаз М. В. Многопрофильный мониторинг в Кунгурской Ледяной пещере // Горный журнал. Москва, 2018. – № 6. – С. 60-64.

5. Kadebskaya O.I., Kataev V.N., Maksimovich N.G., **Kazantseva A.S.** Morphological indications of hypogene speleogenesis in caves of the Urals (Russia) // Environmental Earth Sciences, 2019. 78: 485. <https://doi.org/10.1007/s12665-019-8498-3>.

Публикации в иных изданиях:

6. **Казанцева А.С.** Анализ химического состава воды и уровня загрязнения в гротах КЛП за период 2006-2015 гг. // Стратегия и процессы освоения георесурсов: Матер.ежегодной науч. сессии / Горный ин-т УрО РАН. Пермь, 2016. – № 14. – С. 48-50.

7. **Казанцева А. С.** Гидрохимический мониторинг Кунгурской Ледяной пещеры (анализ десятилетних наблюдений) // Геология в развивающемся мире: сб. науч. тр. (по материалам X Междунар. науч.-практ. конф. студ., асп. и молодых ученых): в 2 т. / отв. ред. Р. Р. Гильмутдинов; Перм. гос. нац. исслед. ун-т. – Пермь, 2017. – Т. 2. – С. 205-207.

8. **Казанцева А. С.** Использование методов изотопного анализа в гидрогеологии // Стратегия и процессы освоения георесурсов: сб. науч. тр. Вып. 15 / ГИ УрО РАН. – Пермь, 2017. – С. 53-55.
9. **Казанцева А. С.** О формировании химического и изотопного состава подземных вод на границе Ксенофонтовского и Соликамского карстовых районов // Стратегия и процессы освоения георесурсов: сб. науч. тр. Вып. 16 / ГИ УрО РАН. – Пермь, 2018. – С. 37-40. <https://doi.org/10.7242/gdsp.2018.16.10>
10. **Казанцева А. С.** Особенности динамики изменения химического состава вод иренского водоносного горизонта (на примере Ординской пещеры) // Изучение и использование естественных и искусственных подземных пространств и закарстованных территорий. Материалы Всероссийской научно-практической конференции II Крымские карстологические чтения, Симферополь, 25-28 сентября 2018 г. – Симферополь, 2018. – С. 110-114.
11. **Казанцева А.С.** История изотопных исследований в гидрогеологии // Вектор ГеоНаук. 2018. Т.1. №3. С. 11-22.
12. **Казанцева А.С.** Изотопный состав природных вод Колвинской седловины // Проблемы геологии и освоения недр: труды XXIII Международного симпозиума имени академика М.А. Усова студентов и молодых ученых, посвященного 120-летию со дня рождения академика К.И. Сатпаева, 120-летию со дня рождения профессора К. В. Радугина. В 2-х томах. Том 1 / Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2019. – С. 421-423.
13. **Казанцева А. С.** Исследование изотопного состава атмосферных осадков в г. Кунгуре в 2016-2018 гг. // Горное эхо. – Пермь, 2019. – №1(74). – С. 7-10.
14. **Казанцева А. С.** Гидрохимия и изотопный состав реки Колвы // XXII симпозиум по геохимии изотопов имени академика А.П. Виноградова (29–31 октября 2019 г.) Расширенные тезисы докладов/ ГЕОХИ РАН – М: Акварель, 2019. – С. 205-210.
15. **Казанцева А. С.** Изотопный состав атмосферных осадков Северного Урала на территории Пермского края // Инициатива в образовании: проблема интерпретации знания в современной науке. Сборник научных трудов. – Казань, 2019. – С. 278-280.
16. **Казанцева А. С.** Гидрохимическая характеристика озер Молебное и Провальное с. Усть-Кишерть // Всероссийская молодежная геологическая конференция памяти В. А. Глебовицкого. Сборник тезисов докладов всероссийской молодежной геологической конференции памяти В. А. Глебовицкого. – СПб.: Изд-во ВВМ, 2020.48 – С. 254-257.
17. **Казанцева А. С.** Изотопная и геохимическая характеристика вод р. Сылва // Горное эхо. – Пермь, 2020. – №1(78). – С. 3-7.
18. **Казанцева А. С.** О возможности использования методов изотопного анализа в гидрогеологических исследованиях // Геология и полезные ископаемые Западного Урала. – Пермь, 2020. – Вып. 3(40). – С. 237-242.
19. **Казанцева А. С.** Применение методов изотопного анализа в гидрогеологических исследованиях на территории Пермского края // Подземная

гидросфера: Материалы XXIII Всероссийского совещания по подземным водам востока России с международным участием. – Иркутск: Институт земной коры СО РАН, 2021. – С 410-414.