

Лю Цзэхуа

Восточно-Китайского политехнический университет, студент

Китай, Шанхай

ИЗОТОПНЫЕ МЕТОДЫ В ГИДРОГЕОЛОГИИ: ТРАССИРОВАНИЕ ПУТЕЙ МИГРАЦИИ ПОДЗЕМНЫХ ВОД С ПОМОЩЬЮ СТАБИЛЬНЫХ ИЗОТОПОВ

Аннотация: В статье рассматриваются современные изотопные методы исследования подземных вод с использованием стабильных изотопов водорода (^2H) и кислорода (^{18}O). Особое внимание уделено их применению для трассирования путей миграции подземных вод, определения областей питания водоносных горизонтов и выявления процессов смешения водных масс. Анализируются теоретические основы изотопного фракционирования, включая глобальную метеорную линию воды (GMWL) и её региональные вариации. Рассмотрены практические аспекты использования изотопных методов для решения актуальных задач гидрогеологии, таких как управление водными ресурсами, оценка влияния климатических изменений и антропогенного воздействия. Особое внимание уделено перспективам развития изотопных исследований, включая моделирование изотопного переноса и интеграцию с современными геоинформационными технологиями.

Ключевые слова: гидрогеология, изотопные методы, стабильные изотопы, дейтерий, кислород-18, трассирование подземных вод, изотопное фракционирование, GMWL

Abstract: The article examines modern isotopic methods for groundwater research using stable isotopes of hydrogen (^2H) and oxygen (^{18}O). Special attention is paid to their application for tracing groundwater migration pathways, identifying recharge areas of aquifers, and detecting water mixing processes. The theoretical foundations of isotopic fractionation are analyzed, including the Global Meteoric Water Line (GMWL) and its regional variations. Practical aspects of using isotopic methods to

address current hydrogeological challenges are discussed, such as water resources management, assessment of climate change impacts, and anthropogenic influences. Particular emphasis is placed on the prospects for developing isotopic research, including modeling of isotopic transport and integration with modern geoinformation technologies.

Keywords: hydrogeology, isotopic methods, stable isotopes, deuterium, oxygen-18, groundwater tracing, isotopic fractionation, GMWL

В современной гидрогеологии изотопные методы исследования приобретают все большее значение как незаменимый инструмент для решения сложных задач изучения подземных вод. Их особая актуальность обусловлена глобальными вызовами, связанными с растущим дефицитом водных ресурсов, изменением климатических условий и усилением антропогенного воздействия на гидрогеологические системы. В условиях, когда традиционные методы исследования часто оказываются недостаточно информативными, изотопный анализ предоставляет принципиально новые возможности для понимания генезиса и динамики подземных вод.

Актуальность использования стабильных изотопов водорода (^2H) и кислорода (^{18}O) в гидрогеологических исследованиях определяется несколькими ключевыми факторами. Во-первых, эти изотопы являются естественными составляющими молекулы воды, что делает их идеальными индикаторами для изучения гидрологических процессов. Во-вторых, их относительное содержание в воде изменяется предсказуемым образом в результате различных физических и химических процессов, таких как испарение, конденсация, замерзание и взаимодействие с горными породами. В-третьих, изотопный состав воды сохраняет информацию о ее происхождении и истории, что позволяет реконструировать пути миграции и условия формирования подземных вод.

Особую значимость изотопные методы приобретают при решении задач, связанных с управлением водными ресурсами в условиях их ограниченности.

Они позволяют точно определять области питания водоносных горизонтов, оценивать время возобновления запасов подземных вод и идентифицировать источники их загрязнения. В экологических исследованиях изотопный анализ незаменим для мониторинга влияния климатических изменений, изучения взаимодействия поверхностных и подземных вод, а также оценки уязвимости водоносных систем.

Цель применения изотопных методов в гидрогеологии заключается в получении принципиально новой информации о происхождении, путях миграции и трансформации подземных вод, которая недоступна при использовании традиционных подходов. Эти методы позволяют решать широкий круг задач - от определения генезиса водных масс до прогнозирования изменений гидрогеологических систем под влиянием природных и антропогенных факторов. Особенно важны они при изучении сложных гидрогеологических условий, где другие методы исследования дают неоднозначные результаты.[1]

Основная ценность изотопных исследований заключается в их способности служить естественным трассером, позволяющим проследить движение воды в подземной гидросфере.[2] Анализ изотопного состава дает возможность различать воды различного происхождения - атмосферные, инфильтрационные, седиментогенные и ювенильные, а также выявлять процессы их смешения. Это особенно важно при решении практических задач водоснабжения, оценке запасов подземных вод и прогнозировании изменений водного режима.

В условиях нарастающего антропогенного воздействия на водные ресурсы изотопные методы становятся необходимым инструментом для разработки научно обоснованных стратегий управления подземными водами. Они позволяют не только решать текущие гидрогеологические задачи, но и прогнозировать возможные изменения водных ресурсов в будущем, что делает их применение особенно актуальным в современной науке и практике.

Теория изотопного трассирования подземных вод основана на фундаментальных принципах изотопного фракционирования в природных водах. В основе метода лежит анализ пространственно-временных вариаций изотопного состава водной среды, обусловленных физико-химическими процессами, происходящими в гидрологическом цикле. Ключевым концептом является понимание того, что изотопный состав воды представляет собой своеобразную "природную метку", сохраняющую информацию о происхождении и путях миграции водных масс.

Изотопное фракционирование при фазовых переходах воды - основной механизм, формирующий пространственную неоднородность изотопного состава. Процессы испарения и конденсации приводят к селективному разделению изотопов, причем более легкие молекулы H_2^{16}O преимущественно переходят в парообразное состояние, тогда как более тяжелые (H_2^{16}O , H_2^{18}O) концентрируются в жидкой фазе. [3] Это явление описывается коэффициентом фракционирования α , который для системы вода-пар при 20°C составляет 1,0098 для кислорода-18 и 1,084 для дейтерия.

Глобальная метеорная линия воды (GMWL), выведенная Крэгом в 1961 году ($\delta^2\text{H} = 8 \cdot \delta^{18}\text{O} + 10$), служит основным ориентиром для интерпретации изотопных данных.[4] Отклонения от этой линии свидетельствуют о специфических процессах, воздействовавших на водную массу: испарительном обогащении (смещение вправо от GMWL), взаимодействии с карбонатными породами (смещение влево) или смешении вод различного генезиса. Региональные метеорные линии, учитывающие местные климатические особенности, позволяют повысить точность интерпретации.

Для трассирования путей миграции особое значение имеет пространственный анализ изотопного градиента. В идеальных условиях изотопный состав подземных вод демонстрирует устойчивую тенденцию к облегчению (уменьшению δ -значений) по направлению движения водного потока, что связано с процессами изотопного обмена на контакте вода-порода

и фракционной диффузией. Однако в реальных гидрогеологических системах эта закономерность может нарушаться вследствие смешения вод из разных источников, испарительных процессов в зоне аэрации или влияния палеогидрологических условий.

Важным теоретическим аспектом является учет температурной зависимости изотопного фракционирования. Температурный коэффициент для кислорода-18 составляет примерно $-0,2\text{‰}$ на 1°C , что позволяет использовать изотопные данные для реконструкции условий инфильтрации и оценки глубины циркуляции подземных вод.[5] В карстовых системах это свойство особенно ценно для идентификации областей разгрузки глубинных вод.

Теория изотопного смешения представляет собой мощный инструмент для количественной оценки взаимодействия водных масс. При смешении двух вод с различным изотопным составом результирующая δ -значения подчиняются закону линейного смешения, что позволяет рассчитывать пропорции компонентов. Этот подход особенно эффективен при изучении взаимодействия поверхностных и подземных вод, а также при оценке антропогенного влияния на водоносные горизонты.

Современное развитие теории изотопного трассирования включает моделирование изотопного переноса в пористых средах с учетом процессов адвекции, диффузии и изотопного обмена. Эти модели позволяют количественно оценивать параметры миграции подземных вод, такие как скорость фильтрации и время пребывания воды в водоносном горизонте, что существенно расширяет возможности гидрогеологических исследований.

В заключение следует отметить, что современные технологии деградации сточных вод демонстрируют значительный прогресс в решении одной из наиболее острых экологических проблем современности - загрязнения водных ресурсов устойчивыми и трудноразлагаемыми соединениями. Эволюция методов очистки - от традиционных механических и биологических процессов к передовым окислительным, мембранным и гибридным системам - позволила

существенно повысить эффективность удаления широкого спектра загрязнителей, включая фармацевтические препараты, микропластик и перфторалкильные вещества. Особое значение приобретают интегрированные подходы, сочетающие физико-химические и биологические методы, что обеспечивает не только высокую степень очистки, но и возможность ресурсосбережения за счет генерации биогаза и рециклинга ценных компонентов. Однако несмотря на достигнутые успехи, перед отраслью остаются вызовы, связанные с необходимостью снижения энергозатрат, повышения экономической эффективности и обеспечения экологической безопасности новых технологий. Перспективным направлением развития является создание устойчивых систем водоочистки на основе инновационных катализаторов, наноматериалов и комбинированных процессов, адаптированных к изменяющемуся составу загрязнений и требованиям циркулярной экономики. Дальнейшие исследования в этой области должны быть направлены на интеграцию новых технологических решений в существующую инфраструктуру, оптимизацию эксплуатационных параметров и разработку универсальных платформ для мониторинга и управления качеством воды. Только комплексный подход, сочетающий научные достижения, инженерные инновации и экологическую ответственность, позволит обеспечить надежную защиту водных ресурсов и устойчивое развитие водохозяйственного комплекса в условиях глобальных вызовов.

Список литературы:

1. Wang J., Zhuan R. Degradation of antibiotics by advanced oxidation processes: An overview // *Science of the Total Environment*. 2020. Vol. 701. Article 135023. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2019.135023.
2. Miklos D.B., Remy C., Jekel M., Linden K.G., Drewes J.E., Hübner U. Evaluation of advanced oxidation processes for water and wastewater treatment - A critical review // *Water Research*. 2018. Vol. 139. P. 118-131. DOI: 10.1016/j.watres.2018.03.042.

3. Ganiyu S.O., Martínez-Huitle C.A., Oturan M.A. Heterogeneous electro-Fenton process using magnetic catalysts for wastewater treatment // *Applied Catalysis B: Environmental*. 2021. Vol. 283. Article 119623. DOI: 10.1016/j.apcatb.2020.119623.
4. Yang Y., Chen N., Feng C., Li M., Gao Y. Biochar-based catalysts for persulfate activation // *Chemical Engineering Journal*. 2019. Vol. 359. P. 1242-1252. DOI: 10.1016/j.cej.2018.11.013.
5. Shannon M.A., Bohn P.W., Elimelech M., Georgiadis J.G., Mariñas B.J., Mayes A.M. Science and technology for water purification in the coming decades // *Nature*. 2008. Vol. 452 (7185). P. 301-310. DOI: 10.1038/nature06599.