

Изыскание водных ресурсов в пустыне: на помощь приходят изотопы

Р. Гонфьянтини*

Время от времени газеты и журналы пишут об огромных запасах воды, хранящихся в недрах Сахары, рациональная эксплуатация которых позволила бы развить сельское хозяйство в этой пустыне. Хотя практическое осуществление таких проектов довольно проблематично, несомненно, что в недрах Сахары (так же как и других пустынь мира) имеются довольно богатые запасы воды, которые, однако, редко бывают легкодоступными. Что же в действительности известно относительно этих запасов грунтовых вод и каким образом они накопились в районах, где так редко выпадают дожди? Что известно о гидрологической истории пустыни? Ответы на эти вопросы важны для правильной оценки и использования грунтовых вод в пустыне. Поиску их помогают изотопные методы.

Термин "пустыня" применяется ко всем засушливым районам мира, в которых осадки настолько редки, что человек не может жить там постоянно. Хотя обычно предполагается, что верхний предел количества осадков в пустынях составляет 250 мм в год, для большинства имеющихся пустынь количество осадков меньше указанного и зачастую значительно меньше 100 мм в год — предела, который соответствует приблизительно 15% количества осадков на большей части территории Европы, причем осадки в пустыне распределены во времени и пространстве неравномерно, и часто бывают годы, когда дожди вообще не выпадают (сверхзасушливые пустыни). Вследствие этого в пустыне нет пресноводных водоемов, таких, как реки и озера, и грунтовые воды обычно расположены настолько глубоко, что корни растений и обычные колодцы не могут достичь водоносного слоя. Постоянные формы животной и растительной жизни отсутствуют или весьма редки. Населенные пункты очень редки и расположены только в оазисах — низменных участках пустыни, где уровень грунтовых вод достигает поверхности или близок к ней, так что вода в оазисах может легко быть использована для ирригации и других целей даже с помощью примитивных технических средств.

Пустыни занимают обширные районы в основном в полосе широт от 15° до 30°. Пустыня Сахара в Северной Африке — крупнейшая пустыня в мире — имеет площадь поверхности примерно 9 млн. кв. км, что сравнимо с площадью территории Соединенных Штатов Америки. Другими крупными пустынями являются пустыни Аравийского полуострова и Ирана, которые могут считаться продолжением пустыни Сахары, пустыни в Туркменистане (СССР), пустыня Тар в Индии, пустыня Го-

би в Китае и Монголии, Большая американская пустыня, в южном полушарии — пустыня Калахари в Южной Африке, Большая австралийская пустыня и пустыня Атакама в Северном Чили. Последняя пустыня, будучи относительно небольшой по размерам, является, несомненно, самой засушливой: свыше ста лет на большей части ее территории не было зарегистрировано осадков.

Изменение климата

Однако в ходе истории Земли климат неоднократно изменялся, и нынешние пустыни не всегда были такими засушливыми, такими безжизненными и лишенными растительности. Наскальные рисунки, гравюры и следы деятельности человека во многих местах Сахары свидетельствуют о том, что в прошлом климат и окружающая среда были благоприятными для жизни человека. Это означает, что когда-то в прошлом дожди были относительно обильными, а вода легкодоступной. Последний из таких "плювиальных" периодов, именуемый "влажным неолитом", продолжался приблизительно от 7000 до 3000 года до нашей эры. По окончании этого периода условия все более ухудшались, что вело к исчезновению поверхностных водоемов, постепенному сокращению стока в весенние периоды и уменьшению поверхности водного зеркала. Однако всего лишь 2 тыс. лет тому назад условия были, по-видимому, значительно лучше тех, которые существуют в настоящее время. Римские легионы смогли дважды пересечь Ливийскую пустыню для того, чтобы достичь крупного оазиса в Вади-Аджаль в Фецчане и дать бой Гарамантесу: первый раз в 20-м году до нашей эры от Сабратхи (65 км на запад от Триполи) до Гадамеса, а затем через плато Хамада-эль-Хамра (Красная Каменная пустыня), покрыв в общей сложности 1200 км, и второй раз в 70-м году нашей эры по расположенному восточнее пути через оазис Эль-Джуфра и Джебель-Савда (Черная гора).

К югу от пустыни Сахары, приблизительно между 18° и 12° северной широты, количество осадков увеличивается, хотя и остается все же довольно незначительным. Что более важно, дожди приобретают регулярный характер летом и проходят в результате смещения муссонов на север. В сезон дождей образуется скудная растительность, которой достаточно для кочевого животноводства. Этот район, именуемый Сахель, что означает по-арабски "берег", если считать пустыню морем. Однако естественная среда района Сахель весьма неустойчива: достаточно года-двух с пониженным выпадением осадков, чтобы возникли бедствия, сопровождаемые гибелью и голоданием тысяч животных и зачастую людей, особенно детей. Подобные траги-

* Сотрудник Секции применения изотопов в гидрологии, Отдел научных исследований и лабораторий, МАГАТЭ.



Одно из прекраснейших наскальных изображений в Вадигизгах (Феццан, Ливия), свидетельствующее о существовании в прошлом природных условий, благоприятных для развития животного мира.

ческие события неоднократно повторялись и в течение последнего десятилетия. Такие события вызывают также вторжение пустыни, что является причиной серьезной озабоченности сахельских стран.

Единственный источник — грунтовые воды

Очевидно, что для того чтобы улучшить условия жизни в оазисах и в Сахеле и защитить их от природных явлений, прежде всего необходимо обеспечить достаточные запасы пресной воды. Источником их, безусловно, могут быть только грунтовые воды, поэтому во всех странах засушливых районов осуществляются проекты развития сельского хозяйства, зачастую финансируемые Программой развития ООН (ПРООН) и имеющие целью изучение и оценку запасов грунтовых вод, а также бурение скважин для их использования. В этих проектах для оказания помощи в оценке запасов грунтовых вод неоднократно использовались изотопные методы.

Основная проблема в засушливых районах, которая часто не может быть легко решена с помощью обычных гидрологических методов, заключается в

Нынешнее сухое обнаженное русло Вадигизгах. Эта река, вероятно, существовала во время верхнего плейстоцена (от 65 000 до 10 000 лет тому назад) и влажного неолита (от 7 000 до 3 000 лет тому назад).



том, чтобы обнаружить, имеется ли активное пополнение данного бассейна грунтовых вод. Иными словами, нужно выяснить, приведет ли освоение водных ресурсов просто к извлечению грунтовых вод раз и навсегда, или источник является возобновляемым. Грунтовые воды могут пополняться путем просачивания осадков, выпавших в зоне водоснабжения, где водоносная геологическая формация (именуемая водоносным слоем) выходит на поверхность земли. Анализ трития может зачастую пролить свет на эту проблему.

Тритий представляет собой радиоактивный изотоп водорода с массовым числом 3 и периодом полураспада 12,43 года. Большие количества его выделились в атмосферу в течение 1952-1963 годов в результате испытаний в ней водородных бомб. До этого времени в окружающей среде присутствовал лишь тритий, образовавшийся в результате воздействия космического излучения, и общее количество этого трития составляло всего лишь 3-4 кг для всего земного шара. Концентрация трития достигла максимума в период весенних осадков 1963 года, когда в Северном полушарии наблюдались значения концентрации, в 1000 раз превышавшие естественный уровень содержания трития в атмосфере. После 1963 года концентрация трития постоянно снижалась, поскольку был введен запрет на термоядерные взрывы в атмосфере.

Концентрация трития в природной воде, особенно в грунтовых водах, обычно весьма низка. Однако, используя наиболее совершенные методы счета, можно зарегистрировать концентрацию в один атом трития на 10^{18} атомов водорода. Недавно разработанный метод позволяет регистрировать атомы гелия-3, образующегося в результате распада трития, с помощью масс-спектрометра. Этот метод снизил порог регистрации по крайней мере на порядок величины и, возможно, позволит снизить его на два порядка величины в ближайшем будущем. Если в воде имеется тритий, то ясно, что она не древнего происхождения и запасы ее пополнились после 1952 года. Поэтому тритий можно использовать для обнаружения пополнения, которое имело место в течение последних трех десятилетий. Однако вследствие скудости осадков в засушливых районах такой период времени может оказаться статистически незначимым или слишком коротким для того, чтобы просочившаяся вода достигла зеркала воды (подземного уровня неглубоко залегающих грунтовых вод). В неглубоко залегающих грунтовых водах Сахары практически не обнаруживается сколь-либо значительных количеств трития, что указывает на то, что новое подпитывание пренебрежимо мало или еще не достигло зеркала воды.

Однако если происходит инфильтрация, необходимо иметь возможность обнаружить и оценить ее с помощью измерений содержания трития во влаге почвы над зеркалом воды. Полученные результаты указывают, что этот метод надежен и перспективен, особенно если использовать его в сочетании с физическими моделями, описывающими перемещение воды. С целью дальнейшего изучения этого метода МАГАТЭ недавно приступило к осуществлению программы координированных исследований. Финансовая поддержка обеспечивается Федеративной

Республикой Германии через Общество по исследованию излучений и окружающей среды (GSF). Программа предусматривает исследование процессов инфильтрации воды в засушливых районах.

Другой метод оценки возраста грунтовых вод состоит в том, что измеряют количество углерода-14 в растворенном неорганическом углероде. Углерод-14 представляет собой радиоактивный изотоп углерода с периодом полураспада 5730 лет, создаваемый космическим излучением. Концентрация этого радиоактивного изотопа в содержащейся в настоящее время в атмосфере двуокиси углерода весьма низка, порядка одного атома на 10^{12} атомов. Благодаря процессам фотосинтеза и дыхания растений углерод переносится из атмосферы в почву и грунтовые воды, где он растворяется в основном в виде двуокиси углерода. Определение возраста грунтовых вод, хотя оно и усложнено взаимодействием ионов двуокиси углерода с матрицей водоносного слоя, позволяет определить, имеем ли мы дело с весьма старой водой: данный метод применим лишь для возраста воды, превышающего 2000-3000 лет. Верхний предел в настоящее время составляет около 30000 лет, однако, возможно, он будет поднят до 70000 лет или более после разработки новых методов счета с использованием циклотрона или ускорителя Ван-де-Граафа.

Однако, по-видимому, наиболее привлекательным для исследований грунтовых вод в засушливых районах является третий изотопный метод — метод анализа измерений соотношения стабильных изотопов дейтерия/водорода и кислорода-18/кислорода-16 в воде. В настоящее время совершенно очевидно, что в прошлом эти соотношения в дождевой воде изменялись при изменении климата. Поэтому изотопные отношения в грунтовых водах, которые значительно ниже, чем ожидаемые для новых осадков, свидетельствуют о том, что грунтовые воды недавнего происхождения и поступили тысячу лет тому назад, когда климат был более влажным.

Воды древнего происхождения

В засушливых зонах, и особенно в Сахаре или в районах, окружающих Сахару, где МАГАТЭ провело ряд гидрологических исследований с помощью изотопных методов в рамках контракта с другими организациями системы ООН (ФАО, ЮНЕСКО, ПРООН), глубинные грунтовые воды обычно весьма старого происхождения. Содержание углерода-14 в них часто не превышает 2% от современного содержания, что свидетельствует о том, что их возраст превышает 20000 лет (принимая во внимание ошибки и неопределенности метода). Это указывает на то, что пополнение имело место, по-видимому, в течение плейстоценового периода верхнего плейстоцена (от 10000 до 65000 лет тому назад). Для более высоких широт этот период соответствует последнему периоду оледенения, именуемому вюрмским или вейшельским в Европе и висконсинским в Северной Америке. Данные о таком большом возрасте подтверждаются также относительным обеднением по тяжелым стабильным изотопам, дейтерию и кислороду-18, что также указывает на то, что по-



Артезианский колодец в Вади-Кирзах.

полнение имело место в течение более влажного периода, чем нынешний.

Наблюдения, аналогичные описанным выше, были проведены, например, для так называемого "континентального промежуточного" водоносного слоя — основной водоносной формации в Западной Сахаре, простирающейся в основном в Алжире от Атласа до гор Ахагар в направлении с севера на юг, и от Туниса и западной Ливии до долины Вади-Саура в направлении с востока на запад. Общая площадь составляет около 600000 км², что приблизительно на 10% больше, чем площадь Франции, и в семь раз больше площади Австрии. Количество воды, хранящейся в таком водоносном слое, чрезвычайно велико, порядка тысяч кубических километров.

Континентальный промежуточный слой простирается в основном в пустынных районах, зачастую на больших глубинах; например, вблизи Тугурта он эксплуатируется с помощью пробуренных скважин, экраны (перфорированные участки) которых находятся на глубине от 1500 до 1700 метров. Напор воды составляет от 260 до 290 метров над поверхностью земли, а температура превышает 70°C, поэтому перед подачей потребителям ее необходимо охлаждать. На краях, где формация выходит на поверхность, содержание углерода-14 возрастает,

Пустыня с песчаными дюнами (эрг) в Феццане.





Деревня Бутилимит в зоне Сахеля на юге Мавритании.

что свидетельствует о наличии воды более молодого происхождения. Источником пополнения, который был идентифицирован с помощью стабильных изотопов, является водоносный слой мелкого залегания в Большом Восточном Эрге. Он представляет собой обширные формации песчаных дюн, покрывающие северо-западную часть континентального промежуточного слоя и образовавшиеся в течение сверхзасушливого периода, который последовал за плейстоценовым периодом верхнего плестогена и предшествовал наступлению влажного неолита. Кроме того, с помощью метода стабильных изотопов был определенно подтвержден сброс вод континентального промежуточного слоя в более мелко лежащую формацию в Тунисе, где глубокие грунтовые воды восходят через систему трещин Эль-Хамма.

Последние примеры показывают также, каким образом измерения на стабильных изотопах могут

быть использованы для выявления источника происхождения грунтовых вод и соединительных путей между водоносными слоями. Информация такого типа, безусловно, важна для любой попытки оценить баланс какой-либо водоносной формации.

В исследовании, проведенном недавно в Ливийской Арабской Джамахирии, стабильные изотопы помогли реконструировать региональный поток грунтовых вод. Основной поток следует с юга на север в крупных водоносных слоях (палеозой, Кикла), интенсивность использования которых увеличивается в связи с осуществлением новых сельскохозяйственных проектов и созданием опытных ферм в нескольких крупных оазисах в районе от Феццаны до морского побережья (Мурзук, Вади-Аджаль, Вади-Эш-Ша-ти, Эль-Джуфра, Вади-Земзем и т.д.). Здесь также, согласно анализу углерода-14, грунтовые воды обычно старого происхождения (более 20000 лет), и относительно низкое содержание дейтерия и кислорода-18 подтверждает этот вывод. Кроме того, стабильные изотопы позволили уточнить взаимосвязи между различными водоносными слоями и определить количество грунтовых вод, поступающих из различных источников.

Скудные данные

По многим причинам изучение ресурсов грунтовых вод в засушливых зонах представляет сложную и трудную задачу. Пробуренные скважины, стратиграфические данные которых могут быть использованы для гидрогеологической оценки различных водоносных формаций, довольно редки, и зачастую на больших площадях нет ни одной скважины; если же они существуют, то соответствующая документация иногда теряется или бывает не-

Озеро Ум-эль-Маих (мать соли) в пустыне (песчаном море) Эдейн-Убари, Феццан. В этом районе имеется несколько других подобных небольших озер, которые располагаются в низинах между дюнами, где выходят на поверхность грунтовые воды. Вследствие высокой интенсивности испарения содержание соли в озерах всегда высоко и часто достигает уровня насыщения с последующим образованием соляных залежей, в основном состоящих из хлористого натрия. Соль часто собирают и продают жители небольших поселений, расположенных в оазисе озера.



полной. Имеющиеся данные различных видов (метеорологические, климатологические, гидрологические, пьезометрические и т.д.) довольно скудны, учитывая размер соответствующих районов. Кроме того, время, истекшее с момента начала наблюдений, часто слишком непродолжительно, особенно учитывая нестабильность и низкую частоту наблюдаемых явлений. Например, мало известно о выпадении осадков в пустыне, средний интенсивности и вероятности повторения осадков, превышающих определенный уровень; поэтому любая оценка интенсивности пополнения грунтовых вод вызывает сомнение.

В этом контексте изотопные методы представляют дополнительную информацию, которая не может быть получена другими способами. Временная зависимость изотопного состава осадков представляется важной, поскольку она может пролить свет на проблему современного пополнения вод и позволяет оценить возраст грунтовых вод. Стабильные изотопы могут быть использованы в качестве экологических индикаторов для прослеживания перемещения грунтовых вод на больших расстояниях. В сравнении с искусственно вводимыми индикаторами преимущество экологических изотопов

состоит в том, что они вводятся непрерывно по всей площади исследуемого района и поэтому получаемые результаты действительны в пространственном и временном измерениях. По отношению к другим экологическим индикаторам, таким, как химические элементы, растворенные в воде, изотопы водорода и кислорода имеют то преимущество, что они более консервативны (исключая распад трития, закон которого, однако, хорошо известен), при пренебрежимо малом или ограниченном взаимодействии с матрицей водоносного слоя, и ведут себя точно так же, как вода, поскольку они входят в молекулы воды.

Применение изотопных методов для гидрологических исследований в засушливых районах подробно обсуждалось на совещании Консультативной группы, созданном МАГАТЭ в 1978 году. Было представлено семнадцать докладов, опубликованных в настоящее время в трудах совещания ("Гидрология засушливых зон: исследование с помощью изотопных методов", STI/PUB/547, МАГАТЭ, Вена, 1980 год), в которых излагается большая часть данных и сообщается об опыте, накопленном приблизительно за десятилетие работы в засушливых районах.