

Вода и естественные науки: Использование изотопов

*Применение стабильных
и радиоактивных
элементов для помощи
в выявлении и разрешении
гидрологических проблем*

Роберто Гонфиантини и Герт Хут



Ядерные методы с использованием изотопов являются точным и современным инструментом для изучения водных ресурсов. С их помощью можно получить адекватные ответы на вопросы об источниках, распределении и свойствах воды в данном регионе. Особенно когда они сочетаются с использованием всех других методов, имеющихся в распоряжении гидрологов, гидрогеологов и геохимиков.

Современные изотопные исследования в гидрологии базируются, с одной стороны, на открытии У.Ф. Либби в 1946 г. о распространенности углерода-14 и трития в природных средах, а с другой — на вышедшей в 1947 г. экспериментальной работе Х.К. Урей и Дж. Бигилейзена об эффектах фракционирования для стабильных изотопов. Хотя первые публикации распространенности изотопов в воде появились в течение нескольких лет после сделанного Либби открытия, только в 60-х годах изотопная гидрология превратилась в самостоятельную область исследований.

МАГАТЭ по совету многих известных ученых занялось работой в этой области вскоре после своего создания, тридцатилетие которого будет отмечаться в июне текущего года. По счастливому совпадению создание МАГАТЭ произошло в период быстрого прогресса в применении изотопных методов.

Г-да Хут и Гонфиантини — сотрудники Секции изотопной гидрологии Отдела физических и химических наук МАГАТЭ.

Фото наверху:

Большое внимание уделяется оценке водных ресурсов в засушливых странах. (Фото BRGH, Франция).

Эта деятельность нашла отражение в материалах семи симпозиумов по использованию изотопных методов в работе по развитию водных ресурсов, организованных Агентством, в ряде случаев в сотрудничестве с Организацией ООН по вопросам просвещения, науки и культуры (ЮНЕСКО). Первый симпозиум состоялся в 1963 г. в Токио, последний — в Вене с 30 марта по 3 апреля 1987 г., с участием более 160 ученых из 45 стран и трех международных организаций.

Искусственные и природные изотопы

Поведение идеального меченого изотопа в водной среде должно в наибольшей степени соответствовать поведению среды и в то же время он должен легко поддаваться обнаружению — по возможности, *in situ* — и без затруднений вводиться для изучения крупных регионов гидрогеологической системы.

Искусственные изотопы с гамма-излучением обладают некоторыми из этих свойств — они легко поддаются обнаружению, в то время как природные изотопы, измерение которых дается труднее, отличаются тем, что их введение в систему в целом осуществляется естественным путем.

Такие изотопы, как тритий, дейтерий и кислород-18 составляют часть молекулы воды и их поведение полностью или почти идентично поведению всей массы воды в системе.

Специфическая область изотопной гидрологии основана на взаимодействии излучения с веществом. Типичным примером является излучение от источника, поглощенного осадком, переносимым во взвешенном состоянии речной водой: поглощенное излучение пропорционально concentra-



Установка для получения трития в виде газа используется для аналитических работ по изотопной гидрологии в лаборатории в Вене. (Фото Католики для МАГАТЭ).

ции взвесей. Благодаря использованию этого метода была получена важная информация о переносе осадочных веществ.

За тридцать лет исследований и применения изотопов для изучения отдельных проблем было накоплено значительное количество информации и знаний. Поэтому опытный гидролог должен быть в состоянии отобрать изотопы и методы, наиболее подходящие для решения конкретной гидрологической проблемы. Например, искусственные изотопы вводятся в определенной точке гидрологической системы и контролируются в других обычно не очень далеко расположенных ее точках, где ожидается их появление. Время, прошедшее между введением и обнаружением, а также форма кривой, отражающей изотопную концентрацию в пунктах обнаружения, обеспечивают получение подробной и точной информации о поведении системы (в условиях, преобладающих в ходе экспериментов). Для правильного планирования эксперимента необходимо большое искусство.

В случае исследований с помощью природных изотопов ситуация иная. Независимо от того, используются ли изотопы непосредственно из окружающей среды или искусственные (или то и другое вместе), их распределение в гидрологическом цикле определяется естественными процессами. Поэтому их введение происходит по всей гидрологической системе постоянно или, по крайней мере, в течение длительного периода времени. Исследования с применением природных изотопов проводятся на больших водных площадях — реки, озера, грунтовые воды — и выводы делаются на базе анализа их основных долговременных характеристик. В

процессе работы с природными изотопами теоретическая база и интерпретация данных обычно представляют достаточную сложность и требуют значительного опыта и многостороннего подхода.

При изучении грунтовых вод в водоносных слоях с целью различить разные водные массы и определить источник поступления воды во многих случаях можно пользоваться данными о концентрации дейтерия и кислорода-18 (стабильные изотопы). Соответствующая концентрация стабильных изотопов определяется при инфильтрации дождевых осадков в районе пополнения водоносного горизонта. Иногда концентрация стабильных изотопов в водоносном слое может быть связана с инфильтрацией в различные климатические периоды.

Для определения в грунтовой воде соотношения дождевых осадков и речной воды может использоваться разница в содержании стабильных изотопов в воде рек, берущих начало в горах, и в местных осадках. Изменение содержания стабильных изотопов в стоячей воде озер часто используется для определения скорости испарения в конкретном озере.

Определение возраста воды

Большой интерес исследователей вызывает время нахождения воды в водоносном слое, так называемый „возраст” воды. Несколько радиоактивных изотопов — в зависимости от периода их полураспада — могут помочь ответить на вопрос о том, как давно рассматриваемая вода контактировала с атмосферой. Очень молодая грунтовая вода означает, что ее пополнение зависит от выпадения дождей и что засушливый сезон может вызвать дефицит грунтовой воды. Другая крайность, очень старая грунтовая вода может означать отсутствие пополнения и поэтому ее консервацию.

Тритий, радиоактивный изотоп водорода с периодом полураспада 12,43 года, присутствует в природной среде в очень низких концентрациях, порядка нескольких пикокюри на литр. Из-за термоядерных испытаний в 50-х и 60-х годах концентрация трития в осадках катастрофически повысилась, превысив в ряде случаев почти в 1000 раз естественные уровни. После заключения Договора о запрещении испытаний концентрации трития вернулись к значениям, которые в настоящее время почти равны тем, которые наблюдались до испытаний. Если этот тритиевый „сигнал” попадает в грунтовую воду, он используется для выяснения того, какой возраст имеет вода — „после- или добомбовый”.

Для определения возраста очень часто используется углерод-14, природный изотоп, имеющий период полураспада 5730 лет. Серьезная проблема состоит здесь в том, что атом углерода не является частью молекулы воды, а входит в состав иона двууглекислой соли (бикарбоната), растворенного в воде. В связи с этим должна приниматься в расчет химия воды.

Бикарбонат в грунтовой воде представляется состоящим из углерода двойного происхождения: одним его источником является гумус в почве, инфильтруемый с осадками, а другим — карбонат морского происхождения, попавший в водоносный слой и растворенный в грунтовой воде. Первый углерод содержит углерод-14, поскольку он находится в равновесии с двуокисью углерода, образующейся в почве в результате взаимодействия растений с воздухом и органических процессов; в карбонате же морского происхождения углерода-14 уже нет. Для определения возраста необходимо знать концентрацию углерода-14 в недавно инфильтрованной воде. Поэтому были разработаны несколько моделей для определения долей „нового” и „старого” углерода. В этих моделях, например, используется различие концентраций углерода в гумусе и в морском бикарбонате.

Период полураспада углерода-14 устанавливает предел определения возраста примерно в 50 000 лет. Концентрация углерода-14 в современном углероде уже настолько низка (10^{-12}), что измерения обычно ведутся путем расчета распадов. Спустя примерно 10 полураспадов и при концентрации углерода-14, составляющей одну тысячную концентрации в современном углероде, аналитический метод больше не обеспечивает требуемой точности.

Разработка методов использования ускорителей для масс-спектрометрии позволяет считать ионы углерода-14 непосредственно с помощью тандема ускорителей Ван де Графа, что в принципе обеспечивает возможность датирования возраста за указанным выше пределом с использованием для этого проб меньшего размера. Однако на практике машинное загрязнение ограничивает диапазон датирования примерно до тех же сроков, что и при расчете распадов.

Для расширения диапазона датирования должен быть найден другой изотоп с длительным периодом полураспада. Например, хлор-36 имеет период полураспада 305 000 лет. Гидро- и геохимия представлялись простыми. Однако концентрация хлора-36 настолько низка, что для ведения расчета распадов необходимо предварительно переработать колоссальные количества воды. Развитие ускорительной масс-спектрометрии улучшило ситуацию, поскольку ее применение требует намного меньше хлора. Результаты, полученные за последние примерно 5 лет показывают, что во многих случаях геохимия оказалась намного сложнее, чем ожидалось.

Однако в ряде случаев удалось получить обнадеживающие результаты. Примером может служить применение измерений хлора-36 в Австралийском большом водоносном горизонте. Дальнейшее развитие в этой области позволит в будущем исследовать большие водные массивы, такие как Континентал Интеркалэйр в Сахаре (около 600 000 кв. километров) или Ботакат в Бразилии (около 1 000 000 кв. километров).



Мария де Консейсао Рибейро Виейра, стипендиат из Португалии, во время прохождения учебного курса в лаборатории изотопной гидрологии в Вене. (Фото Католики для МАГАТЭ).

Поддержка и участие МАГАТЭ

Все виды применений изотопных методов в гидрологии поддерживались Агентством в течение всего времени его деятельности. Эта поддержка включала в себя предоставление услуг экспертов, оборудования и подготовки специалистов для проведения работ в полевых условиях, а также необходимую аналитическую работу непосредственно в заинтересованной стране. Однако только ограниченное число стран располагает возможностями для проведения лабораторных анализов, необходимых при использовании методов, связанных с применением природных изотопов. В таких случаях анализы проводятся в лаборатории изотопной гидрологии МАГАТЭ в Вене. Агентство поощряет также разработку новых методов и совершенствование уже используемых путем улучшения методики анализа и применения более глубоких теоретических подходов к интерпретации данных.

Примеры деятельности Агентства в этой области достаточно многочисленны. Некоторые из наиболее важных работ осуществлялись в последние годы или ведутся в настоящее время.

● *Северная Африка.* В начале 80-х годов Программа развития ООН (ПРООН) приступила к осуществлению проекта в трех странах Магриба в Северной Африке — Алжире, Марокко и Тунисе — с целью оценки водных ресурсов, особенно запа-

сов грунтовых вод, поскольку эти страны расположены, в основном, в засушливых или полувасушливых районах. Кроме того, часть программы работ была посвящена методам увеличения водных ресурсов: например, осуществлению инженерных мер, направленных на пополнение грунтовых вод; очистке и повторному использованию бывшей в употреблении воды; оценке эрозии земель и связанному с ней переносу взвешенных осадочных пород, который может значительно сократить сроки функционирования искусственных водоемов. В связи с этим проектом Агентство приняло решение об осуществлении параллельного регионального проекта в тех же трех странах по применению изотопных методов для изучения некоторых из этих проблем с использованием важных элементов инфраструктуры, созданной в рамках проекта ПРООН. Это было выгодно для обеих сторон. Исследования проводились в Тунисской и Алжирской Сахаре с целью определения возраста и динамики движения грунтовых вод в двух крупных водоносных горизонтах — Континентал Интеркальйр и Комплекс Терминал, что в принципе может принести пользу при создании математических моделей и планировании работ по эксплуатации этих водных массивов. Принимая во внимание очень старый возраст грунтовой воды, которая пополнялась более 30000 лет назад в период плейстоцена, в настоящее время планируется использование хлора-36 для определения ее возраста.

В долине реки Вади Н'Фис недалеко от Маракеша были применены искусственные изотопы с целью исследования движения воды в экспериментальном инфильтрационном резервуаре для пополнения грунтовых вод. Эти исследования показали, что декантирование и осаждение взвесей в первом резервуаре проходило недостаточно эффективно из-за краткости периодов водной циркуляции. Конфигурация первого резервуара была затем соответственно изменена, с тем чтобы осаждение взвешенных частиц происходило именно в нем, а не в последующих резервуарах, что привело к уменьшению скорости инфильтрации.

На участке около г. Туниса обогащенная тритием вода была повторно введена в циркуляцию вместе с водой, бывшей в употреблении, с целью проверки эффективности фильтрующих свойств почвы и путей распространения повторно введенной воды в водоносном слое. Исследование еще не завершено, но полученные к настоящему времени результаты подтвердили в достаточной степени действенность этого метода и, в первую очередь, эффективность трития как идеальной метки для воды.

● *Азия и Тихий океан.* В ряде стран и регионов осуществляются программы координированных исследований, финансируемые государствами-членами и выполняемые Агентством. Одна такая программа для района Азии и Тихого океана, финансируемая Австралией, включает в себя исследовательские проекты в Индонезии, Малайзии, Таиланде, Шри

Ланке и Юж. Корее. Эта программа завершится в этом году учебными курсами в КНР.

● *Латинская Америка.* Другая координированная исследовательская программа, финансируемая Федеративной Республикой Германии, направлена на активизацию использования изотопных методов в области гидрологии в Латинской Америке. В программе участвуют 10 стран — Аргентина, Боливия, Бразилия, Гватемала, Доминиканская Республика, Колумбия, Куба, Мексика, Чили и Эквадор. Она завершится в 1987 г. семинаром в Мехико. Еще одна программа, финансируемая Италией, имеет целью продемонстрировать потенциальные возможности изотопных и геохимических методов для изучения геотермальных источников. Она также осуществляется в Латинской Америке. Участниками программы являются Аргентина, Боливия, Венесуэла, Гватемала, Колумбия, Коста Рика, Перу и Эквадор. Большинство латиноамериканских стран имеют значительные геотермальные ресурсы, которые до сих пор используются только в Мексике и Сальвадоре. Мексика, которая скоро станет участником программы, сегодня занимает третье место в мире по производству геотермальной электроэнергии, вслед за Соединенными Штатами и Филиппинами, опережая Италию*.

Водные ресурсы в засушливых странах

Специальное внимание уделяется оценке ресурсов грунтовых вод в засушливых странах. Изотопы являются фактически одним из важнейших средств исследования источников пополнения грунтовых вод и выявления ископаемой грунтовой воды — т.е. воды, которая пополнялась в прошлом при более влажных климатических условиях**. При поддержке Агентства были проведены исследования во многих засушливых странах в Африке и Азии. Недавно началось осуществление двух региональных проектов, одного в трех западноафриканских странах — Мали, Нигере и Сенегале — и другого в восточной Африке — Египте и Судане. Второй проект финансируется Федеративной Республикой Германии.

Подготовка специалистов

Этот вид деятельности также пользуется активной поддержкой Агентства. В этом году впервые было организовано групповое обучение силами Секции изотопной гидрологии в виде лекций, лабораторных занятий и участия в научной работе по проекту в полевых условиях. В этом учебном эксперименте участвуют стипендиаты из Албании, Египта, Индонезии, Иордании, Кипра, Колумбии, Португалии, Судана и Филиппин. В случае успеха, он будет повторен в целях более широкого охвата стипендиатов.

* См. „Изотопы в исследовании геотермальной энергии”, Бюллетень МАГАТЭ, т. 25, № 2 (1983 г.)

** См. „Исследование водных ресурсов пустыни. Как могут помочь изотопы”. Бюллетень МАГАТЭ, т. 23, № 1 (1981 г.)

СИМПОЗИУМ ПО ПРОБЛЕМАМ ВОДЫ ВЫЗЫВАЕТ БОЛЬШОЙ ИНТЕРЕС

Потребление воды значительно возросло за последние десятилетия, и потребность в воде продолжает расти одновременно с ростом населения Земли и увеличением сельскохозяйственных и промышленных нужд. Поэтому нет ничего удивительного в повышении значения тщательной оценки водных запасов. Для решения практических проблем гидрологи, геохимики и другие ученые все больше используют как стабильные, так и радиоактивные изотопы в качестве полезных, иногда уникальных инструментов исследования водоносных слоев, озер, резервуаров, рек и эстуариев. Изотопы — природные и искусственные — используются в качестве меток для изучения свойств и характеристик воды и для оценки перспектив водоснабжения при различных климатических и географических условиях. Они также применяются для изучения движения воды и отложений, засоления и загрязнения. Важными изотопами для гидрологических исследований являются дейтерий (водород-2) и кислород-18, оба стабильные, а также тритий (водород-3) и углерод-14, оба радиоактивные.

На международном симпозиуме в Вене с 30 марта по 3 апреля 1987 г. более 160 ученых и исследователей из 45 стран и трех международных организаций

обсуждали использование ядерных и других подобных методов в гидрологических исследованиях. На симпозиуме, который был организован совместно МАГАТЭ и Организацией Объединенных Наций по вопросам образования, науки и культуры (ЮНЕСКО), были представлены отчеты и доклады об исследованиях и работах в полевых условиях, ведущихся в более чем 30 странах Африки, Европы, Латинской Америки и других регионов. Симпозиум был седьмым в серии подобных совещаний, которые проводятся с 1963 г. под эгидой МАГАТЭ для развития обмена научной информацией и результатами исследований в этой важной области. Своими программами технической помощи, исследовательскими контрактами и т.п. Агентство представляет прямую финансовую поддержку и помощь экспертов для гидрологических проектов во всем мире. Сотрудничество с ЮНЕСКО было установлено в рамках международной гидрологической программы, которая направлена на помощь развивающимся странам в эффективном применении методов и приборов для разрешения локальных и региональных гидрологических проблем.

Отсчет о симпозиуме будет опубликован позже.