

Искусственные радиоизотопы в гидрологических исследованиях

Обзор конкретных видов их применения

Антонио Плата-Бедмар

Искусственные радиоизотопы уже более 30 лет помогают изучению гидрологических проблем. За этот период времени был получен большой объем информации, и мы теперь в состоянии дать оценку значимости радиационных методов и их возможностей в будущем. Гидрологические проблемы часто очень сложны, и для их изучения используются различные методы. Ни один из разработанных методов не следует отвергать *априори*. Это относится и к радиоизотопным методам, имеющим в данной области вспомогательное, но большое значение.

Радиоизотопы используются в гидрологии в двух видах: как герметизированные источники радиации и как индикаторы.

Радиоактивные герметизированные источники

Для конкретных гидрологических целей разработаны различного типа приборы с радиоактивными герметизированными источниками. Функционирование этих приборов основано на взаимодействии радиации с веществом, в результате которого появляется информация о твердой среде, имеющей отношение к водному течению. Наибольшее значение имеют следующие методы:

● **Измерение концентрации осадочных пород, переносимых течением рек во взвешенном состоянии.** Такой перенос составляет более 75% от общего количества переносимых реками твердых веществ и зачастую создает проблемы большого экономического значения, например, проблему существования искусственных водохранилищ. Известные обычные методы не позволяют найти нужное решение. Для этих целей были разработаны несколько ядерных приборов с америцием-241 и цезием-137. Концентрация осадочных пород стала измеряться как автоматически в течение длительных периодов

Г-н Плата-Бедмар — сотрудник Отдела физических и химических наук МАГАТЭ.

Фото сверху: Измерение скорости течения грунтовых вод в Никарагуа методом разбавления.



времени (с помощью стационарных приборов), так и вручную (с помощью портативных приборов). Требуется дальнейшая разработка стационарных приборов в целях улучшения их рабочих характеристик и надежности, а также уменьшения их стоимости.

● **Измерение толщины и плотности отложений.** Этот метод представляет интерес с точки зрения поддержания в порядке навигационных проходов в гаванях и в эстуариях (дноуглубительные работы), а также кольматажа водохранилищ, особенно в засушливых и тропических районах, в которых наблюдаются наибольшие уровни переносимых осадочных пород. Ни один обычный метод не может дать той информации, которую предоставляют приборы. Некоторые ядерные приборы, поступающие на рынок, позволяют получить профили отложений. Изменение во времени этих профилей дает представление о динамике осадения. Требуется дальнейшие разработки в целях совершенствования техники измерения в неблагоприятных полевых условиях.

● **Рентгеновский флуоресцентный анализ осадочных пород.** Для определения рентгеновской характеристики тяжелых элементов ($Z > 20$), содержащихся в образцах осадочных пород, используются радиоактивные гамма-источники. Достигается идентификация и полуколичественный анализ таких элементов. Комбинированное применение этих и других аналитических методов, например, активационного анализа, делает возможной идентификацию происхождения переносимых реками осадочных пород.

● **Методы каротажа скважины.** Метод гамма-каротажа получил широкое распространение и применяется в гидрологических и геологических исследованиях. Этот метод позволяет идентифицировать слой глины, что очень важно для получения профилей проницаемости в аллювиальных и коллювиальных водоносных пластах, а также заполняемые глиной трещины в случае нахождения водоносных пластов в трещиноватых породах. С другой стороны, методы нейтрон-нейтронного и гамма-гамма-каротажа используются, главным образом, в связи

с изучением проблем ирригации и инфильтрационных процессов в ненасыщенной зоне, особенно увеличивающейся в засушливых районах. Нейтрон-нейтронный метод позволяет получить профили содержания воды в почве, соответствующие профилям пористости в насыщенной зоне. С помощью гамма-гамма метода получают профили концентрации влаги в формации, на основе которых можно определить пористость насыщенной зоны. Необходимость в буровых скважинах специальной конструкции существенно ограничивает применение этих методов в гидрологических целях.

Радиоактивные индикаторы

Гидрологические проблемы, для изучения которых применяются методы с искусственными индикаторами, имеются во всех странах мира. Многие из этих проблем могут изучаться только с помощью радиоактивных индикаторов. Необходи-

мость в индикаторах является следствием главным образом широкой изменчивости во времени и пространстве соответствующих параметров водных систем. Эта изменчивость часто затрудняет получение надежных данных о параметрах, определяющих поведение воды в исследуемой системе, особенно когда необходима абсолютно точная информация. В этих случаях применение индикаторов становится единственно возможным выходом.

● **Мечение осадочных пород.** Изучение проблем переноса осадочных пород водным течением с помощью их мечения можно считать хорошо отработанным методом. Взвешенные осадочные породы можно легко метить золотом-198, железом-59 или гафнием-181 и изучать с их помощью отложение осадочных пород. Данный метод применим в исследованиях отложений в гаванях, эстуариях водохранилищах и инфильтрационных водоемах для искусственного всасывания воды.

Типичные виды применения индикаторов

Ниже говорится о наиболее важных и типичных видах применения искусственных радиоактивных индикаторов. Следует отметить, что для получения необходимой информации зачастую они должны применяться в сочетании с другими методами (природные изотопы, гидрохимия, другие обычные гидрологические методы).

Поверхностные воды

● Измерения скорости течения в реках и открытых каналах. Многие требования к измерениям скорости течения могут быть удовлетворены только с помощью методов меченых атомов. Меченые атомы – наиболее подходящее средство измерения больших скоростей течения порядка 50–1000 м³/с. Для меньших скоростей течения с успехом могут применяться нерадиоактивные индикаторы. Примерами их типичного применения являются калибровка турбин гидроэлектростанций и калибровка гидрометрических станций.

● Изучение дисперсности в реках, озерах, эстуариях и морях, связанное, главным образом, с проблемами загрязнения воды. Полученные в результате экспериментов коэффициенты рассеяния используются для уточнения математических и гидравлических моделей.

● Измерения времени пребывания и характеристика смешивания в озерах.

● Динамика бассейнов рек, включая определение времени перемещения воды. Природные индикаторы (например, стабильные изотопы воды) могут помочь в этих исследованиях.

● Проблемы, связанные с использованием воды в ирригационных целях, включая потерю воды в каналах, идентификацию и оценку возвратных стоков; частичное восполнение за счет различных других источников.

● Мечение загрязненной воды для изучения способности различных образований поверхностных вод к самоочищению.

● Связь с грунтовой водой (фильтрация поверхностных вод); для этих исследований природные изотопы зачастую также являются основным инструментом.

Грунтовые воды

● Исследования инфильтрации в ненасыщенных зонах. Для этих исследований применим только искусственный тритий. Информация собирается через вертикальные профили вводимого трития, который измеряется с различными интервалами.

● Определение параметров водоносных пластов с помощью одно- и многоскважинных испытаний методом меченых атомов, включая определение скорости течения с использованием метода точечного разбавления и времени перемещения; идентификация и измерение вертикального потока в скважинах; определение направления течения грунтовых вод; определение эффективной пористости и проницаемости в сочетании с испытаниями на перекачивание; определение коэффициентов рассеяния водоносных пластов; распределение трещин (вертикальные профили) в трещиноватых водоносных пластах.

● Изучение динамики карстовых систем.

● Многие местные и региональные проблемы динамики карстовых систем могут исследоваться только с помощью искусственных индикаторов. Как правило, индикатор вводится в определенную часть системы и измеряется в тех местах, в которых предполагается его появление. За последние 30 лет проведено много таких экспериментов с использованием флуоресцирующих и радиоактивных индикаторов. Помимо определения характера водотока можно также получить полуколичественную информацию об объемах грунтовых вод.

● Мечение геотермальных вод, повторно вводимых в геотермальное поле после их использования. Исследуется поведение реинжектируемой жидкости.

● Мечение инжектируемой в водоносные пласты воды при искусственных процессах пополнения грунтовых вод. Изучается динамичное поведение инжектируемой воды, включая ее смешение с основной водой. Кроме того, используемые методы дают информацию о химической эволюции инжектируемой воды (это важно, если мы имеем дело со сточными водами) и о некоторых гидрологических параметрах водоносного пласта (общая пористость, скорость естественного течения грунтовых вод и дисперсность).



Исследование инфильтрации
плотины на водохранилище
Магуака в Доминиканской
Республике.

Значительный опыт приобретен в применении искусственных радиоактивных индикаторов для определения смещения донных наносов в реках и морях. Для мечения осадочных пород имеются такие радионуклиды, как скандий-46, лантан-барий-14, серебро-110m, золото-198, иридий-192 и цирконий-ниодимий-95. В случае тонких осадочных пород используется обычно радиоактивное стекло (скандий-46).

Можно получить и количественную, и качественную информацию. Когда речь идет о дне рек, то определяется перенос массы осадочных пород, хотя большая изменчивость размеров частиц затрудняет проведение исследований. В отношении моря метод больше подходит для изучения локальных проблем, например, проблем проведения дноуглубительных работ (определение мест сброса) или защиты морского берега.

● **Мечение воды.** Применение искусственных индикаторов для изучения водного потока началось более 2000 лет тому назад. Для мечения воды ранее использовались многие нерадиоактивные индикаторы, а в настоящее время большую роль играют флуоресцирующие и красящие вещества, в меньшей степени ионные химикалии, споры ликопоидия и некоторые бактерии. За последние 30 лет применялись также искусственные радионуклиды, из них наиболее часто – йод-131, бром-82, хром-51, кобальт-58, золото-198 и тритий.

Сравнение радиоактивных индикаторов с нерадиоактивными показывает, что к преимуществам меченых атомов относятся ограниченное время их жизни (не происходит постоянного загрязнения воды), детектирование *in-situ* для гамма-излучателей (необходимое для некоторых видов применения), высокая чувствительность детектирования (мечение больших объемов воды с помощью небольших количеств индикаторов) и лучшая стабильность (возможность использования в очень загрязненной

воде и в случаях больших концентраций осадочных пород).

К отрицательным моментам можно отнести необходимость получения санкции на их использование, трудности с приобретением (короткоживущие индикаторы не могут храниться) и опасность обращения с ними.

Особое внимание должно уделяться тритию в связи с тем, что он единственный известный изотопный искусственный индикатор для воды (этот индикатор включается в молекулу воды). Для многих экспериментов с индикаторами тритий единственно подходящий, несмотря на то, что он является долгоживущим (12,43 года), а также чистым бета-излучателем (который невозможно обнаружить *in-situ*). Что касается мечения грунтовых вод, то только тритий ведет себя так же, как вода, и дает надежную количественную информацию. Кроме того, искусственный тритий недорог, удобен в обращении (практически без всякого риска) и обнаружим без обогащения при концентрации 0,2 микрокюри на кубический метр (0,003 микрокюри на кубический метр после электролитического обогащения).

Типичные виды применения

Две основные характеристики экспериментов с искусственными индикаторами определяют те проблемы, для решения которых требуются эти индикаторы: 1) объем воды, в который могут быть введены меченые атомы, ограничен и часто представляет лишь небольшую часть общего ее объема в водной системе; 2) время на проведение эксперимента обычно также ограничено и определяется динамикой изучаемой водной системы. Очень редки эксперименты продолжительностью более одного года.

По этим причинам с помощью искусственных индикаторов чаще всего решаются следующие проблемы:

●Проблемы водных систем с очень быстрым течением (большинство систем поверхностных вод и многие системы грунтовых вод в трещиноватых породах).

●Локальные проблемы, касающиеся небольших площадей (не более нескольких квадратных километров), когда требуется точная и исчерпывающая гидрологическая информация. Такая необходимость возникает в отношении многих гидрологических проблем, связанных с гражданским строительством.

●Локальные эксперименты с крупными водными системами, имеющие целью получить общую информацию, пригодную для всей системы на основе интеграции точечных данных.

Гражданское строительство

Искусственные меченые атомы — важное средство для изучения многих проблем гражданского строительства, связанных с водой. Обычно требуются интегрированные исследования с применением различных методов. Например, проблема фильтрации воды в водохранилищах и озерах. Для таких исследований специально разрабатывались многие индикаторные методы. Сюда относятся: эксперименты по изучению взаимосвязи водохранилищ с водами нижнего бьефа; применение индикаторов, абсорбируемых на дне водохранилищ для определения зон инфильтрации воды; приборы для локализации зон инфильтрации на дне на основе измерений направления течений; манометры для измерения скорости инфильтрации в данной точке на дне водохранилища; методы единой скважины для обнаружения течения грунтовых вод через смежные формации.

Некоторые методы с искусственными индикаторами применимы в изучении пригодности площадок для строительства плотин с целью прогнозирования фильтрации воды. Аналогичные исследования могут проводиться также в связи, например, со строительством туннелей или фундаментов крупных строений и мостов.

Затопление шахт

В прошлом проводились многочисленные исследования с применением всех видов искусственных индикаторов для получения информации о происхождении и путях движения вод, проникающих в шахты. В этой области необходимы комплексные исследования с использованием различных методов. Искусственные индикаторы вместе с природными изотопами призваны играть основную роль в таких исследованиях, особенно если вода посту-

пает из различных источников. Чаще всего изучается связь поверхностных вод с водой в шахтах. Но проводятся также исследования с целью определения водных потоков, направляющихся к шахте, и обеспечения откачивания воды до ее проникновения в шахту.

Деятельность МАГАТЭ

МАГАТЭ в течение длительного времени поддерживает применение ядерных методов в этой области. За 30 лет Агентство обеспечило осуществление многих проектов технического сотрудничества и исследовательских контрактов, которые охватывают почти все упомянутые здесь проблемы.

В настоящее время МАГАТЭ оказывает поддержку нескольким исследованиям с использованием искусственных радиоизотопов. Проекты, которыми предусматриваются эти исследования, касаются загрязнения воды озера в Гватемале, поливных вод в Румынии, переноса и отложения осадочных пород в Юго-Восточной Азии и Бразилии, фильтрации озер и плотин в Чили и Доминиканской Республике, затопления шахт и загрязнения грунтовых вод в Никарагуа и дисперсности течений в эстуариях в связи с загрязнением воды в Аргентине (только консультативные услуги).

Будущее ядерных методов

Приобретенный за 30 лет опыт показывает, что применение искусственных радионуклидов в изучении гидрологических проблем очень полезно. К сожалению, имеются трудности в таком применении, связанные с установленными во многих странах ограничениями в использовании радиоактивных веществ. Вопросы применения ядерных методов решаются обычно ядерными организациями, пока нет никакой возможности передать эти вопросы в ведение организаций, имеющих непосредственное отношение к гидрологическим исследованиям. Сотрудничество же между указанными организациями не всегда оказывается удовлетворительным. Есть страны, где применение искусственных радионуклидов в гидрологических исследованиях категорически запрещено.

Вместе с тем опыт показывает, что применение данной технологии не влечет за собой никакой опасности для населения или она очень мала. Тем не менее, действующее во многих странах ядерное законодательство вводит слишком строгие ограничения, устанавливаемые с учетом тех областей ядерной деятельности, в которых степень риска совершенно другая. Конкретные правила использования радиоактивных веществ в изучении окружающей среды на основе оценки реальной опасности способствовали бы развитию данной технологии.

