

УДК 25.00.07

**ИСТОРИЯ ИЗОТОПНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ В ГИДРОГЕОЛОГИИ\***

Казанцева Алена Сергеевна – аспирант, инженер «ГИ УрО РАН» Кунгурская лаборатория-стационар, [kazanalena@bk.ru](mailto:kazanalena@bk.ru)

**Аннотация:** в данной статье представлены ключевые исторические события, связанные с развитием и применением изотопных методов в области гидрогеологии от начала открытия изотопов воды до современного этапа, на мировом уровне и в пределах Пермского края.

**Ключевые слова:** изотопные методы в гидрогеологии, история применения, гидрогеологические исследования, мировые исследования, изотопные исследования в Пермском крае.

**Н**а современном этапе развития невозможно без использования достижений научно-технического прогресса и широкого внедрения современных методов исследований более эффективных для решения гидрогеологических задач. Стабильные изотопы, присутствующие в подземных водах, несут в себе информацию об изменениях, вызванные рядом природных физико-химических процессов в течение времени. Использование стабильных изотопов водорода и кислорода завоевало широкую популярность при исследовании динамики природных вод, их генезиса и гидрогеохимических эффектов при взаимодействии воды и пород. В данной статье рассматривается применение методов анализа изотопного состава и основные достижения отечественных и зарубежных специалистов в области гидрогеологии. Отдельно выделены исследования на территории Пермского края, поскольку изучение изотопного состава подземных вод здесь только набирает обороты и непосредственно связаны с деятельностью автора.

**Мировые исследования по применению изотопных методов в гидрогеологии**

Изотопы кислорода ( $^{18}\text{O}$  и  $^{16}\text{O}$ ) открыты В. Джиоком и Х. Джонстоном в 1929 г., водорода (дейтерий, D) – в 1932 г. Г. Юри и его коллегами. Сразу же после открытия изотопов кислорода и водорода начались многочисленные исследования изотопного состава природных вод разных типов. Большинство этих работ в настоящее время имеют лишь историческую ценность, поскольку в 30-е годы измерения проводились по общей плотности, которая неоднозначно определяет вариации в изотопном составе кислорода и водорода. Кроме того,

часто исследования проводились на низком методическом уровне.

Новый этап в изучении природных вод связан с работами А.И. Бродского [2] и его коллег, которые в 1937 г. разработали методики раздельного определения изотопного состава кислорода и водорода. Для этой цели использовалось сочетание денсиметрического и интерферометрического методов. Это позволило осуществить систематическое изучение распространенности изотопов водорода и кислорода в образцах воды разного происхождения: снегах, льдах, фирнах, инее, дожде, озерах и морях. Преимущество раздельного способа анализа особенно хорошо показано на примере исследования концентрации изотопов водорода и кислорода в океанических и морских водах Арктического бассейна, где были обнаружены закономерности их распределения в водах и льдах в зависимости от географических признаков, тогда как суммарная плотность оказалась малохарактерной. Упомянутые методы анализа впоследствии применялись в ряде лабораторий мира для решения многих научных задач, а также для контроля обогащения вод тяжелыми изотопами. Однако широкая постановка исследований тормозилась трудоемкостью методик и относительно низкой точностью [3].

В том же десятилетии Г. Юри и его коллеги из Колумбийского университета проводили эксперименты по изотопному обмену, а А. Нир и его коллеги из университета Миннесоты проводили масс-спектрометрические измерения изменений в соотношениях стабильных изотопов.

В 1946 году Гарольд Юри отправился в несколько известных университетов Европы, чтобы выступить с лекцией, ежегодно

спонсируемой Королевским обществом Лондона [44].

Юри представил результаты полуэмпирических расчетов изотопного фракционирования стабильных изотопных отношений легких элементов среди идеальных газов и простых водных ионов, рассчитанными по спектроскопическим данным и методом статистической механики.

В то время уже было известно, что отношения стабильных изотопов кислорода ( $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ ) морских известняков были примерно на 3 % выше, чем у океана и, что океанская вода была изотопически тяжелее, чем пресная вода. Юри обратил внимание на температурный коэффициент разделения изотопов кислорода между карбонатом кальция и водой. Он пришел к выводу, что для изучения температуры древних океанов, изотопный анализ и температурный коэффициент играют огромную роль в палеоклиматологии. Но в 1940-х годах точность изотопных измерений, необходимых для получения температурных оценок не была достижимой. В то время точность масс-спектрометрических измерений коэффициентов  $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$  была примерно в 10 раз меньше, чем требуется для определения температур, и не было воспроизводимой техники и экспериментальных данных, касающихся разделения изотопов кислорода между карбонатом кальция и водой. Одним из выдающихся научных достижений XX века является создание и совершенствование шкалы палеотемпературы изотопов кислорода [39].

Впервые метод прецизионной масс-спектрометрии был предложен группой Г. Юри в 1951 г. для определения палеотемператур древних морей и явился следующим крупным вкладом в развитие геохимии изотопов легких элементов. Разработанные методы были применены С. Эпштейном, Т. Майедой, И. Фридманом и другими для изучения изотопного состава природных вод.

Масс-спектрометрия берет свое начало с работ А.Д. Демпстера, который в 1918 году установил вместо фотопластинки токоприемник. Точность его измерений составляла несколько процентов от изотопных отношений и оставалась непревзойденной вплоть до работы Г.А. Штрауса, который сконстру-

ировал в 1941 г. двойной коллектор ионов, позволяющий регистрировать отношения содержаний изотопов. В 1947 году А.О. Нир, Е.Р. Ней и М. Ингрэм существенно усовершенствовали метод Г.А. Штрауса, разработав компенсационную схему, применяющуюся до сего времени. Ч.Р. Мак-Кинни и др., создали систему двойного впуска и заменили визуальный отсчет записью на самопишущем потенциометре. Сущность этой методики заключается в сравнении изотопных отношений двух образцов, один из которых принимается за эталон. В. Дансгаард и другие исследователи использовали тот же принцип, но, применив абсолютную градуировочную характеристику масс-спектрометра, сумели перейти от относительных измерений к определению абсолютных содержаний изотопов [3].

Одновременно с проведением работ по анализу изотопов кислорода карбонатных оболочек, в Копенгагене провели исследования по вариациям изотопов кислорода в естественных водах [24].

Разработка радиоуглеродного ( $^{14}\text{C}$ ) метода датирования и его применение к подземным водам привела к количественному пониманию масштабов и времени изменения климата от полярных регионов. Впервые был применен Мюннихом в 1957 г. [46].

Становление и развитие изотопных методов в нашей стране связано с Всероссийским научно-исследовательским институтом гидрогеологии и инженерной геологии (ВСЕГИНГЕО), который был основан в 1939 г. Именно здесь 1 января 1959 г. директор Н.А. Маринов подписал приказ об организации в составе отдела специальных исследований изотопной лаборатории, в задачу которой входило использование открытых и закрытых источников радиоактивных излучений для решения различных научных и прикладных задач гидрогеологии и инженерной геологии. Заведующим лабораторией был назначен выпускник МИСИ, талантливый молодой ученый, кандидат технических наук В.И. Ферронский [12].

Существенную роль в формировании состава подземных вод играют атмосферные осадки, поэтому в 1960 году была запущена Глобальная сеть изотопов в осадках (GNIP) [50], совместно эксплуатируемая

Международным агентством по атомной энергии (МАГАТЭ) и Всемирной метеорологической организацией (ВМО). Основной целью было предоставление базовой информации об изотопном составе осадков в глобальном масштабе. МАГАТЭ оказывает поддержку использованию изотопной гидрологии с целью углубления знаний о водных ресурсах. На протяжении более чем четырех десятилетий образцы осадков измерялись с помощью различных исследовательских проектов и сетей мониторинга во временных масштабах, начиная от отдельных минут (доля отдельных событий дождя) до ежемесячных композитных образцов. Первый всеобъемлющий обзор изотопных данных, собранных сетью GNIP, проведенный Дансгаардом [23], привел к разработке ряда эмпирических взаимосвязей между наблюдаемым изотопным составом месячных осадков и параметрами окружающей среды, такими как температура приземного воздуха, количество осадков, широты, высоты или расстояния от побережья. Последующие обзоры базы данных GNIP [37, 47] в значительной степени подтвердили ранние результаты Дансгаарда. Стало очевидным, что эти эмпирические отношения, часто называемые «эффектами», можно рассматривать как меру средней степени выпадения влажных воздушных масс, переносимых из основных областей источника пара (главным образом, межтропического океана) в место осаждения [32].

Многочисленные исследования в 60-х гг. XX в. сотрудниками Международного агентства по атомной энергии в Эквадоре, Мексике, Южной Корее и Судане установили, что для вычисления доли речных вод в подпитке подземных вод наиболее эффективны данные о стабильных изотопах по сравнению с вычислением разности расходов на определенном участке русла реки. Каждый потенциальный источник подпитки характеризуется различным изотопным составом, поэтому можно легко определить вклад речной воды в грунтовые воды. Большая часть воды, текущей в крупных реках, будет приходить из более высоких мест, и поэтому будет содержать меньше тяжелых изотопов (дейтерия и кислорода-18), чем местные дожди [10].

Впервые корреляционная связь между D и  $^{18}\text{O}$  для атмосферных осадков была экспериментально установлена Г. Крейгом. Изменение изотопного состава метеорных вод разных широт происходит вдоль прямой линии, которая получила название линии Крейга («линия метеорных вод»). Ученый в 1961 г. первый определил абсолютные отношения изотопов водорода и кислорода в SMOW (Standard Mean Ocean Water). SMOW представляет собой среднюю пробу воды, отобранной из Атлантического, Тихого и Индийского океанов в интервале глубин от 500 до 2000 м, в районах, удаленных от континентального стока, и тщательно перемешанной.

Дальнейшее усовершенствование масс-спектрометрического метода изотопного анализа продолжили в 1965 году Х. Маккелаф и Г.Р. Краузе, которые предложили осуществлять отсчеты разницы в изотопных отношениях с помощью цифровых интегрирующих устройств.

В СССР существенный вклад в развитие масс-спектрометрического прецизионного анализа внесли М.С. Чупахин (1953), В.И. Устинов и В.А. Гриненко (1965), Э.М. Галимов (1963), А.В. Якубовский и др. (1973), А.Д. Есиков (1980).

Рядом исследователей были проведены полевые и лабораторные эксперименты по изучению изотопного состава вод в процессе инфильтрации. В частности, Г. Кнетш и др. в 1962 г. [29] изучали влияние на фракционирование изотопов кислорода продолжительности и дальности подземной миграции в пределах одного и того же водоносного горизонта (нубийская серия, Западная пустыня, Северная Африка). Они установили незначительное изменение отношения  $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$  (0,9 ‰) при движении воды по пласту в течение 20...30 тыс. лет и при переносе на расстояние более 1000 км с изменяющимся минералогическим составом. В.Н. Сойфер с соавторами в 1967 г. не нашли изменений в концентрации дейтерия при движении подземных вод на протяжении нескольких сотен метров в аргиллитах и песчаниках горячеключевской свиты, отобранных по падению пласта.

С середины 60-х гг. XX в. стабильные (D и  $^{18}\text{O}$ ) и радиоактивные (T,  $^{14}\text{C}$ ) изотопы привлекаются для решения задач водоснабжения. В этих исследованиях стабильные изотопы используются в качестве индикатора места поступления и разгрузки подземных вод, тогда как радиоактивные дают информацию о времени пребывания воды в данной системе. В частности, по данным распределения концентрации  $^{18}\text{O}$  и T в атмосферных осадках, поверхностных водах, подземных источниках и скважинах бассейна р. Эвьян Ж. Фонтом и др. в 1967 был изучен гидрогеологический режим бассейна. Установлены площадь водосбора, его высота над уровнем моря и время обновления подземных вод. Рассмотрены различные модели водного баланса и оценены его отдельные составляющие. Полученные выводы хорошо согласуются с данными гидрогеологических, геологических и гидрологических исследований и представляют практический интерес при выборе подходящих мест для глубинного бурения и при планировании работ по водоснабжению исследуемых районов.

Аналогичные исследования были выполнены Г.Х. Дэвисом и др. (Devis G.H. e. a., 1967 г.) по T,  $^{14}\text{C}$  и  $^{18}\text{O}$  на примере южной части Венского бассейна Австрии и П. Теодерссоном [43] по T и D для юго-западной части Исландии.

В середине 60-е гг. изучали фракционирование изотопов водорода и кислорода в результате фильтрации через водовмещающие породы. Э. Дегенс установил, что при фильтрации подземных вод на расстояние 1100 км по выдержанному погружающемуся горизонту песчаников Нубийской серии в Северной Африке изотопный состав кислорода практически не изменялся. Содержание дейтерия при движении вод в хорошо промытых структурах также не изменялось [20, 26], а в артезианских бассейнах с крайне замедленным водообменом содержание дейтерия, как правило, возрастало с глубиной. Это объяснялось различной долей участия древних морских вод, сингенетичных с осадочной толщей седиментационного бассейна, при смешении их с инфильтрационными водами метеорного происхождения.

Немецкие ученые в пределах калийных рудников Гарцесса (ГДР) (Harzer D., Pilot I., Rusier H. I., 1968 г.) для выяснения режима и источников водопритоков, взаимосвязи водоносных горизонтов, источников их питания и разгрузки, водообильности и т.д. также применяли изотопные методы. С помощью данных по распределению дейтерия и кислорода-18 в поверхностных и подземных водах специалисты Фрайбергской горной академии ГДР определили гидрогеологическую обстановку в пределах рудника, поскольку применение классических методов было нецелесообразно.

Широкое распространение гидрогеологических исследований с использованием изотопов кислорода и водорода началось лишь с начала 70-х гг. XX в. Хотя исследования, проведенные в 1960-х годах по осадкам Крейгом [21] и Дансгаардом, проложили почву для размышлений об изотопах в водном цикле. Особое внимание уделялось изучению трития ( $^3\text{H}$ , T), в связи с проведением термоядерных испытаний в период 1963-1965 гг., и изучению изотопного состава атмосферных осадков [22].

Развитие в СССР исследований в области изотопии вод глубоких подземных горизонтов стимулировалось, с одной стороны, интенсификацией работ по глубинному поисково-разведочному бурению на нефть и газ и возможностью отбора представительных образцов подземных флюидов из различных этажей гидрогеологического разреза, с другой – развитием аппаратных и методических разработок, осуществленных в 1966 г. в ИФХ АН УССР и ВСЕГИНГЕО, а несколько позднее (1974) и во Всесоюзном научно-исследовательском институте ядерной геофизики и геохимии (ВНИИЯГГ). Изучение изотопного состава водорода и кислорода проведено советскими учеными В.Е. Ветштейном, В.Г. Артемчуком, П.Г. Альтшулером и др. [4] в подземных водах по разрезу и по площади ряда артезианских нефтегазоносных бассейнов (НГБ) СССР: Припятского, Днепроовско-Донецкого, Каракумского, Волго-Уральского, Терско-Каспийского, Западно-Туркменского, Западно-Сибирского и Ангаро-Ленского. В результате чего был сделан вывод, что каждый бассейн отличается свойственной только

ему индивидуальностью изотопных показателей (концентрацией и интервалом распределения изотопов водорода и кислорода в водах, соотношением изотопов). Вместе с тем в пределах отдельных бассейнов и водоносных комплексов отмечаются близкие характеристики изотопных и гидрогеохимических показателей, свидетельствующие о сходных условиях их формирования. Ведущим процессом формирования глубоких подземных вод является смешение океанических (морских) вод с метеорными. Изотопный состав подземных вод осадочных бассейнов в основном сохраняет следы процессов, обусловивших сдвиги в их изотопном содержании, а наблюдаемые направленность и сдвиг определяются разделяющей способностью ведущих факторов. Отношение  $D/H$  как бы более надежно сохраняет информацию об исходной природе воды и условиях ее формирования. При постоянном и длительном контакте с вмещающими породами молекулы воды обогащаются тяжелыми изотопами, а вмещающие породы и растворенные вещества обедняются.

В течение 1969...1971 гг. организациями Гидрометеорологической службы СССР в пределах восьми административных областей Украинской и Молдавской ССР, а также Камчатской и Иркутской областей, Приморского края и Узбекской ССР, отбирались образцы атмосферных осадков для изучения распределения дейтерия и кислорода-18. Были определены среднесезонные, среднегодовые вариации содержания дейтерия и кислорода-18 в осадках, выявлена высокая корреляционная связь значений изотопов с температурой и слабая с влажностью и количеством выпадающих осадков. Результаты и основные выводы исследований представлены в монографии В.Е. Ветштейна 1982 г. [3].

Начиная с 1970 г., изотопная лаборатория ВСЕГИНГЕО тесно сотрудничает с Международным агентством по атомной энергии (МАГАТЭ), выполняя ряд научных программ по использованию изотопных методов при решении различных гидрогеологических задач [12].

Для более надежной оценки взаимосвязи подземных водоносных горизонтов в

пределах Ленинградской области впервые в СССР в комплекс традиционных гидрогеологических работ были включены изотопно-геохимические исследования [14]. В результате была количественно определена связь поверхностных и подземных вод. Содержание дейтерия и кислорода-18 в поверхностных водоемах в результате процессов неравновесного испарения практически всегда превышает концентрации этих изотопов в атмосферных осадках и водах поверхностного стока. Трансформация в количественном составе изотопов и в их соотношении служит естественной меткой, позволяющей судить о наличии или отсутствии подпитывания подземных вод из поверхностного водоема.

Изотопные методы применяли для решения задач, связанных с источниками и областями питания подземных вод, взаимосвязи водоносных горизонтов, изучения процессов смешения подземных вод и инфильтрации поверхностных вод в подземные [34, 45]. Одна из первых попыток установления областей питания подземных вод была предпринята в Исландии, по результатам которых была построена карта распределения изоконцентраций дейтерия [19, 31]. Подобные исследования проводились в Никарагуа, Австрии и Греции. Выявление областей питания путем интерпретации изотопных данных основывается на различии в изотопном составе атмосферных осадков, обусловленном процессами конденсации атмосферной влаги. Исследования по изучению взаимосвязи водоносных горизонтов [25] проводились в Алжире, Саудовской Аравии и Тунисе.

Исследования Тейлора, Омото и др. [16] по определению концентрации дейтерия и кислорода-18 в глубоких подземных водах седиментационных бассейнов в конце 70-х гг. показало следующее: в подземных условиях на стадии диагенеза осадочной толщи изотопный состав подземных вод также может изменяться. При температурах, повышенных по сравнению с поверхностными, происходит изотопный кислородный обмен подземных вод с водовмещающими породами, и концентрация кислорода-18 в подземных водах может возрастать. Концентрация дейтерия также не остается

постоянной, но ее изменение вследствие процессов обмена с гидроксидсодержащими минералами, например, глинистыми, выражено гораздо слабее, чем изменение изотопного состава кислорода, так как содержание кислорода в породах осадочной толщи более чем на порядок превосходит содержание водорода. По концентрациям дейтерия подземные воды, сингенетичные с осадочной толщей седиментационного бассейна, значительно отличаются от инфильтрационных метеогенных вод, поступающих в бассейн на континентальной стадии его существования.

В начале 80-х годов в Европе были начаты систематические исследования, направленные на определение изотопного состава приповерхностного водяного пара в региональном масштабе. Изотопный состав суточных образцов атмосферной влаги контролировался сетью нескольких станций на европейском континенте в период с 1980 по 1984 гг. (Schoch-Fischer et al., 1984). Одна сеть (Гейдельберг, Германия) продолжает изучение до настоящего времени (Jacob and Sonntag 1991, Agemar, 2001) и накопила уникальную запись с высоким разрешением о содержании изотопов кислорода и водорода ( $^{18}\text{O}$  и D) в атмосферных водяных парах, охватывающих более чем два десятилетия [32].

Технологический прогресс привел к улучшению масс-спектрометрического оборудования, но это, в свою очередь, привело к новым проблемам, связанным с выборкой и обработкой образцов. Появление масс-спектрометра (AMS) высокого разрешения позволило измерять очень низкие концентрации любого изотопа (вплоть до нескольких атомов), как стабильных, так и радиоактивных [8].

Российский ученый Ю.А. Федоров в конце 80-х начале 90-х гг. теоретически и экспериментально обосновал новое научное направление – изотопно-химический мониторинг природных вод, установил, что в региональном и глобальных масштабах в подземных и поверхностных водах наблюдается зональное распределение изотопного состава кислорода и водорода [18].

В 2000-х гг. активно велись исследования стабильных изотопов кислорода и водорода подземных вод на территории Кавказа,

Тимана, Крыма, Карелии, Якутии, Западной Сибири и др. районов [1, 5, 6, 9, 11, 13, 15, 17, 40]. Данные по изотопному составу подземных и поверхностных вод на указанных территориях были представлены впервые или дополнены современными исследованиями. В результате установлены особенности распределения стабильных изотопов водорода и кислорода и определены условия формирования подземных вод.

В начале XXI века в ряде зарубежных стран было продолжено изучение формирования состава подземных вод методами изотопно-геохимического анализа, начатое в прошлом столетии. Результаты исследований позволили оптимизировать схему эксплуатации водозаборов подземных вод во Вьетнаме [33], обобщить данные по горячим источникам и их использованию во многих провинциях Китая [30, 41], определить геохимические процессы, контролирующие формирование состава подземных вод на территории США [27], оценить динамику подземных вод на сложных участках, представленными вулканическими островами Португалии [42], обобщить данные по подземным водам Финляндии, Индии, Франции, Мексики и других стран [28, 35, 36, 38].

На сегодняшний день в рамках МАГАТЭ одним из основных видов деятельности является содействие сотрудничеству между развивающимися странами, с целью оказания помощи в накоплении на местах экспертных знаний по использованию изотопных методов. Благодаря применению этого подхода были достигнуты значительные успехи в развитии таких экспертных знаний в Африке и Латинской Америке. Целью регионального проекта, осуществляемого в Кении, Мадагаскаре, Намибии, Южной Африке, Танзании, Уганде и Зимбабве является создание регионального потенциала для применения изотопных методов и изотопного анализа при проведении этими странами исследований ресурсов подземных вод. Результатом этого регионального проекта стало создание современной аналитической лаборатории в Университете Витватерсранда, Южная Африка, где к настоящему времени уже проделана большая работа для того, чтобы она стала самостоятельным аналитическим центром в этом регионе.

Страны, участвующие в этом региональном проекте, могут теперь включать изотопный анализ в рамки своих гидрологических исследований. Данные, собранные в ходе реализации этого проекта, используются также Танзанией при разработке планов защиты ее подземных вод. В осуществлении аналогичного регионального проекта в Латинской Америке принимают участие 30 учреждений в Колумбии, Коста-Рике, Парагвае, Перу, Уругвае, Чили и Эквадоре, которые используют теперь изотопные и обычные методы для сбора данных о системе водоносных горизонтов. Сообщая эти учреждения работают над решением проблем дефицита воды и управления ресурсами в этом регионе.

#### **Применение изотопных методов на территории Пермского края**

Анализ литературы зарубежных и отечественных авторов показал, что среди большой массы работ, посвященных применению изотопных методов в гидрогеологии, сравнительно небольшое количество данных имеется для территории Пермского края.

С 1970-х гг. в течение двадцати лет Институт водных ресурсов РАН проводили исследования изотопного состава атмосферных осадков ( $\delta^{18}\text{O}$  и  $\delta^2\text{H}$ ,  $\delta^3\text{H}$ ), выпавших на территории Перми. Данные внесены в базу Global Network of Isotopes in Precipitation (GNIP), созданную в 1961 г. по программе МАГАТЭ по водным ресурсам и Всемирной метеорологической организации, которые изучают стабильные изотопы водорода и кислорода и состав трития в осадках по всему миру [48].

С 2011 г. анализом изотопного состава воды с помощью метода лазерной ИК-спектроскопии на территории Пермского края в лабораторных и полевых условиях занимается Лаборатория гидрохимического анализа геологического факультета Пермского государственного национального исследовательского университета (ПГНИУ). Лаборатория оснащена уникальным оборудованием на уровне мировых научных центров [49].

В 2014 г. под руководством И.И. Минькевич был выполнен изотопный анализ воды подземных озер Кунгурской Ледяной пещеры. Выявлено, что по изотопному

составу воды пещерных озер относятся к метеогенным, а повышенная минерализация, выявленная по химическому анализу воды, свидетельствует о выщелачивании выщелачивающих карстующихся пород [7].

С 2016 г. сотрудники Кунгурской лаборатории-стационара совместно с ПГНИУ (грант РФФИ №17-45-590369 р\_а «Исследование формирования изотопного и химического состава природных вод на территории Пермского края») занимаются исследованием стабильных изотопов водорода и кислорода атмосферных осадков, речных вод, выходов подземных вод и подземных карстовых озер Северного и Среднего Урала.

Анализ литературы показал, что изотопная гидрогеология – быстро прогрессирующее и одно из самых молодых направлений, завоевавшее в последние 50 лет большую популярность за рубежом и в России. Методы изотопной масс-спектрометрии, которые в настоящее время широко используются в мире позволяют решить обширный круг проблем современной гидрогеохимии. Преимуществом применения изотопных методов является то, что исследуемые параметры могут быть оценены при использовании малого объема опробования в короткий промежуток времени. Комплексное использование гидрогеохимических и изотопных исследований имеет большой потенциал для получения более подробной гидрогеологической информации, необходимой для быстрой и эффективной оценки подземных ресурсов и осуществление прогнозирования, востребованного в практической деятельности.

*\*Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ в рамках научных проектов № 17-45-590369 «Исследование формирования изотопного и химического состава природных вод на территории Пермского края» (2017 г.).*

#### **БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК**

1. Алексеев С.В., Алексеева Л.П., Борисов В.Н. и др. Изотопный состав (H, O, Cl, Sr) подземных рассолов Сибирской платформы // Геология и геофизика. 2007. Т. 48. № 3. С. 291-304.

2. Бродский А.И. Химия изотопов. М., 1957. 596 с.
3. Ветштейн В.Е. Изотопы кислорода и водорода природных вод СССР. Л.: Недра, 1982. 216 с.
4. Ветштейн В.Е., Артемчук В.Г., Альтшулер П.Г. Формирование изотопного состава пластовых вод нефтегазоносных бассейнов СССР // В кн.: Тезисы докладов УП Всесоюзного симпозиума по стабильным изотопам в геохимии. М., ГЕОХИ АН СССР, 1978. С. 128-129.
5. Дублянский Ю.В., Климчук А.Б., Амеличев Г.Н., Токарев С.В., Шпётль К. Изотопный состав атмосферных осадков и карстовых источников северо-западного склона Крымских гор // Спелеология и карстология. 2012. № 9. С. 14-21.
6. Каюкова Е.П. Использование стабильных изотопов для оценки элементов водного баланса // Вестник СПбГУ. Сер. 7. 2013. Вып. 4. С. 53-61.
7. Килин Ю.А., Минькевич И.И. и др. Гидрогеологическая обстановка района Кунгурской Ледяной пещеры // Пещеры: сб. научн. тр. Пермь: Естественно-научн. Ин-т Перм. гос. Нац. Иссл. Ун-та, 2014. Вып. 37. С. 148.
8. Маринов Н.А. Гидрогеологические исследования за рубежом. М.: Недра, 1982. 428 с.
9. Митюшева Т.П. Изотопный состав подземных вод пермских отложений южного Тимана и Притиманья // Проблемы минералогии, петрографии и металлогении. Сб. науч. статей. Перм. Ун-т. Пермь, 2014. Вып. 17. С. 255-265.
10. Пейн Б.Р. Методы изотопной гидрологии – практическое решение водных проблем // Бюллетень МАГАТЭ. 1982. Т. 24. №3. С. 9-12.
11. Пиннекер Е.В., Борисов В.Н., Кустов Ю.И. и др. Новые данные об изотопном составе кислорода и водорода рассолов Сибирской платформы // Водные ресурсы. 1987. № 3 С. 105-115.
12. Поляков В.А., Батова Э.А., Бобков А.Ф., Дубинчук В.Т., Пятницкий Н.В. Результаты изотопных исследований гидрогеологических и гидрологических объектов // Разведка и охрана недр. 2009. №9. С. 61-64.
13. Поляков В.А., Соколовский Л.Г. Генезис и динамика минеральных вод Кавказа по результатам изотопно-геохимических исследований. М.: Геоинформмарк, 2003.
14. Соботович Э.В., Бондаренко Г.Н., Ветштейн В.Е. и др. Изотопно-геохимические методы оценки степени взаимосвязи подземных и поверхностных вод. Киев: Наукова думка, 1977. 154 с.
15. Соколовский Л.Г., Поляков В.А. и др. Изотопно-гидрогеохимическое изучение подземных и поверхностных вод Западно-Сибирского артезианского бассейна и Уральской сложной гидрогеологической складчатой области // Разведка и охрана недр. 2010. С. 65-71.
16. Тейлор Х.П. Применение изотопии кислорода и водорода к проблемам гидротермального изменения вмещающих пород и рудообразования // В кн.: Стабильные изотопы и проблемы рудообразования. М.: Мир, 1977. С. 213-298.
17. Токарев И.В., Бородулина Г.С. и др. Исследование подземных вод в отдельных районах Карелии изотопно-геохимическими методами // Вестник Санкт-Петербургского университета. Сер. 7. 2008. Вып. 2.
18. Федоров Ю.А. Изотопный состав поверхностных и подземных вод и его формирования под влиянием естественных и антропогенных процессов: автореф. дис. ... док. геогр. наук. Ростов-на-Дону, 1992.
19. Arnason B. Hydrothermal systems in Iceland traced by deuterium. Geothermics, 1976, Vol. 5. P. 125-151.
20. Craig H. Isotopic composition and origin of the Red Sea and Salton Sea geothermal brines. Science, 1966. Vol. 154. P. 1544-1548.
21. Craig H. Isotopic variations in meteoric waters // Science. 1961. №133 (3465). P. 1702-1703.
22. Craig H. and Gordon L. I. Stable Isotopes in Oceanographic Studies and Paleotemperatures. Pisa, 1965. 131 p.
23. Dansgaard W. Stable isotopes in precipitation // Tellus. 1964. XVI. P. 436-468.
24. Dansgaard W. The O18-abundance in fresh water // Geochimica et Cosmochimica Acta. 1954. Vol. 6. Issues 5–6. P. 241-260.

25. Deak J. Environmental isotopes and water chemical studies for groundwater research in Hungary. In: Isotope Hydrology. Proc. Symp. IAEA, 1979. Vol. 1. P. 221-247.
26. Ferrara G.C., Gonfiantini R., Panichi C. La composizione isotopica della vapore de alcuni soffioni di Larderello e della'acqua di alcune sorgenti e moffete della Toscana. In: Atti. soc. tosc. sci. nat., 1965. Vol. 75. P. 570-588.
27. Hackley K.C., Panno S.V., Anderson T.F. Chemical and isotopic indicators of groundwater evolution in the basal sands of a buried bedrock valley in the midwestern United States: Implications for recharge, rock-water interactions, and mixing // Bulletin of the Geological Society of America. 2010. Vol. 122. (7-8). P. 1047-1066.
28. Julián González Identifying Groundwater Recharge Sites through Environmental Stable Isotopes in an Alluvial Aquifer // Water. 2017. Vol. 9. # 569.
29. Knauth L.P., Lowe D R. Oxygen isotope geochemistry of cherts from the Overwacht Group (3.4 billion years), Transvaal, South Afrika, with implication for secular variations in isotope composition of cherts // Earth and Planet. Sci. Lett. 1978. Vol. 41. P. 209- 222.
30. Li, X., Shi, W., Sun, Z., Zhou, W., and Zhang, W.: An oxygen and hydrogen study of thermal springs of Jiangxi province, southeastern China. IAEA Research Contract Report. 1993. 42 p.
31. Mazar E. The Ram Crater Lake. A note on the revival of a 2000-year old groundwater tracing experiments. In: Interp. of environm. isotope and hydrochemical data in groundwater hydrology. Proc. Adv. Group Meeting IAEA, 1976. P. 179-181.
32. Metanie J. Leng Isotopes in Palaeoenvironmental Research. UK. 2006. Vol. 10. 307 p.
33. Nguyen D.T., Lam H.Q.V. Using isotope hydrology method to determine the origin of ground water sources in the middle-Pliocene aquifer in the Mekong Delta, Vietnam // International conference on clean water, air & soil (Clean WAS 2017). Bangkok, Thailand, 2017.
34. Payne B.R., Schroeter P. Importance of infiltration from the Chimbo River in Ecuador to ground water: A study on environmental isotope variations. In: Isotope Hydrology, Proc. Symp. IAEA. 1979. Vol. 1. P. 145-156.
35. Pierre Séraphin and etc. Partitioning groundwater recharge between rainfall infiltration and irrigation return flow using stable isotopes: The Crau aquifer // Journal of Hydrology. 2016. Vol. 542. P. 241-253.
36. Riikka Kietäväinen. Deep Groundwater Evolution at Outokumpu, Eastern Finland: From Meteoric Water to Saline Gas-Rich Fluid. Espoo, Finland, 2017.
37. Rozanski K, Araguas-Araguas L, Gonfiantini R Isotopic patterns in modern global precipitation. In: Swart PK, Lohmann KC, McKenzie J, Savin S (eds) Climate change in continental isotopic records. American Geophysical Union, Geophys Monogr. 1993. Vol. 78. P. 1-36.
38. Shahul Hameed A., T.R. Resmi and etc. Isotopic characterization and mass balance reveals groundwater recharge pattern in Chaliyar river basin, Kerala, India // Journal of Hydrology: Regional Studies. 2015. Vol. 4. Part A. P. 48-58.
39. Sharp Zachary Principles of stable isotope geochemistry. New Jersey, 2007. 344 pp.
40. Shouakar-Stash O., Alexeev S.V., Frapce S.K., Alexeeva L.P. et al. Geochemistry and stable isotopic signatures, including chlorine and bromine isotopes of the deep groundwaters, of the Siberian platform, Russia // Applied Geochemistry. 2007. Vol. 22. Issue 3. P. 589-605.
41. Sun, Z.X, Li, X.L.: Studies of geothermal waters in Jiangxi Province using isotope techniques. Science in China (series E). 2001. Vol. 44S. P. 144-150.
42. Susana Prada and etc. Using stable isotopes to characterize groundwater recharge sources in the volcanic island of Madeira, Portugal // Journal of Hydrology. 2016. Vol. 536. P. 409-425.
43. Theodorsson P. Natural tritium in groundwater studies // Isotope in Hydrology. Proc Symp. IAEA. 1967. P. 371-380.
44. Urey H. C., Brandner J. D. Kinetics of the isotopic exchange reaction between carbon monoxide and carbon dioxide. J. Chem. Phys. Vol. 13. P. 351-362.
45. Vinograd J., Friedman. Deuterium as a tracer of regional ground- water flow, Southern Great basin, Nevada a47nd California. Bull. Geol. Soc. America. 1972. Vol. 83. P. 3691-3708.

46. Vogel J. C., Enhalt D. The use of the carbon isotopes in groundwater studies. In: Radioisotopes in Hydrology, Proc. Symp. IAEA. 1963. P. 383-395.
47. Yurtsever Y, Gat JR Atmospheric waters. In: Gat JR, Gonfiantini R. (eds) Stable Isotope Hydrology: Deuterium and oxygen-18 in the water cycle. IAEA Tech Rep Ser. 1981. Vol. 210. P. 103-142.
48. [http://www.naweb.iaea.org/napc/ih/IHS\\_resources\\_gnip.html](http://www.naweb.iaea.org/napc/ih/IHS_resources_gnip.html)
49. <http://www.psu.ru/fakultety/geologicheskij-fakultet/kafedry/kafedra-dinamicheskoy-geologii-i-gidrogeologii/nauchno-issledovatel'skaya-deyatelnost-kafedry>
50. <http://isohis.iaea.org>

### REFERENCES

- Alekseev S.V., Alekseeva L.P., Borisov V.N. i dr. Izotopnyj sostav (H, O, Cl, Sr) podzemnyh rassolov Sibirskoj platformy // Geologiya i geofizika. 2007. T. 48. № 3. S. 291-304.
- Brodskij A.I. Himiya izotopov. M., 1957. 596 s.
- Vetshtejn V.E. Izotopy kisloroda i vodoroda prirodnyh vod SSSR. L.: Nedra, 1982. 216 s.
- Vetshtejn V.E., Artemchuk V.G., Al'tshuler P.G. Formirovanie izotopnogo sostava plastovyh vod neftegazonosnyh bassejnov SSSR // V kn.: Tezisy dokladov UP Vsesoyuznogo simpoziuma po stabil'nyh izotopam v geohimii. M.: GEOHI AN SSSR, 1978. S. 128-129.
- Dublyanskij YU.V., Klimchuk A.B., Amelichev G.N., Tokarev S.V., SHpyotl' K. Izotopnyj sostav atmosferyh osadkov i karstovyh istochnikov severo-zapadnogo sklona Krymskih gor // Speleologiya i karstologiya. 2012. № 9. S. 14-21.
- Kayukova E.P. Ispol'zovanie stabil'nyh izotopov dlya ocenki ehlementov vodnogo balansa // Vestnik SPbGU. Ser. 7. 2013. Vyp. 4. S. 53-61.
- Kilin YU.A., Min'kevich I.I. i dr. Hidrogeologicheskaya obstanovka rajona Kungurskoj Ledyanoj peshchery // Peshchery: sb. nauchn. tr. Perm': Estestvenno-nauchn. In-t Perm. gos. Nac. Issl. Un-ta, 2014. Vyp. 37. S. 148.
- Marinov N.A. Hidrogeologicheskie issledovaniya za rubezhom. M.: Nedra, 1982. 428 s.
- Mityusheva T.P. Izotopnyj sostav podzemnyh vod permskih otlozhenij yuzhnogo Timana i Pritiman'ya // Problemy mineralogii, petrografii i metallogenii. Sb. nauch. statej. Perm. Un-t. Perm', 2014. Vyp. 17. S. 255-265.
- Pejn B.R. Metody izotopnoj gidrologii – prakticheskoe reshenie vodnyh problem // Byulleten' MAGATEH. 1982. T. 24. №3. S. 9-12.
- Pinneker E.V., Borisov V.N., Kustov YU.I. i dr. Novye dannye ob izotopnom sostave kisloroda i vodoroda rassolov Sibirskoj platformy // Vodnye resursy. 1987. № 3 S. 105-115.
- Polyakov V.A., Batova Eh.A., Bobkov A.F., Dubinchuk V.T., Pyatnickij N.V. Rezul'taty izotopnyh issledovanij gidrogeologicheskikh i gidrologicheskikh ob'ektov // Razvedka i ohrana nedr. 2009. №9. S. 61-64.
- Polyakov V.A., Sokolovskij L.G. Genezis i dinamika mineral'nyh vod Kavkaza po rezul'tatam izotopno-geohimicheskikh issledovanij. M.: Geoinformmark, 2003.
- Sobotovich Eh.V., Bondarenko G.N., Vetshtejn V.E. i dr. Izotopno-geohimicheskie metody ocenki stepeni vzaimosvyazi podzemnyh i poverhnostnyh vod. Kiev: Naukova dumka, 1977. 154 s.
- Sokolovskij L.G., Polyakov V.A. i dr. Izotopno-gidrogeohimicheskoe izuchenie podzemnyh i poverhnostnyh vod Zapadno-Sibirskogo artezijskogo bassejna i Ural'skoj slozhnoj gidrogeologicheskoy skladchatoj oblasti // Razvedka i ohrana nedr. 2010. S. 65-71.
- Tejlor X.P. Primenenie izotopii kisloroda i vodoroda k problemam gidrotermal'nogo izmeneniya vmeshchayushchih porod i rudoobrazovaniya // V kn.: Stabil'nye izotopy i problemy rudoobrazovaniya. M.: Mir, 1977. S. 213-298.
- Tokarev I.V., Borodulina G.S. i dr. Issledovanie podzemnyh vod v otdel'nyh rajonah Karelii izotopno-geohimicheskimi metodami // Vestnik Sankt-Peterburgskogo universiteta. Ser. 7. 2008. Vyp. 2.
- Fedorov YU.A. Izotopnyj sostav poverhnostnyh i podzemnyh vod i ego formirovaniya pod vliyaniem estestvennyh i antropogennyh processov: avtoref. dis. ... dok. geogr. nauk. Rostov-na-Donu, 1992.

19. Arnason V. Hydrothermal systems in Iceland traced by deuterium. *Geothermics*, 1976, Vol. 5. S. 125-151.
20. Craig H. Isotopic composition and origin of the Red Sea and Salton Sea geothermal brines. *Science*, 1966. Vol. 154. P. 1544-1548.
21. Craig H. Isotopic variations in meteoric waters // *Science*. 1961. №133 (3465). P. 1702-1703.
22. Craig H. and Gordon L. I. Stable Isotopes in Oceanographic Studies and Paleotemperatures. Pisa, 1965. 131 p.
23. Dansgaard W. Stable isotopes in precipitation // *Tellus*. 1964. XVI. P. 436-468.
24. Dansgaard W. The O18-abundance in fresh water // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 1954. Vol. 6. Issues 5-6. P. 241-260.
25. Deak J. Environmental isotopes and water chemical studies for groundwater research in Hungary. In: *Isotope Hydrology. Proc. Symp. IAEA*, 1979. Vol. 1. P. 221-247.
26. Ferrara G.C., Gonfiantini R., Panichi C. La composizione isotopica della vapore de alcuni soffioni di Larderello e della'acqua di alkune sorgenti e moffete della Toscana. In: *Atti. soc. tosc. sci. nat.*, 1965. Vol. 75. P. 570-588.
27. Hackley K.C., Panno S.V., Anderson T.F. Chemical and isotopic indicators of groundwater evolution in the basal sands of a buried bedrock valley in the midwestern United States: Implications for recharge, rock-water interactions, and mixing // *Bulletin of the Geological Society of America*. 2010. Vol. 122 (7-8). P. 1047-1066.
28. Julián González Identifying Groundwater Recharge Sites through Environmental Stable Isotopes in an Alluvial Aquifer // *Water*. 2017. Vol. 9. # 569.
29. Knauth L.P., Lowe D R. Oxygen isotope geochemistry of cherts from the Overwacht Group (3.4 billion years), Transvaal, South Afrika, with implication for secular variations in isotope composition of cherts // *Earth and Planet. Sci. Lett*. 1978. V. 41. P. 209- 222.
30. Li, X., Shi, W., Sun, Z., Zhou, W., and Zhang, W.: An oxygen and hydrogen study of thermal springs of Jiangxi province, south-eastern China. IAEA Research Contract Report. 1993. 42 p.
31. Mazor E. The Ram Crater Lake. A note on the revival of a 2000-year old groundwater tracing experiments. In: *Interp. of environm. isotope and hydrochemical data in groundwater hydrology. Proc. Adv. Group Meeting IAEA*, 1976. P. 179-181.
32. Metanie J. Leng Isotopes in Palaeo-environmental Research. UK. 2006. Vol. 10. 307 p.
33. Nguyen D.T., Lam H.Q.V. Using isotope hydrology method to determine the origin of ground water sources in the middle-Pliocene aquifer in the Mekong Delta, Vietnam // *International conference on clean water, air & soil (Clean WAS 2017)*. Bangkok, Thailand, 2017.
34. Payne V.R., Schroeter P. Importance of infiltration from the Chimbo River in Equador to ground water: A study on environmental isotope variations. In: *Isotope Hydrology, Proc. Symp. IAEA*. 1979. Vol. 1. P. 145-156.
35. Pierre Séraphin and etc. Partitioning groundwater recharge between rainfall infiltration and irrigation return flow using stable isotopes: The Crau aquifer // *Journal of Hydrology*. 2016. Vol. 542. P. 241-253.
36. Riikka Kietäväinen. Deep Groundwater Evolution at Outokumpu, Eastern Finland: From Meteoric Water to Saline Gas-Rich Fluid. Espoo, Finland, 2017.
37. Rozanski K, Araguas-Araguas L, Gonfiantini R Isotopic patterns in modern global precipitation. In: Swart PK, Lohmann KC, McKenzie J, Savin S (eds) *Climate change in continental isotopic records*. American Geophysical Union, *Geophys Monogr*. 1993. Vol. 78. P. 1-36.
38. Shahul Hameed A., T.R. Resmi and etc. Isotopic characterization and mass balance reveals groundwater recharge pattern in Chaliyar river basin, Kerala, India // *Journal of Hydrology: Regional Studies*. 2015. Vol.4. Part A. P. 48-58.
39. Sharp Zachary Principles of stable isotope geochemistry. New Jersey, 2007. 344 p.
40. Shouakar-Stash O., Alexeev S.V., Frape S.K., Alexeeva L.P. et al. Geochemistry and stable isotopic signatures, including chlorine and bromine isotopes of the deep groundwaters, of the Siberian platform, Russia // *Applied Geochemistry*. 2007. Vol. 22. Issue 3. Pp. 589-605.

41. Sun, Z.X, Li, X.L.: Studies of geothermal waters in Jiangxi Province using isotope techniques. Science in China (series E). 2001. Vol. 44S. P. 144-150.
42. Susana Prada and etc. Using stable isotopes to characterize groundwater recharge sources in the volcanic island of Madeira, Portugal // Journal of Hydrology. 2016. Vol. 536. P. 409-425.
43. Theodorsson P. Natural tritium in groundwater studies // Isotope in Hydrology. Proc Symp. IAEA. 1967. P. 371-380.
44. Urey H. C., Brandner J. D. Kinetics of the isotopic exchange reaction between carbon monoxide and carbon dioxide. J. Chem. Phys. Vol. 13. P. 351-362.
45. Vinograd J., Friedman. Deuterium as a tracer of regional ground- water flow, Southern Great basin, Nevada a47nd California. Bull. Geol. Soc. Ame-rica. 1972. Vol. 83. P. 3691-3708.
46. Vogel J. C., Enhalt D. The use of the carbon isotopes in groundwater studies. In: Radioisotopes in Hydrology, Proc. Symp. IAEA. 1963. P. 383-395.
47. Yurtsever Y, Gat JR Atmospheric waters. In: Gat JR, Gonfiantini R. (eds) Stable Isotope Hydrology: Deuterium and oxygen-18 in the water cycle. IAEA Tech Rep Ser. 1981. Vol. 210. P. 103-142.
48. [http://www-naweb.iaea.org/naweb/ih/IHS\\_resources\\_gnip.html](http://www-naweb.iaea.org/naweb/ih/IHS_resources_gnip.html)
49. <http://www.psu.ru/fakultety/geologicheskij-fakultet/kafedry/kafedra-dinamicheskoy-geologii-i-gidrogeologii/nauchno-issledovatel'skaya-deyatelnost-kafedry>
50. <http://isohis.iaea.org>

---

## HISTORY OF ISOTOPE RESEARCH IN HYDROGEOLOGY

*Kazantseva A.S.*

**Annotation:** this article presents key historical events related to the development and application of isotope methods in the field of hydrogeology from the beginning of the discovery of water isotopes to the present stage, at the world level and in the Perm region.

**Key words:** isotope methods in hydrogeology, history of use, hydrogeological studies, world studies, isotope studies in the Perm region.

---

© Казанцева А.С., 2018

---

*Казанцева А.С. История изотопных исследований в гидрогеологии // Вектор ГеоНаук. 2018. Т.1. №3. С. 11-22.*

*Kazantseva A.S., 2018. History of isotope research in hydrogeology. Vector of Geosciences. 1(3): 11-22.*

---