

Ядерные методы исследования миграции загрязнителей в грунтовых водах

Отчет о практическом применении изотопов в целях предупреждения загрязнения водных ресурсов

В.Т. Дубинчук, А. Плата-Бедмар и К. Фрелих

В последние годы проблеме защиты ресурсов грунтовых вод от загрязнения придается первоочередное значение.

Природа защитила грунтовые воды, которые обычно чище поверхностных вод, с помощью прекрасной фильтрационной системы. Эта система включает в себя почву, глину и частицы твердой породы, которые задерживают некоторые растворенные вещества, взвешенные частицы, бактерии и, в значительной степени, вирусы.

Несмотря на это, загрязнение водного горизонта может все же произойти, если эта фильтрующая система будет перегружена или обойдена. Те же самые загрязнители, которые влияют на поверхностные воды, включая бытовые и промышленные стоки и отходы, протечки из септиков, шахтный дренаж, санитарные свалки и сельскохозяйственные ядохимикаты, могут оказать на грунтовые воды значительно более сильное и продолжительное воздействие. Загрязнители остаются в водоносных горизонтах в течение нескольких сот – десятков тысяч лет, ставя тем самым под угрозу водоснабжение будущих поколений.

В некоторых районах водоносные горизонты менее подвержены загрязнению, чем в других, благодаря своим геологическим и гидрохимическим условиям, ограничивающим этот риск. Чувствительность качества грунтовых вод к приводящей к загрязнению человеческой деятельности называется „подверженностью водоносного горизонта загрязнению“. На подверженность водоносного горизонта влияет целый ряд процессов, а также характеристик почвы и водоносного горизонта. Определение параметров, характеризующих эти процессы, играет очень важную роль в моделировании и прогнозировании миграции загрязнителей в системах грунтовых вод. Основные цели заклю-

чаются в предупреждении загрязнения и деградации ресурсов грунтовых вод или в идентификации его источников, что даст возможность предложить меры по борьбе с таким загрязнением.

В этой сфере МАГАТЭ уделяет основное внимание практическому применению ядерных и изотопных методов, непосредственно или косвенно связанных с решением проблем загрязнения подземных вод. В данной статье описываются пути практического применения некоторых из этих методов.

Миграция загрязнителей

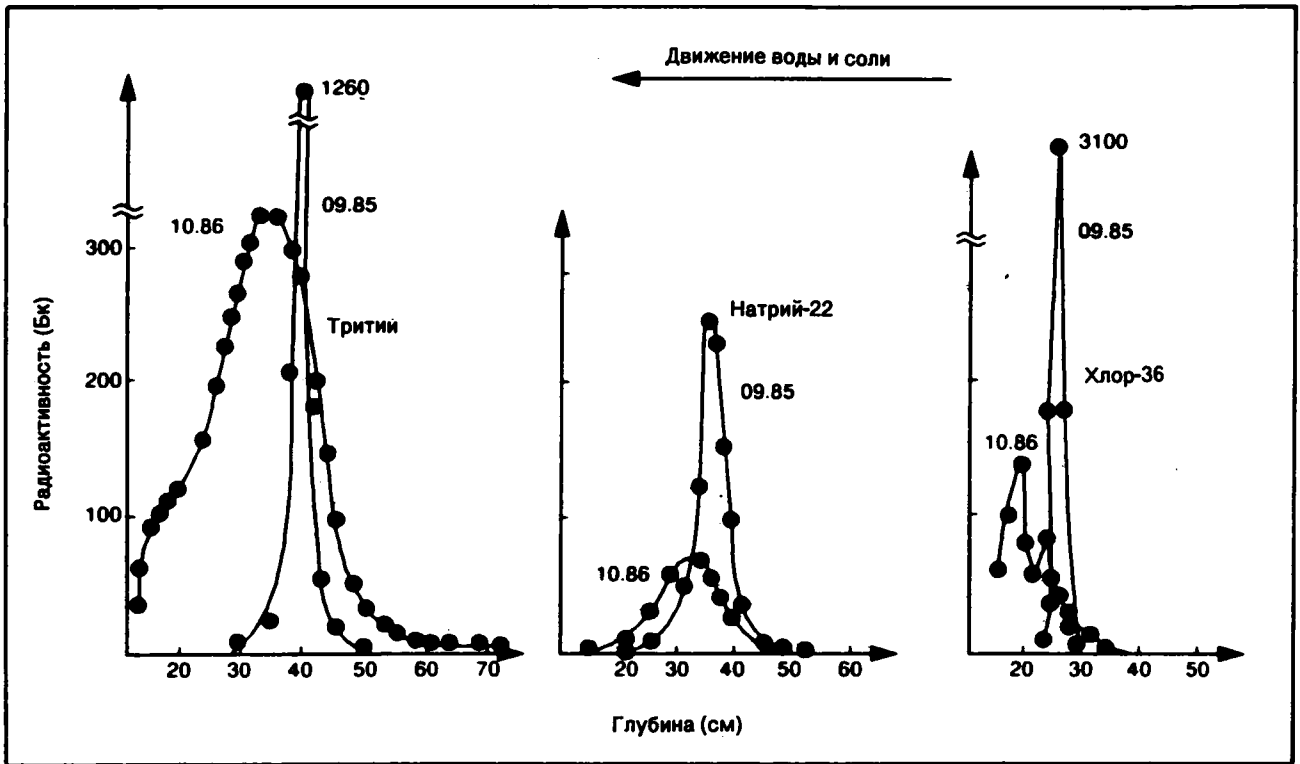
Ненасыщенная зона (аэрации) является тонкой „кожей“ геологических формаций, проникая через которую загрязнители начинают свой путь от поверхности земли к приповерхностным водоносным горизонтам. Для изучения скорости движения подземных вод и загрязнителей в почве требуются специальные приборы. В рамках некоторых национальных и международных программ, включая финансируемые МАГАТЭ проекты, был проведен и еще проводится целый ряд исследований с использованием таких приборов и радиоизотопных индикаторов.

Например, в Крымской области в 1985–1986 гг. были проведены исследования засоления грунтовых вод. В районе Чернобыля исследования направлены на изучение миграции радионуклидов, выброс которых произошел в 1986 г. после аварии на Чернобыльской АЭС.*

*Оба этих исследования проводились В.Т. Дубинчуком, Ю.А. Цаленко, А.В. Бородиным и А.В. Гладковым, являющимися научными сотрудниками Всесоюзного научно-исследовательского института гидрологии и технической геологии, Москва.

Г-да Дубинчук, Плата-Бедмар и Фрелих являются сотрудниками Отдела физических и химических наук МАГАТЭ.

Рис. 1. Эксперимент с применением метода тройного мечения в Крыму.



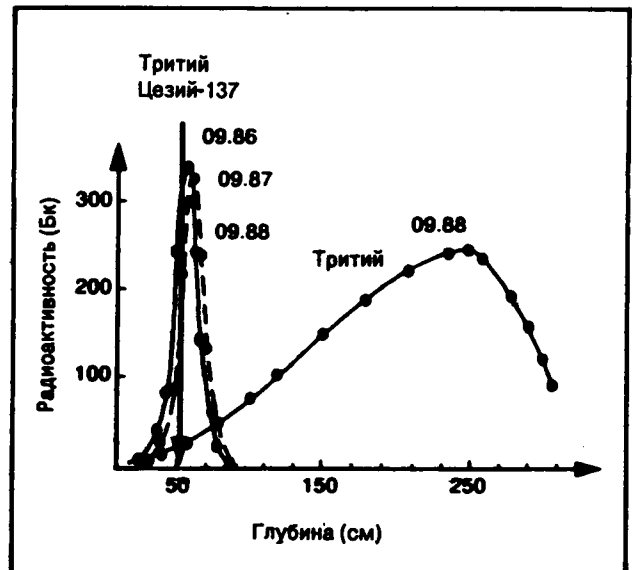
В обоих случаях был оборудован целый ряд площадок, на которых проводились сложные исследования с применением радиоизотопных индикаторов. На этих площадках насыщенная тритием вода инжестировалась в землю для изучения процесса ее пространственного и временного перераспределения в почве. Все это делалось для измерения скорости движения грунтовых вод в ненасыщенной зоне и для оценки времени пребывания (или возраста) грунтовых вод, а также скорости пополнения их запасов в приповерхностных водоносных горизонтах. Одновременно с этим на тех же самых площадках инжестировались меченные изотопами загрязняющие вещества и осуществлялось наблюдение за их передвижением.

Результаты, полученные в Крыму, в Джанкое, указывают на подъем солей. Это происходит за счет очень сильного суммарного испарения и неглубокого залегания водного зеркала. (См. рис. 1.) Эксперимент проводился с использованием метода тройного мечения (насыщенный тритием водный раствор хлорида натрия, меченный радиоактивными изотопами натрий-22 и хлор-36).

Однако на других площадках, расположенных около очень мощных зон аэрации, аналогичные эксперименты указали на движение солей вглубь земли. В ходе этого эксперимента были получены очень полезные данные о переносе вод, а также ионов натрия и хлора *in situ*. Такие данные позволяют лучше понять механизмы и динамику засоления почвы, что имеет особенно важное сельскохозяйственное значение.

В районе Чернобыля проводился эксперимент с применением метода двойного мечения (насыщенная тритием вода и раствор хлорида цезия, меченный цезием-137). Закачки осуществлялись одновременно на определенные глубины для получения прогнозной информации. (См. рис. 2.) Результаты

Рис. 2. Результаты эксперимента с двойным мечением вблизи Чернобыля.



совершенно четко указывают на задержку и дисперсию цезия в воде, что, в свою очередь, позволяет провести более точную оценку риска загрязнения грунтовых вод этим радионуклидом.

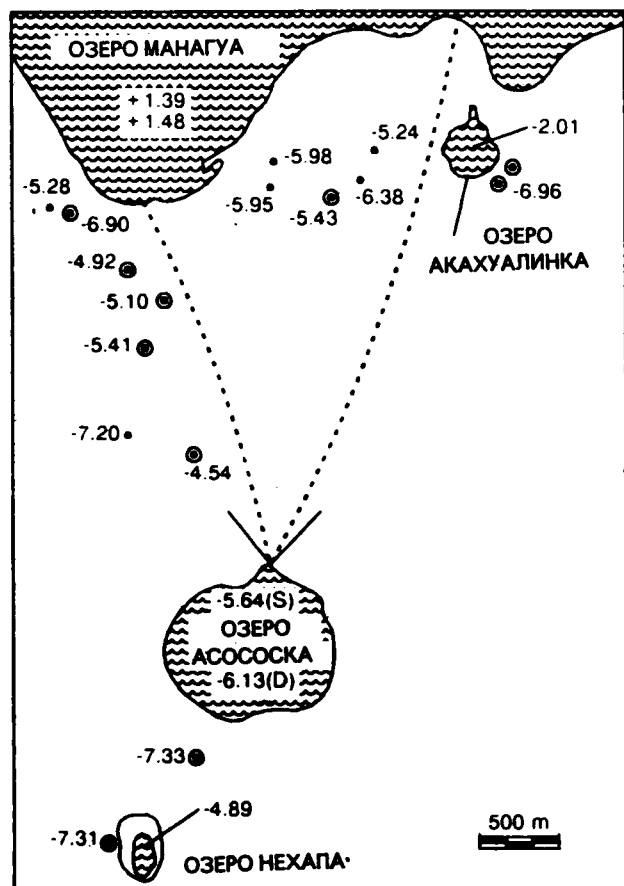
Вторжение загрязненных вод

Типичной проблемой водоустройства является вторжение загрязненных вод в грунтовые воды из природных и искусственных озер, потоков или водохранилищ.

В Никарагуа, недалеко от Манагуа, в рамках проекта технического сотрудничества МАГАТЭ проводятся исследования вторжения загрязненных вод. Данные исследования основываются на комплексном применении природных изотопов (радиоактивных и стабильных) и искусственных радиоизотопных индикаторов.

На озере Асососка в Манагуа расположена одна из четырех основных водонасосных станций, поставляющая 60 % воды для местного населения. Воды озера очень сильно загрязнены. (См. рис. 3.)

Рис. 3. Изотопные исследования вторжения загрязнителей в Никарагуа.



Примечание. Данные по кислороду-18 представлены в тысячных долях отклонения от стандарта V-SMOW.

Максимальная глубина озера Асососка, образовавшегося в кратере потухшего вулкана, составляет около 90 метров, а его диаметр – примерно один километр. Оно подпитывается грунтовыми водами, поступающими из озера Манагуа. Водные зеркала в районе четырех водонасосных станций находятся ниже уровня воды в озере Манагуа из-за очень интенсивного водозабора в течение прошлых десятилетий. Это позволяет загрязненным водам озера Манагуа проникать в грунтовые воды и озеро Асососка.

Для проверки такой вероятности было проведено исследование с целью измерения скорости потока грунтовых вод и определения характеристик воды. В рамках исследования изучалось и анализировалось поведение природных изотопов (тритий, дейтерий и кислород-18) и химический состав воды, а также проводились эксперименты с использованием искусственных радиоизотопных индикаторов.

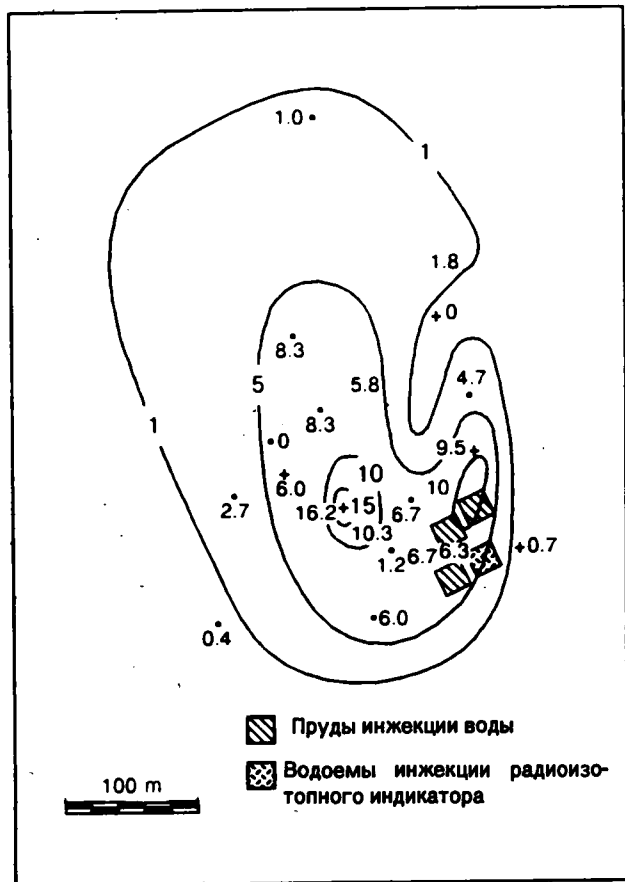
Полученные результаты указывают на отсутствие вторжения подпадающих обнаружению значительных объемов загрязненных вод. Исследования выявили сильные различия в изотопном составе между водами озера Манагуа и грунтовыми водами. Более того, было установлено, что закачиваемая из озера Асососка вода имеет относительно большой возраст. К такому выводу можно было прийти из-за отсутствия в воде подпадающих измерению количеств трития. (В силу того, что тритий попал в атмосферу в 1952–1962 гг. в результате испытаний ядерного оружия, его можно использовать для датирования водных ресурсов и идентификации современных темпов подпитки за счет инфильтрации дождевых осадков.) Кроме того, вода озера Асососка имеет такой же изотопный состав, что и глубинные грунтовые воды. На основании информации об изотопном составе можно сказать, что любое потенциальное вторжение загрязненных вод озера Манагуа в результате изменения гидродинамического режима будет обнаружено заблаговременно.

Искусственная подпитка сточными водами

В Тунисе был реализован проект изучения искусственной подпитки алювиального прибрежного водоносного горизонта в районе Набуль-Хаммамед сточными водами. Данный водоносный горизонт практически истощен и стал непригоден для дальнейшего использования в результате интенсивного водозабора и засоления. Меченная тритием питательная вода использовалась для изучения способности водоносного горизонта к самоочищению в течение длительного периода времени (14 месяцев) и процессов смешивания более старых и более молодых водных ресурсов.

В рамках этих исследований свыше 32000 куб. метров сточных вод были помечены радиоизотопным индикатором со средней концентрацией 1,2 Кбк/л путем непрерывной инъекции радиоизотопного индикатора в течение 42 дней. Пространственное распределение меченой воды через 394 дня после начала эксперимента указывает на динамичное движение воды. (См. рис. 4.) Полученная информация позволит лучше планировать будущие широкомасштабные проекты искусственной подпит-

Рис. 4. Изотопное исследование подпитки сточными водами в Тунисе (изолинии трития).



Примечание. Изолинии трития показывают содержание в $\mu\text{Ci}/\text{m}^3$.

ки сточными водами для их использования в ирригационных целях. Цитрусовые, рис и овощи являются основными сельскохозяйственными культурами этого района. Был сделан вывод о необходимости смешения сточных вод с другими водами, что позволит использовать воды подпитки в ирригационных целях.

Некоторые преимущества и проблемы

Радиоизотопные индикаторы позволяют „взглянуть” на то, что происходит с мечеными загрязнителями (а также с любыми другими мечеными компонентами воды) при их контакте с твердой материнской породой, почвенной основой или взвешенными частицами, отложениями или суспензиями. Можно проследить любой этап движения, преобразования и взаимодействия загрязнителя в геологической среде.

Более того, радиоизотопные индикаторы можно использовать в чрезвычайно низких с химической точки зрения концентрациях и не нарушать, тем самым, физико-химические и термодинамические режимы исследуемой системы. Незначительные количества радиоизотопных индикаторов не поддаются измерению и обнаружению с помощью обычных приборов.

И, в заключение, эксперименты с использованием меченых атомов можно проводить с помощью методов неразрушающего анализа. Например, процессы диффузии и сорбции можно наблюдать в лабораторных экспериментах с использованием колонок, не разрушая при этом пробы почв и пород. В полевых условиях аналогичные тесты можно легко провести, применяя гамма-индикаторы и гамма-картаж.

Однако в области применения методов радиоизотопных индикаторов существуют некоторые проблемы и ограничения, в результате которых в районах проведения исследований миграции загрязнителей научный акцент смещается с проблемы разработки и усовершенствования конкретных методов применения радиоизотопных индикаторов на их комплексное использование в сочетании с традиционными методами. Это делается в целях получения информации, необходимой для проведения соответствующего прогноза и предложения контрмер.

Дальнейшее совершенствование ядерных методов в этой области должно быть направлено на разработку системы алгоритмов, позволяющей применять лабораторные и полевые экспериментальные данные в отношении природных систем. Необходимо разработать более адекватные модели интерпретации и прогнозирования, а также создать базы данных о типичных характеристиках миграции загрязняющих веществ в типичных геологических и термодинамических условиях.

Очень часто делаются заявления, что общим недостатком применения радиоактивных изотопов является требование о предоставлении данных об их воздействии на окружающую среду при подаче исследователями заявки на получение лицензии на их применение. Это требование может привести к неправильному пониманию этой проблемы общественностью и даже лицами, отвечающими за принятие решений. В большинстве случаев в гидрологических и гидрогеологических исследованиях искусственные изотопы используются только в очень небольших концентрациях, которые не представляют опасности для рабочих, населения и окружающей среды при условии соблюдения хорошо известных и хорошо понимаемых мер безопасности. Применение природных радиоактивных изотопов не вызывает каких-либо особых проблем с точки зрения безопасности.

В настоящее время для оказания помощи исследователям и правительственным организациям МАГАТЭ подготавливает руководство по безопасному обращению с искусственными радиоизотопными индикаторами в гидрологии.

Прочая деятельность МАГАТЭ

Прочая деятельность Агентства в области миграции загрязняющих веществ охватывает целый ряд проектов, включающих в себя изотопные гидрологические и геохимические исследования поверхностных и грунтовых вод.

Кроме того, в целях анализа полезности, надежности и пригодности ядерных методов для оценки грунтовых вод МАГАТЭ образовало несколько экспертных консультативных групп. Конкретные обсуждаемые ими вопросы включают в себя применение методов радиоизотопных индикаторов в гидрологии, подверженность подземных водоносных горизонтов загрязнению, применение изотопов редких и благородных газов в исследованиях атмосферных и гидросферных процессов, а также компьютерное моделирование в области изотопной гидрологии.

В настоящее время реализуется несколько программ координированных исследований (ПКИ) этих проблем. Они включают в себя ПКИ моделирования переноса изотопов в гидрологических систе-

мах и ПКИ по разработке и оценке применения ядерных методов в исследованиях переноса загрязняющих веществ. Последняя ПКИ объединяет научные группы Австралии, Бразилии, Германии, Дании, СССР, США, Финляндии, Франции и Чехословакии.

Кроме того, оказывается поддержка несколькими региональным проектам технического сотрудничества в области гидрологии и гидрогеологии в Латинской Америке, на Ближнем Востоке, в Африке и Азии. МАГАТЭ также регулярно проводит учебные курсы по обучению специалистов из разных стран методологиям и практическому применению изотопных методов, включая также области применения и методы, которые наиболее полезны с точки зрения решения проблем охраны водных ресурсов.

В марте 1991 г. МАГАТЭ собирается провести Международный симпозиум по изотопной гидрологии, в рамках которого состоится дискуссия по вопросам использования ядерных методов в исследованиях загрязнения/защиты грунтовых вод. Это будет восьмой с 1963 г. симпозиум по изотопной гидрологии.

Ядерные и изотопные методы

Целый ряд ядерных и изотопных методов может внести свой вклад в решение конкретных вопросов движения грунтовых вод и миграции загрязняющих веществ.

Среди ядерных методов важную роль играет ядерный каротаж. В его основе лежит использование ядерного излучения (гамма, нейтронного и т.д.) для определения физико-химических свойств почв и породы *in situ*. Гамма-каротаж применяется для оценки естественной эмиссии гамма-лучей почвами с последующим определением содержания в них глины и карбоната и водопроницаемости. В основе гамма-гамма каротажа лежит рассеяние гамма излучения, испускаемого искусственными источниками. Измеряя рассеяние излучения в скважинах, мы получаем информацию об объемной плотности почв. С помощью нейтронного каротажа получают данные о содержании влаги в почве. Комплексное применение гамма-гамма и нейтронного каротажа позволяет провести оценку целого ряда характеристик, включая пористость (в насыщенных почвах), плотность почвенной основы, а также скорость движения и диффузность почвенной влаги (в ненасыщенных почвах). Иногда такое комплексное использование облегчает оценку трещиноватости связанных пород.

Изотопные методы основываются на природной или искусственной инъекции изотопных индикаторов в определенную водную систему, цель которой заключается в прослеживании движения воды и ее компонентов.

Применение индикаторов имеет давнюю историю. Самые простые метки, например, листья деревьев, щепки и соломинки, применялись для определения направления и скорости движения воды, а также взаимосвязей между потоками вод и водоемами. Позднее стали применяться различные природные и искусственные пигменты и красители, которые по-прежнему используются в этих целях и в наше время.

В конце XIX и начале XX веков благодаря открытию кондуктометрии и колориметрии был достигнут впечатляющий прогресс в области индикаторных методов. Они позволили проводить приборные измерения характеристик воды с использованием солей и красителей в качестве индикаторов. Примером использования солей и красителей прошлым поколением гидрологов могут служить гидрологические исследования с применением индикаторов в районе Дуная – Рейна, в карстовых пещерах Крыма и Динара, а также в других регионах.

Однако настоящий пик развития индикаторных методов был достигнут после открытия изотопов и создания приборов для их измерения.

Благодаря наличию разнообразных изотопов их можно использовать для исследования большинства видов загрязнения. В некоторых случаях они являются уникальным инструментом исследований, имеющим значительные преимущества перед другими индикаторами.

С помощью радиоизотопных индикаторов можно метить молекулы воды или частицы за-

грязняющего вещества, или то и другое. Исследования и наблюдения миграции можно проводить на микроскопическом или макроскопическом уровнях в локальных, региональных и даже глобальных масштабах. Воду и загрязнители можно метить, не нарушая при этом исследуемые режимы и процессы. Эксперименты с применением изотопных индикаторов можно проводить в экстремальных условиях, когда невозможно использовать другие индикаторы: чрезвычайно высокий коэффициент разбавления, высокая степень минерализации, замутнение, турбулентность, низкие и высокие температуры. Кроме того, в геосфере и гидросфере существует широкий диапазон природных изотопов, которые можно успешно использовать для изучения природных процессов переноса.

Одним из наиболее важных преимуществ изотопных методов является предоставляемая ими возможность проведения количественной и качественной оценки так называемых „ретардационных параметров” геологических сред, влияющих на движение загрязнителей; это очень сложное явление, охватывающее процессы сорбции/десорбции, диффузии/дисперсии, разбавления/осаждения и многие другие процессы.

Для оценки ретардации возможно комплексное использование нескольких различных изотопов. В методах „двойного мечения” тритий (радиоактивный изотоп водорода) можно использовать в качестве радиоизотопного индикатора движения воды, а другой соответствующий изотоп – в качестве индикатора определенного загрязнителя. Данные методы позволяют получить ценную информацию для оценки эффектов ретардации.

Лучшие результаты удается получить в случае объединения лабораторных методов (радиография, химические реакторы периодического действия, лабораторные колонки) и полевых экспериментов с применением индикаторов, включая искусственные и природные изотопные индикаторы. Эксперименты с применением реакторов периодического действия включают в себя наблюдение перераспределения меченых компонентов между модельным раствором и пробой почвы/породы в гидравлически статических условиях. Таким образом можно исследовать изотермы сорбции – десорбции, коэффициенты распределения при сорбции и их зависимости от гидрохимии и характеристик загрязнителя и почвы.

Следует отметить, что основное количество данных о сорбции радионуклидов и металлов было получено совсем недавно во время проведения экспериментов с использованием химических реакторов периодического действия и изотопных индикаторов.

Методы использования лабораторных колонок основываются на измерении пространственно-временного распределения меченых компонентов, протекающих через колонку материала (почва/порода). Это позволяет провести одновременную оценку параметров гидравлического переноса, сорбции/десорбции, диффузии/дисперсии в гидравлических, динамических условиях. По сравнению с данными, полученными в ходе экспериментов с использованием химических реакторов периодического действия, данные экспериментов с применением лабораторных колонок более тесно связаны с природными системами.

Полевые эксперименты являются наиболее предпочтительными методами. Для оценки параметров ретардации в полевых условиях обычно проводят эксперименты с применением нескольких индикаторов. В таких экспериментах тритий используется в качестве индикатора самой воды и растворенных в ней активных веществ (загрязнителей), меченых другим индикатором. Как правило, концентрации трития, необходимые для проведения таких экспериментов, составляют порядка нескольких десятков беккерелей на литр (Бк/л).

В целом полевые эксперименты с использованием искусственных изотопных индикаторов могут помочь изучить целый ряд локальных проблем:

- Защита конкретных районов, из которых осуществляется забор воды для удовлетворения потребностей населения в питьевой воде. Основной целью является прогноз времени дообегания загрязнителя от источника водноносного горизонта.

- Исследование и прогнозирование загрязнения грунтовых вод в районах вокруг площадок захоронения отходов и крупных промышленных центров.

- Оценка динамики воды в искусственно подпитываемых системах.

- Изучение и прогнозирование движения и поведения солей и сельскохозяйственных ядохимикатов в почве и грунтовых водах.

Рис. 5. Стратегия применения индикаторных методов в исследованиях загрязнения окружающей среды.

