



# БЮЛЛЕТЕНЬ МАГАТЭ

МЕЖДУНАРОДНОЕ АГЕНТСТВО ПО АТОМНОЙ ЭНЕРГИИ  
Главное о МАГАТЭ | Апрель 2019 года



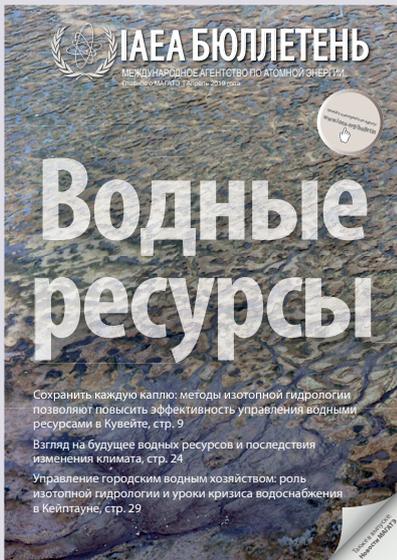
# Водные ресурсы

Сохранить каждую каплю: методы изотопной гидрологии позволяют повысить эффективность управления водными ресурсами в Кувейте, стр. 9

Взгляд на будущее водных ресурсов и последствия изменения климата, стр. 24

Управление городским водным хозяйством: роль изотопной гидрологии и уроки кризиса водоснабжения в Кейптауне, стр. 29

Также в выпуске:  
Новости МАГАТЭ



### БЮЛЛЕТЕНЬ МАГАТЭ

издается

Бюро общественной информации  
и коммуникации (ОРИС)

Международное агентство по атомной энергии

Венский международный центр

а/я 100, 1400 Вена, Австрия)

Тел: (43-1) 2600-0

iaebulletin@iaea.org

Ответственный редактор: Лаура Хиль

Редактор: Миклош Гашпар

Младший редактор: Николь Яверт

Дизайн и верстка: Риту Кенн

БЮЛЛЕТЕНЬ МАГАТЭ имеется в интернете по

адресу: [www.iaea.org/bulletin](http://www.iaea.org/bulletin)

Выдержки из материалов МАГАТЭ, содержащихся

в Бюллетене МАГАТЭ, могут свободно

использоваться при условии указания на их источник. Если указано, что автор материалов не является сотрудником МАГАТЭ, то разрешение на повторную публикацию материала с иной целью, чем простое ознакомление, следует испрашивать у автора или предоставившей данный материал организации.

Взгляды, выраженные в любой подписанной статье, опубликованной в Бюллетене

МАГАТЭ, необязательно отражают взгляды

Международного агентства по атомной энергии, и МАГАТЭ не берет на себя ответственности за них.

Фото на обложке:

Берег во время отлива, Персидский залив, Кувейт

(Фото: Д. Кальма/МАГАТЭ)

Читайте наши новости на сайтах:



# IAEA

Миссия Международного агентства по атомной энергии состоит в том, чтобы предотвращать распространение ядерного оружия и помогать всем странам — особенно развивающимся — в налаживании мирного, безопасного и надежного использования ядерной науки и технологий.

Созданная в 1957 году как автономная организация под эгидой Организации Объединенных Наций, МАГАТЭ — единственная организация системы ООН, обладающая экспертным потенциалом в сфере ядерных технологий. Уникальные специализированные лаборатории МАГАТЭ способствуют передаче государствам — членам МАГАТЭ знаний и экспертного опыта в таких областях, как здоровье человека, продовольствие, водные ресурсы, экономика и окружающая среда.

МАГАТЭ также служит глобальной платформой для укрепления физической ядерной безопасности. МАГАТЭ выпускает Серию изданий по физической ядерной безопасности, в которой выходят одобренные на международном уровне руководящие материалы по физической ядерной безопасности. МАГАТЭ также ставит своей задачей содействие минимизации риска того, что ядерные и другие радиоактивные материалы попадут в руки террористов и преступников и что ядерные установки окажутся объектом злоумышленных действий.

Нормы безопасности МАГАТЭ закладывают систему фундаментальных принципов безопасности и отражают международный консенсус в отношении того, что можно считать высоким уровнем безопасности для защиты людей и окружающей среды от вредного воздействия ионизирующего излучения. Нормы безопасности МАГАТЭ разрабатывались для всех типов ядерных установок и деятельности, преследующей мирные цели, а также для защитных мер, необходимых для снижения существующих рисков облучения.

Кроме того, при помощи своей системы инспекций МАГАТЭ проверяет соблюдение государствами-членами их обязательств, касающихся использования ядерного материала и установок исключительно в мирных целях, в соответствии с Договором о нераспространении ядерного оружия и другими соглашениями о нераспространении.

Работа МАГАТЭ многогранна, и в ней участвует широкий круг партнеров на национальном, региональном и международном уровнях. Программы и бюджет МАГАТЭ формируются на основе решений его директивных органов — Совета управляющих, насчитывающего 35 членов, и Генеральной конференции всех государств-членов.

Центральные учреждения МАГАТЭ находятся в Венском международном центре. Полевые бюро и бюро по связи расположены в Женеве, Нью-Йорке, Токио и Торонто. В Вене, Зайберсдорфе и Монако работают научные лаборатории МАГАТЭ. Кроме того, МАГАТЭ оказывает содействие и предоставляет финансирование Международному центру теоретической физики им. Абдуса Салама в Триесте, Италия.

# Понимание водных ресурсов мира

Юкия Аmano, Генеральный директор МАГАТЭ

Вода — драгоценный ресурс, от которого зависит жизнь на Земле. Тем не менее мы на удивление мало знаем о том, сколько воды у нас есть, где именно она находится и надолго ли хватит ее запасов. Из всего объема пресной воды на Земле 98 % скрыто под ее поверхностью. Чтобы защитить пресную воду от таких угроз, как чрезмерное извлечение и загрязнение, и рационально использовать ее в интересах будущих поколений, мы должны тщательно изучать наши подземные воды.

МАГАТЭ оказывает в этом поддержку национальным экспертам, содействуя использованию изотопных методов и передавая научные ноу-хау. Данные, собранные с помощью этих методов, помогают совершенствовать политику управления водными ресурсами.

Оказание поддержки государствам-членам в управлении их водными запасами и защите этих запасов является частью нашего мандата «Атом для мира и развития». Мы призываем страны в полной мере использовать преимущества ядерных методов, чтобы улучшать все аспекты жизни своих народов и защищать окружающую среду. Важнейшей составной частью этих усилий является сохранение водных ресурсов.

В настоящем издании *Бюллетеня МАГАТЭ* освещаются способы применения ядерных методов в изотопной гидрологии и работа МАГАТЭ по обеспечению доступности этих методов для государств-членов. В нем представлен обзор соответствующих научных аспектов (стр. 4) и приводятся примеры стран, в которых наши совместные усилия дали реальный результат. Например, на стр. 6 мы описываем, как аргентинские специалисты по изотопной гидрологии собирают данные, необходимые директивным органам для разработки более совершенных моделей управления водными ресурсами на территории страны.

Компетентные органы Кувейта рассказывают о своих планах по более устойчивому использованию водных ресурсов при поддержке МАГАТЭ (стр. 9), а филиппинские исследователи объясняют, каким образом они подтвердили, что подземные воды на севере страны безопасны для питья (стр. 12).

На стр. 14 отслеживается происхождение загрязненных вод на Маврикии, а на стр. 16 повествуется о богатых запасах воды, скрытых под землей в полусухом регионе Сахеля.

Кроме того, в настоящем издании *Бюллетеня МАГАТЭ* содержится раздел о технологиях, в котором демонстрируются разработанные МАГАТЭ для государств-членов изотопно-гидрологические методы. В их число входят метод датировки на основе анализа содержания трития/гелия-3 (стр. 20), используемый для установления точного возраста молодой воды, и изотопная модель водного баланса (стр. 24), которая может помочь ученым в прогнозировании воздействия изменения климата на водные ресурсы.

Вы можете узнать о роли изотопной гидрологии в защите окружающей среды во время гидроразрыва пласта (стр. 22) и о том, как МАГАТЭ проверяет способность лабораторий по всему миру проводить анализ воды (стр. 26); на стр. 18 представлена информация о глобальной сети мониторинга изотопов, которую разработало МАГАТЭ в сотрудничестве с Всемирной метеорологической организацией.

В этом году проводится 15-й Международный симпозиум по изотопной гидрологии. В нем принимают участие ведущие специалисты по водным ресурсам и окружающей среде со всего мира, и его целью является углубление понимания тех огромных преимуществ, которые дает изотопная гидрология, помогающая миру реагировать на быстро меняющуюся глобальную окружающую среду.

Надеюсь, что благодаря настоящему выпуску *Бюллетеня МАГАТЭ* вы получите представление об этом многообещающем и поразительном способе применения ядерных технологий.



(Фото: Л. Поттертон/МАГАТЭ)



(Фото: Высшая политехническая школа побережья/ESPOL, Эквадор)



(Фото: Л. Хиль/МАГАТЭ)

## Предисловие

### 1 Понимание водных ресурсов мира

### 4 Изотопная гидрология: обзор

## Примеры успешного опыта



**6** Аргентина применяет изотопные методы для изучения водных ресурсов



**9** Сохранить каждую каплю: методы изотопной гидрологии позволяют повысить эффективность управления водными ресурсами в Кувейте



**12** Результаты исследования подтверждают: воду в филиппинском городе можно пить



**14** Изотопы помогают отследить источники загрязнения городских водных ресурсов на Маврикии



**16** Использование изотопных методов для картирования и анализа ресурсов подземных вод в Сахеле

## Технологии



**18** Глобальная сеть «Изотопы в осадках»



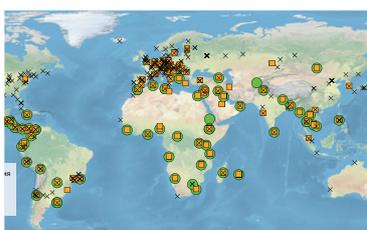
**20 Управление водным балансом при помощи метода анализа содержания трития/гелия-3**



**22 Гидроразрыв пласта: оценка воздействия на окружающую среду с помощью методов изотопной гидрологии помогает сохранить грунтовые воды**



**24 Взгляд на будущее водных ресурсов и последствия изменения климата**



**26 Исследователи держат марку МАГАТЭ проверяет качество исследований проб воды в лабораториях**

Мировой обзор

**29 Управление городским водным хозяйством: роль изотопной гидрологии и уроки кризиса водоснабжения в Кейптауне**

— Джоди Миллер

**31 Изотопное картирование загрязнения и пополнения подземных вод**

— Жоэль Подгорски, Михаэль Берг и Рольф Кипфер

Сегодня в МАГАТЭ

**33 Проверка отработавшего ядерного топлива инспекторами МАГАТЭ упрощается благодаря новому инструменту осуществления гарантий**

**33 В центре внимания семинара-практикума МАГАТЭ в Узбекистане — выбор и оценка площадок для атомных электростанций**

**34 Как ядерные методы помогают накормить население Китая**

# Изотопная гидрология: обзор

Лусия Ортега и Лаура Хиль



При помощи изотопных методов ученые изучают компоненты гидрологического цикла, что помогает им лучше оценивать количество, качество и устойчивость водных ресурсов.

Наименее изученным компонентом гидрологического цикла являются подземные воды. Ученые используют изотопы природного происхождения в качестве индикаторов, позволяющих выяснить, восполняются ли подземные воды, откуда они берутся, как они движутся под землей, подвержены ли они риску загрязнения и восприимчивы ли к меняющимся климатическим условиям.

Вода из разных мест имеет различные изотопные признаки, оставляющие уникальный «след». Ученые используют их для отслеживания движения воды на протяжении всего гидрологического цикла — испарения, выпадения в виде осадков, инфильтрации, стока, эвапотранспирации и возвращения в океан или атмосферу, — который затем повторяется.

## Что представляют собой изотопы?

Тот или иной химический элемент, например водород, состоит из атомов только одного типа. Эти атомы имеют различные модификации. Такие модификации называются изотопами; все они обладают одинаковыми химическими свойствами и имеют одно и то же количество протонов и электронов, но разное количество нейтронов. Из-за разницы в количестве нейтронов масса каждого изотопа различается, и для гидрологических исследований эта разница в атомной массе имеет принципиальное значение.

В изотопной гидрологии используются как стабильные, так и нестабильные изотопы. Стабильные изотопы нерадиоактивны, т. е. они не испускают излучения. Нестабильные изотопы (или радиоизотопы) подвержены радиоактивному распаду и поэтому являются радиоактивными.

Ниже приводится небольшой обзор того, чем занимается изотопная гидрология.

## Происхождение воды и ее движение в рамках гидрологического цикла

Каждая молекула воды ( $H_2O$ ) состоит из двух атомов водорода (H) и одного атома кислорода (O), но не все они одинаковы: некоторые изотопы легче, а некоторые тяжелее. Ученые используют точное аналитическое оборудование для измерения этих крошечных различий в массе проб воды. Зачем?

При испарении воды из моря молекулы с более легкими изотопами обычно поднимаются вверх, образуя облака со специфическими изотопными признаками. Эти облака состоят из смеси молекул воды, выпадающих в виде дождя. Первыми падают молекулы воды с более тяжелыми изотопами. Затем, по мере того как облака теряют эти тяжелые изотопы и перемещаются в глубь материка, в основном выпадают более легкие изотопы.

Когда вода падает на землю, она наполняет озера, реки и водоносные горизонты. Измеряя соотношение между тяжелыми и легкими изотопами в этих водных источниках, ученые могут определить происхождение воды и особенности ее движения.

## Возраст подземных вод

Изотопы позволяют наиболее простым и надежным образом определить возраст водных ресурсов и степень их уязвимости и устойчивости. Когда говорят, что подземные воды в водоносном горизонте являются «старыми», это означает, что вода течет медленно и что на восполнение водоносного горизонта может потребоваться много времени. Напротив, молодые подземные воды легко и быстро пополняются дождевыми осадками, но при этом на них могут сильно сказываться загрязнение и меняющиеся климатические условия. Определяя возраст воды, ученые и руководители получают четкое представление о том, насколько быстро восполняются водоносные горизонты.

В гидрологии для оценки возраста подземных вод используются некоторые присутствующие в них радиоактивные изотопы природного происхождения, такие как тритий ( $^3H$ ), углерод-14 ( $^{14}C$ ) и радиоизотопы



инертных газов. Этот возраст может составлять от нескольких месяцев до миллиона лет.

Поскольку с течением времени происходит распад этих изотопов, их концентрация год от года снижается. Более высокая концентрация означает «более молодую» воду, более низкая — «более старую». Например, подземные воды с поддающимся обнаружению содержанием трития могут иметь возраст до 60 лет, в то время как подземные воды без трития должны быть старше. Тритий используется для определения возраста подземных вод, которые были недавно восполнены, т. е. тех, которые моложе 60 лет, углерод-14 — для вод возрастом до 40 000 лет, а криптон-81 — для вод, возраст которых может составлять до миллиона лет (см. стр. 21).

### Качество воды

Загрязнители поступают в поверхностные и подземные воды из различных источников — сельскохозяйственных, промышленных или связанных с отходами жизнедеятельности человека — или могут появляться естественным образом в результате геохимических процессов, происходящих в водоносных горизонтах. Сельскохозяйственная отрасль, промышленность и домохозяйства производят разные типы загрязнителей. Изучая химический и изотопный состав того или иного загрязнителя, ученые могут определить его происхождение.

Например, распространенным загрязнителем является нитрат-ион ( $\text{NO}_3^-$ ), состоящий из азота и кислорода. Азот имеет два стабильных изотопа разной массы. Эта разница в массе неодинакова для отходов жизнедеятельности человека и для удобрений. В удобрениях используется азот из воздуха, в то время как в организме человека и животных происходит биологический процесс, в результате которого азот преобразуется в другие формы. Таким образом, с учетом различий в массе изотопов могут быть идентифицированы загрязнители, поступившие из разных источников.

Выяснение происхождения загрязнителей — первый шаг на пути к решению проблем качества воды. Данные, которые собирают изотопные гидрологи, полезны для руководителей, занимающихся стратегическим планированием и управлением водными ресурсами.

МАГАТЭ оказывает поддержку ученым со всего мира, содействуя использованию изотопных методов и передавая научные ноу-хау местным специалистам в области водных ресурсов. Чтобы узнать больше о том, как мы это делаем, читайте дальше.

# Аргентина применяет изотопные методы для изучения водных ресурсов

Лаура Хиль

**В** Аргентине, как и во многих других районах мира, существует риск чрезмерной эксплуатации и загрязнения водных ресурсов. Ради их сохранения ученые, вооружившись ядерными технологиями и заручившись поддержкой МАГАТЭ, исследуют невидимые глазу особенности воды.

«Аргентине повезло: в среднем на каждого ее жителя приходится довольно много воды, но территориально эта вода распределяется очень неравномерно, — говорит Даниэль Сисероне, руководитель отдела окружающей среды Национальной комиссии по атомной энергии

(НКАЭ) Аргентины. — В некоторых районах разница между бедностью и благополучием может определяться тем, регулярно ли восполняются запасы воды, которую мы ежедневно потребляем, истощаются ли ее источники и подвержена ли она риску загрязнения».

Лежащая в основе этой работы научная дисциплина называется изотопной гидрологией; по словам профессора геологии и геофизики Университета Юты (Соединенные Штаты) Дугласа Кипа Соломона, она является «одним из самых мощных и надежных инструментов для детального исследования подземных вод».

«Большая часть пригодной для использования пресной воды находится под землей, тогда как большая часть



«Аргентине повезло: в среднем на каждого ее жителя приходится довольно много воды, но территориально эта вода распределяется очень неравномерно. В некоторых районах разница между бедностью и благополучием может определяться тем, регулярно ли восполняются запасы воды, которую мы ежедневно потребляем, истощаются ли ее источники и подвержена ли она загрязнению».

— Даниэль Сисероне, руководитель отдела окружающей среды Национальной комиссии по атомной энергии (НКАЭ) Аргентины)

доступной нам воды — на поверхности, — говорит г-н Соломон, помогающий аргентинским экспертам картографировать водные ресурсы страны, в чем им оказывает помощь МАГАТЭ. — Чтобы правильно управлять этими ресурсами и сохранять их, чрезвычайно важно понимать, как поверхностные и подземные воды взаимодействуют между собой».

### Скрытые запасы

С начала 2016 года аргентинские изотопные гидрологи с помощью МАГАТЭ собирают и интерпретируют данные, поступающие из двух стратегически важных районов страны. Это делается для того, чтобы на основе полученной информации директивные органы могли разработать для этих районов более точные гидрологические модели (т. е. модели управления водными ресурсами).

**Мендоса — район Аргентины, где ученые используют изотопную гидрологию для изучения подземных вод.**

(Фото: Л. Хиль/МАГАТЭ)

Эти два района были выбраны по разным причинам. В первом — засушливой долине Мендоса на западе Аргентины — люди добывают пресную подземную воду из водоносных горизонтов Успальята и Ягуарас, а также из прочих более мелких источников. Властям нужно знать, не истощаются ли эти горизонты и выдержат ли они увеличение интенсивности водопользования.

«Вода нужна нам для всего. Вода — это наш хлеб насущный, — говорит Серхио Сирауки, продающий снаряжение для каякинга и рафтинга в магазине на вершине горы в Успальяте. — Но мы очень хорошо понимаем, что ее запасы небесконечны, поэтому мы должны беречь ее, должны относиться к ней как к сокровищу».

Уже более года аргентинские изотопные гидрологи в сопровождении международных экспертов





### Изотопные гидрологи берут пробы воды в Мендосе на западе Аргентины.

(Фото: Л. Хиль/МАГАТЭ)

и экспертов МАГАТЭ странствуют по горам и равнинам Мендосы, собирая воду из колодцев, озер и рек. Возвращаясь в лаборатории, они интерпретируют результаты, чтобы получить более полную картину состояния водных ресурсов.

«Мы пытаемся понять, как вода перемещается внутри горизонта, как она попадает в реки и сколько ее осталось», — говорит изотопный гидролог Сандра Ибаньес (Университет Куйо, Мендоса), участвующая в проекте технического сотрудничества МАГАТЭ в Аргентине.

Располагая такими данными, директивные органы могут более обоснованно устанавливать правила использования воды для пищевых, сельскохозяйственных и промышленных целей. Например, если становится известно, что поверхностные воды проникают в воды подземные, то правила относительно допустимых уровней загрязнения могут быть ужесточены.

«Когда появятся результаты, мы сможем принять решение о том, какую хозяйственную деятельность развивать в Мендосе», — говорит Хуан Андрес Пина, заместитель директора отдела подземных вод Главного управления Мендосы по вопросам ирригации.

Второй исследуемый район — русло в Лос-Хигантесе, Кордова (примерно в 700 км к западу от Буэнос-Айреса),

где находится старый уранодобывающий комплекс. Здесь осуществляется проект по восстановлению окружающей среды, а изотопные гидрологи участвуют в нем, чтобы больше узнать о качестве подземных вод и о потенциальной опасности их загрязнения.

В рамках проекта МАГАТЭ ученые наблюдают за безопасностью и качеством воды, питающей водохранилище Сан-Роке, откуда снабжается город Кордова.

«Это междисциплинарное и межведомственное исследование поможет властям усовершенствовать концептуальную модель и гидрологическую схему этого района и эффективнее рекультивировать этот участок», — говорит Даниэль Мартинес, геолог и исследователь Национального совета научно-технических исследований (CONICET).

Проекты технического сотрудничества МАГАТЭ имеют большое значение для передачи знаний и технологий национальным и местным учреждениям, считает Рауль Рамирес Гарсиа, начальник секции Департамента технического сотрудничества МАГАТЭ.

«Полученные изотопными методами новые данные помогут контролировать водные ресурсы и позволят принимать такие решения, которые принесут социально-экономические выгоды жителям этих регионов», — говорит г-н Рамирес Гарсиа.

# Сохранить каждую каплю: методы изотопной гидрологии позволяют повысить эффективность управления водными ресурсами в Кувейте

Аабха Диксит

Для оценки имеющихся ресурсов подземных вод и для обеспечения их рационального использования в условиях роста населения засушливые страны, такие как Кувейт, уделяют все больше внимания методам, предусматривающим использование стабильных изотопов.

«В Кувейте нет постоянных рек или озер, и подземные воды являются нашим единственным природным водным ресурсом. В среднем у нас выпадает всего 115 миллиметров осадков в год, а пресноводных водотоков не существует», — говорит Мухаммад ар Рашед, исполнительный директор Центра исследования водных

Ученый из КИНИ использует инкубатор для подготовки проб воды в целях проведения бактериологического анализа. При изучении качества водных ресурсов ключевое значение имеют изотопные методы. (Фото: Д. Кальма/МАГАТЭ)



---

**«Мы вынуждены рассматривать все имеющиеся варианты получения питьевой воды, и в проведении исследований нам помогают изотопные технологии, поскольку они позволяют оценить оптимальность использования водных ресурсов, необходимых для устойчивого развития».**

*— Халед Хади, директор  
Оперативного отдела  
Центра исследования водных ресурсов  
Кувейтского института  
научных исследований*

---

ресурсов Кувейтского института научных исследований (КИНИ). Поэтому эффективная политика управления водными ресурсами имеет жизненно важное значение для обеспечения качества и количества имеющейся воды, необходимой для удовлетворения потребностей населения страны, составляющего более четырех миллионов человек.

Запасы подземных вод Кувейта в основном находятся на севере страны и пополняются в ограниченном объеме, поскольку этих водоносных горизонтов достигает лишь небольшая доля дождевой воды.

Методы изотопной гидрологии входят в число основных научных методов, используемых кувейтскими специалистами для отслеживания движения пресной воды и оценки возраста имеющихся подземных вод. Различные изотопы, содержащиеся в воде, выступают в качестве «меток», которые можно использовать для определения источника, возраста, движения и взаимодействия воды как над землей, так и под ней (дополнительную информацию см. на стр. 4). Полученные данные, наглядно представленные в виде гидрологических карт, позволяют экспертам принимать обоснованные решения относительно устойчивого управления ресурсами. Для обеспечения рационального использования подземных вод в Кувейте г-н ар-Рашед и его коллеги провели несколько изотопных гидрологических исследований.

Кувейт занимает одно из первых мест в мире по объему потребления воды: этот показатель на душу населения превышает 400 литров в день. Уровень забора подземных вод в Кувейте составляет 255 миллионов кубометров в год. Для сравнения: естественный подземный приток в водоносные горизонты оценивается в 67 миллионов кубометров в год. Из-за ограниченности пресноводных ресурсов Кувейт в значительной степени зависит от опреснения морской воды, что является дорогостоящим процессом.

«Мы вынуждены рассматривать все имеющиеся варианты получения питьевой воды, и в проведении исследований нам помогают изотопные технологии, поскольку они позволяют оценить оптимальность использования водных ресурсов, необходимых для устойчивого развития», — говорит Халед Хади, директор Оперативного отдела Центра исследования водных ресурсов КИНИ.

«Усилия страны направлены на изучение ресурсов подземных вод с использованием методов изотопной гидрологии в сочетании с физико-химическими методами, измерение пополнения водоносных горизонтов за счет осадков, разработку оптимальной стратегии водопользования и оценку возможности искусственного пополнения водоносных горизонтов», — отмечает Надер аль-Авади, исполнительный комиссар по международному сотрудничеству КИНИ.

## Исследования по водным ресурсам и лабораторная поддержка

С 2000 года МАГАТЭ оказывает поддержку Кувейту по линии различных проектов технического сотрудничества, что позволяет получить представление об имеющихся ресурсах подземных вод и принять меры по исправлению положения в целях совершенствования политики управления водными ресурсами.

Например, в рамках осуществлявшегося при поддержке МАГАТЭ проекта технического сотрудничества в сфере изотопных исследований, направленного на оценку гидрологии подземных вод в Кувейте, собирались изотопные данные о подземных водах, которые впоследствии были объединены с данными, собранными в ходе предыдущих исследований, имевших целью изотопное картирование подземных вод на всей территории страны. Применение изотопных методов помогло выявить особенности происхождения, возраста и движения подземных вод, что чрезвычайно важно для устойчивого управления водными ресурсами.

В рамках другого проекта с помощью методов изотопной характеристики проводилась оценка потенциальных источников загрязнения кувейтских месторождений подземных вод нитратами и сульфатами. В частности, он предусматривал изучение уровней содержания радиоактивных веществ естественного происхождения в подземных водах. Исследователи обнаружили, что основной источник сульфатов и нитратов в подземных водах имеет природное происхождение, а не является результатом деятельности человека.

Некоторые пробы воды направляются для оценки в Лабораторию изотопной гидрологии МАГАТЭ в Вене (Австрия).

Также МАГАТЭ оказало поддержку в создании в Кувейте лаборатории изотопной гидрологии, оснащенной самым современным оборудованием, предоставленным в рамках проектов технического сотрудничества МАГАТЭ. К другим направлениям, по которым оказывалась помощь в создании потенциала, относились повышение квалификации ученых и проведение исследований по целому ряду вопросов, связанных с подземными водами.

«Правительство Кувейта высоко ценит ту важнейшую роль, которую МАГАТЭ, осуществляя свои мероприятия и оказывая поддержку государствам-членам, играет в содействии созданию потенциала, сетевому взаимодействию, обмену знаниями и налаживанию партнерских связей по различным аспектам использования ядерной науки и ядерных технологий в мирных целях во всех странах», — заявила Самира А.С. Омар, генеральный директор КИНИ.



# Результаты исследования подтверждают: воду в филиппинском городе можно пить

Миклош Гашпар



**Изотопные методы позволили удостовериться в том, что вода в резервуарах за спиной у этих ребят и в новых районах Таклобана пригодна для питья.**

(Фото: М. Гашпар/МАГАТЭ)

Питьевая вода в Таклобане — филиппинском городе с населением 250 тысяч человек — безопасна, ее запасы регулярно пополняются, и им не угрожает проникновение морской воды. Легко и просто? Для подобного утверждения понадобились годы исследовательских работ, анализ тысяч проб воды и применение изотопных методов научными работниками Филиппинского института ядерных исследований (ФИЯИ) при поддержке МАГАТЭ и Продовольственной и сельскохозяйственной организации Объединенных Наций (ФАО).

Когда в 2013 году штормовой прилив, вызванный тайфуном «Хайян» — одним из сильнейших тропических циклонов за весь период наблюдений, — разрушил почти весь город и привел к гибели тысяч людей, местные власти столкнулись с трудной задачей восстановления города, включая переселение жителей из районов, наиболее подверженных затоплению. Но могли ли волны, смывавшие людей и здания, достигнуть городских запасов воды?

Существовала опасность того, что штормовой прилив мог загрязнить водоносный горизонт — подземный слой проницаемой породы, содержащий грунтовые воды, — главный источник питьевой воды в городе. Соль и другие принесенные наводнением загрязнители, включая органические вещества, происходящие от животных и человеческих останков, могли сделать воду непригодной для употребления. В рамках программы технического сотрудничества МАГАТЭ ФИЯИ обратился за помощью в применении изотопных методов для определения характеристик водоносного горизонта.

## Не все молекулы воды одинаковы

Все молекулы воды состоят из одного атома кислорода и двух атомов водорода, но небольшая доля этих атомов содержит в своих ядрах дополнительные нейтроны. Размер этой доли зависит от возраста и источника воды. Таким образом, анализ изотопного состава подземных вод позволяет ученым выяснить, пополняется ли водоносный горизонт, т. е. получает ли он «новые порции» дождевой воды.

Ученые установили 32 станции для мониторинга подземных вод и использовали для определения характеристик воды как обычные, так и ядерные методы. Они обнаружили очень мало натрия и хлоридов, на основании чего был сделан вывод о том, что морская вода в водоносный горизонт не проникла. «Также они выяснили, что изотопный состав воды в горизонте близок к составу дождевой воды, а это значит, что опасность городским запасам воды не угрожает, — пояснил Раймонд Сукганг, старший научный сотрудник ФИЯИ, руководивший проектом. — Таклобан — растущий город с развивающейся экономикой, и отрандно убедиться, что его подземные воды пополняются за счет дождевых осадков».

Концентрация азота и органических веществ в воде очень низкая, что указывает на то, что биологического загрязнения не было. «Потенциальные загрязнители, вероятно, разложились до того, как смогли попасть в подземные воды», — полагает г-н Сукганг.

На следующем этапе проекта ФИЯИ планирует точно определить, какими темпами пополняются водные запасы, и на основании этого выработать рекомендации в отношении политики, следование которой позволит местным властям обезопасить водоснабжение города. «Отрандно было убедиться, что непосредственной опасности нет, но политика устойчивого водоснабжения необходима в любом случае», — добавил г-н Сукганг.

### Поиски питьевой воды под землей

За последние несколько лет в северной части Таклобана вырос новый район, где поселились многие из тех, чьи дома были в 2013 году разрушены тайфуном. Водоснабжение этого района с населением 10 тысяч человек затруднено, а анализы, проведенные ФИЯИ, показали, что подземные воды под недавно построенными жилыми домами загрязнены свинцом и мышьяком, а потому непригодны для употребления. «Причиной загрязнения, вероятно, является стихийная свалка на окраине жилой зоны», — сообщил г-н Сукганг.

Местного жителя и общественного деятеля Эдди Разонабе эта новость сильно расстроила. «Теперь мы знаем, что нам нельзя рассчитывать на колодцы, и сейчас нам приходится

платить за воду. Водяные колонки, установленные при содействии международных гуманитарных учреждений, поднимают воду лишь из неглубокого водоносного горизонта, и от этой воды исходит неприятный запах», — говорит г-н Разонабе. В результате он вынужден покупать минеральную воду для питья и приготовления пищи — ощутимые расходы для отца семерых детей и для многих из его соседей. Но решение было найдено: местные власти заключили договор с частными компаниями на доставку воды из имеющегося в городе незагрязненного водоносного горизонта, при этом ФИЯИ использует изотопы для контроля соответствия добываемой из этих глубоких скважин воды стандартам качества и для обеспечения устойчивого характера добычи.

Проведенный ФИЯИ анализ показал, что Эдди Разонабе не может пить воду из своего колодца из-за высокого содержания в ней свинца и мышьяка. Район, в котором он проживает, был создан для переселения людей, чьи дома были уничтожены тайфуном «Хайян» в 2013 году.

(Фото: М. Гашпар/МАГАТЭ)



# Изотопы помогают отследить источники загрязнения городских водных ресурсов на Маврикии

Лусиана Виегас

Согласно предварительным результатам исследования, проведенного с использованием изотопных методов при поддержке МАГАТЭ, в число источников азотного загрязнения городских водных путей в окрестностях столицы Маврикия Порт-Луи могут входить сельскохозяйственная деятельность, незаконное удаление сточных вод и животноводство. Если некоторые соединения азота, такие как нитраты, накапливаются в чрезмерном количестве, то они могут попасть в городские водные пути и представлять опасность для людей и окружающей среды.

«Загрязнение нитратами является серьезной проблемой в стране, — говорит Янник Фанни, научный сотрудник Национальной экологической лаборатории в Порт-Луи — городе с населением около 200 тысяч человек, являющемся крупнейшим населенным пунктом острова и его экономическим центром. — Проведенное исследование было прорывным, и его предварительные результаты показывают, что загрязнение нитратами, вероятнее всего, происходит из-за навоза и септических отходов, а также из-за растворенных органических веществ в почве».

Азот является одним из основных удобрений и широко используется с середины XX века. Если его вносится слишком много, то он может попасть в реки и подземные воды, причем не только в составе сельскохозяйственных стоков, но и через канализационные системы, из загонов для откорма скота и в результате промышленной деятельности.

Нитраты — это соединения азота, являющиеся важнейшими питательными веществами для растений. В чрезмерных количествах нитраты представляют угрозу для здоровья населения, так как они могут ухудшать способность крови переносить кислород по всему организму. Также они могут вызывать цветение водорослей в озерах и реках, сокращая биоразнообразие и негативно сказываясь на способности водных экосистем поддерживать такие ценные сферы деятельности, как туризм и коммерческое рыболовство.

В 2016 году, после того как власти обнаружили нитратное загрязнение в окрестностях Порт-Луи, ученые начали сотрудничать с МАГАТЭ, чтобы использовать изотопные методы для определения происхождения этого загрязнения. Обнаруженные в ручьях и реках загрязнители поставили под угрозу охраняемые районы, такие как птичий заповедник в устье реки Тер-Руж. Пагубное цветение водорослей в океане приводило к гибели рыбы, на что жаловались местные рыбаки.

Такое загрязнение могло произойти по многочисленным причинам, связанным с ненадлежащими системами удаления бытовых сточных вод, неисправными септиками, промышленными стоками, животноводством и сельскохозяйственной деятельностью. Знание того, кто или что является причиной загрязнения нитратами, может помочь директивным органам принимать обоснованные меры по защите рек и подземных вод.

Выяснить происхождение нитратов в водных путях может быть сложно. «Традиционная химия даст ответ на то, насколько та или иная река загрязнена азотом, но не на то, каков источник этого загрязнения, — говорит изотопный гидролог МАГАТЭ Иоаннис Матиатос. — Такая информация может быть получена благодаря анализу изотопов азота».

Пользуясь технической помощью, ученые из Национальной экологической лаборатории собрали химические и изотопные данные из образцов, полученных на 14 речных станциях и в 15 водяных скважинах по всему городу, и выявили механизмы, влияющие на качество местной воды. При поддержке по линии программы технического сотрудничества МАГАТЭ, которая предусматривала визиты экспертов, подготовку кадров и предоставление оборудования, они взяли пробы азотных соединений в водных путях Порт-Луи и провели их анализ. При изучении изотопного состава молекул воды они использовали метод анализа уникальных «следов» нитратов в этих молекулах (более подробная информация приведена на стр. 5).

## Принятие конкретных мер

Результаты проекта технического сотрудничества МАГАТЭ лягут в основу всеобъемлющего доклада, содержащего выводы и рекомендации не только для государственных должностных лиц, но и для местного населения. «Принятие целенаправленных мер всеми заинтересованными сторонами может помочь быстро исправить или улучшить ситуацию в этих городских районах», — отметил г-н Фанни.

Также это сотрудничество способствовало активизации деятельности по мониторингу водных ресурсов на всей территории Маврикия. Ученые из Национальной экологической лаборатории приступили к картированию районов, являющихся наиболее значительными источниками азотного загрязнения водных путей, и занимаются сбором проб исходных материалов, с тем чтобы составить перечень изотопных сигнатур, позволяющих идентифицировать загрязнители.



Изотопный гидролог берет пробы воды с участка загрязнения, обнаруженного в окрестностях Порт-Луи.

(Фото: Л. Матиатос/МАГАТЭ)

«Если в будущем произойдет какой-либо инцидент, власти смогут быстро сопоставить пробы воды с источниками загрязнения и сразу же выяснить, какой вид деятельности является тому виной», — сообщил г-н Матиатос.

# Использование изотопных методов для картирования и анализа ресурсов подземных вод в Сахеле

Наталья Михайлова

Несмотря на ряд засух и стабильно низкое количество осадков на протяжении последних нескольких десятилетий, в Сахеле имеются значительные водные ресурсы, скрытые под землей.

Увеличение спроса на воду в результате роста численности населения и возникновения факторов неопределенности в отношении водных ресурсов в связи с изменением климата и особенностями землепользования ставит вопрос о том, как обеспечить безопасность и достаточное количество чистой воды для питья, производства продовольствия и санитарных нужд. В полусухих регионах, таких как Сахель, долгосрочный доступ к чистой воде может быть обеспечен с помощью надлежащих научных инструментов, позволяющих получить дополнительную информацию о запасах подземных вод.

В рамках проекта технического сотрудничества МАГАТЭ, осуществление которого началось в 2012 году, ученые из Алжира, Бенина, Буркина-Фасо, Ганы, Камеруна, Мавритании, Мали, Нигера, Нигерии, Сенегала, Того, Центральноафриканской Республики и Чада прошли подготовку по взятию проб воды для изотопного анализа в целях проведения подробного обследования запасов подземных вод. Этот проект охватывал части пяти основных трансграничных систем водоносных горизонтов региона: системы водоносных горизонтов Иуллемеден, системы Липтако-Гурма-Верхняя Вольта, Сенегало-мавританского бассейна, бассейна озера Чад и бассейна Таудени.

В течение четырех лет как в засушливый сезон, так и в сезон дождей из различных водоносных горизонтов было взято более 2000 проб воды.

«Используя изотопные и химические индикаторы, ученые смогли получить важную информацию о происхождении, особенностях течения, продолжительности пребывания и скорости обновления подземных вод, — сообщил работавший над этим проектом профессор Камель Зуари, заведующий лабораторией Национальной инженерной школы Сфакса, Тунис. — Также ученые проанализировали гидравлическое взаимодействие между водоносными горизонтами неглубокого и глубокого залегания и между водоносными горизонтами и поверхностными водами. Эта информация была собрана в специальную базу данных по каждому бассейну». Дополнительные сведения об использованных методах приведены на стр. 4.

По результатам этих исследований появился первый масштабный обзор ресурсов подземных вод в Сахеле на

площади в пять миллионов квадратных километров. «В целом системы водоносных горизонтов, расположенные в различных общих бассейнах, обеспечивают значительный запас воды хорошего качества, позволяющий удовлетворить большинство потребностей человека», — отметил г-н Зуари.

## Использование данных для разработки методов управления водными ресурсами

Ученые из каждой страны подготовили национальные доклады, которые в настоящее время имеются в распоряжении занимающихся водными ресурсами органов власти и могут быть использованы ими для принятия обоснованных решений. Например, в северной части Ганы регулярный мониторинг химического и изотопного состава подземных вод позволил выявить механизмы их пополнения и источники загрязнения, которые ранее не учитывались.

«Используя стабильные изотопы воды — кислород-18 и водород-2, — мы выяснили, что подземные воды являются метеорными, т. е. их источником являются местные осадки», — сообщил Энох Асаре, начальник Отдела подземных вод Комиссии по водным ресурсам Ганы. Он добавил, что, согласно данным тритиевого анализа, в течение последних 50 лет водоносный горизонт пополнялся подземными водами. «Для определения источников загрязнения нитратами, зафиксированного в некоторых частях бассейна реки Белая Вольта, был использован азот-15, и выяснилось, что это загрязнение было вызвано главным образом отходами жизнедеятельности человека и животных». Выявление источника загрязнения может помочь властям защитить водные ресурсы, поскольку в результате появляется понимание того, как подземные воды пополняются, что является ключом к обеспечению их устойчивости.

Возможность удовлетворения потребностей человека за счет ресурсов подземных вод зависит от их количества, качества и темпов пополнения. Для надлежащей оценки устойчивости ресурсов, особенно с учетом текущих или планируемых мероприятий по водозабору, необходима информация об источнике и возрасте подземных вод.

«Ожидается, что деятельность в рамках проекта позволит расширить возможности заинтересованных сторон, с тем чтобы они лучше понимали гидрогеологическую систему Ганы и могли разработать политику, гарантирующую постоянную эксплуатацию ресурсов подземных вод и обеспечивающую доступность воды в любое время», — отметил г-н Асаре.



**Исследователи из Университета Банги берут пробы воды из колодца в Центральноафриканской Республике.**

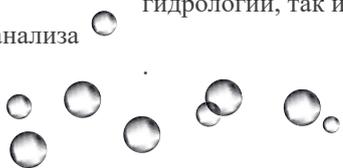
(Фото: Л. Хиль/МАГАТЭ)

В 2018 году началось осуществление последующего проекта, направленного на дальнейшую интеграцию управления ресурсами подземных вод в странах Сахеля. В рамках этого проекта, реализуемого под руководством Бенина, Ганы, Камеруна, Нигера и Нигерии, будет использоваться методология «МАГАТЭ — улучшение водообеспеченности» (IWAVE), которая позволит выявить пробелы в национальной гидрологической информации и разработать соответствующие планы создания потенциала.

Методология IWAVE предусматривает проведение анализа пробелов и консультирование с заинтересованными

сторонами, разработку оптимальной стратегии управления ресурсами подземных вод и определение направлений инвестирования в целях развития основных технических возможностей.

Созданная сеть национальных учреждений будет способствовать улучшению категоризации ресурсов подземных вод, управления ими и их мониторинга, для чего будут использоваться как методы изотопной гидрологии, так и традиционные методы.





## Глобальная сеть «Изотопы в осадках»

С 1961 года МАГАТЭ и Всемирная метеорологическая Организация (ВМО) совместно проводят всемирное обследование изотопов водорода ( $^2\text{H}$ ,  $^3\text{H}$ ) и кислорода ( $^{18}\text{O}$ ) в осадках.

Эта сеть мониторинга изотопов называется Глобальной сетью «Изотопы в осадках» (ГСИО). Ее первоначальная цель заключалась в том, чтобы в глобальном масштабе осуществлять систематический сбор базовых данных о содержании изотопов в осадках и тем самым определять временные и пространственные изменения в количестве природных изотопов в осадках. Имея такую информацию, ученые могут определить происхождение, особенности движения и историю воды. Для поддержки этой работы МАГАТЭ создало Лабораторию изотопной гидрологии.

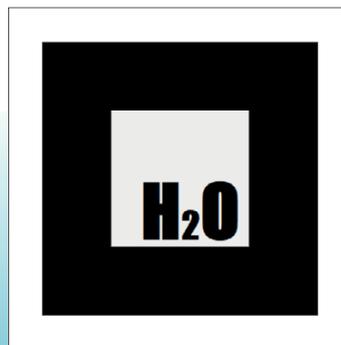
В результате начали поступать базовые изотопные данные, используемые при проведении гидрологических исследований. Начиная с 1990-х годов исследователи и специалисты-практики со всего мира имеют доступ к этим данным в режиме онлайн. Сейчас они используются для изучения водных ресурсов, а также для толкования климатических данных, относящихся к прошлым периодам, и для анализа миграции животных.

В настоящее время в состав ГСИО входят более 350 действующих пунктов отбора проб в более чем 90 странах и территориях. Хотя Лаборатория изотопной гидрологии МАГАТЭ по-прежнему играет одну из ключевых ролей в анализе проб осадков, собранных в рамках ГСИО, в выполнение этой сложной аналитической работы вносят вклад более 60 лабораторий, некоторые из которых были созданы по линии проектов технического сотрудничества МАГАТЭ.

МАГАТЭ в интересах ГСИО ведет центральную базу данных, в которой содержится более 130 000 записей с данными по изотопному составу осадков из более чем тысячи мест. Также Агентство активно участвует в исследованиях и разработках, помогая ученым собирать пробы осадков. Например, оно разработало пробоотборник осадков с защитой от испарения, который является надежным и простым в использовании и требует меньше предварительной подготовки в лаборатории.

Собранные ранее и новые данные из базы данных ГСИО используются для верификации и дальнейшего совершенствования моделей климатических прогнозов (см. стр. 24), а также для других целей.

С более подробной информацией можно ознакомиться по ссылке: [h2o.iaea.org](http://h2o.iaea.org)



# ГСИО

в цифрах



# Управление водным балансом при помощи метода анализа содержания трития/гелия-3

Николь Яверт

Управление водными ресурсами похоже на управление денежными средствами на вашем банковском счете: вам нужно точно знать, сколько денег поступит, сколько вы можете потратить и что может это изменить. Какой-либо просчет может иметь серьезные и, возможно, долгосрочные последствия. Применительно к воде это может означать нехватку водных ресурсов или их загрязнение и непригодность для использования.

Чтобы правильно свести водный баланс, крайне важно, в частности, знать точный возраст воды. В отношении молодой воды, которая с большей вероятностью может быть подвержена воздействию текущих климатических условий и загрязнению, ученые используют метод анализа содержания трития/гелия-3. Применяя этот и другие методы, ученые из 23 стран сотрудничают с МАГАТЭ в деле сбора данных о водных ресурсах.

«Возраст воды говорит о том, откуда она, скорее всего, взялась, как быстро она пополняется и насколько вероятно ее загрязнение, — сообщил Хамид Марах, научный директор Национального центра ядерной энергии, науки и технологии Марокко (CNESTEN). — Благодаря методу анализа содержания трития/гелия-3 мы можем сказать, что возраст воды составляет 1 год, 5 или 25 лет, а не просто заявить, что она молодая, старая или смешанная».

Возраст воды может варьироваться от нескольких месяцев до миллионов лет. Например, если воде один год, то

это означает, что для ее пополнения потребуется один год и что она со значительно большей вероятностью может быть подвержена воздействию текущих климатических условий и загрязняющих веществ. Если воде 50 000 лет, то на ее пополнение уйдет 50 000 лет, и она с меньшей вероятностью будет загрязнена или затронута текущими климатическими изменениями.

Почти все имеющиеся в мире запасы пресной воды сосредоточены в водоносных горизонтах, которые представляют собой пористые слои проницаемых пород под поверхностью земли. Содержащаяся в них вода называется подземной водой. По мере своего пополнения подземные воды попадают в море или выходят на земную поверхность естественным путем в виде рек, родников и озер.

«Растущий спрос на подземные воды в сочетании с воздействием сельского хозяйства, изменения климата и деятельности человека делает проблему устойчивости еще более важной, — отметил г-н Марах. — Если из водоносного горизонта извлекать слишком много воды, то уровень воды падает, что может иметь катастрофические последствия. Речь не идет об одном или двух десятилетиях: последствия могут ощущаться на протяжении поколений».

Метод анализа содержания трития/гелия-3 является одним из наиболее распространенных методов изучения молодой воды, возраст которой составляет менее 60 лет (см. вставку «Наука».) Данные, собранные в ходе этих исследований, могут помочь директивным органам в разработке более предметных и устойчивых стратегий и принципов управления водными ресурсами.

«Использование ядерных методов для изучения водных ресурсов разрушает устоявшиеся парадигмы и меняет наше классическое понимание основных факторов, лежащих в основе гидрологических процессов, — заявил Рикардо Санчес-Мурильо, специалист по изотопной гидрологии и доцент Национального университета Коста-Рики. — Например, в Коста-Рике результаты, полученные благодаря использованию изотопных методов, находят отражение в планах управления водными ресурсами и принимаемых решениях в этой сфере, помогая стране в достижении к 2030 году цели 6 в области устойчивого развития, касающейся водных ресурсов».

## Более точный баланс

В последнее десятилетие метод анализа содержания трития/гелия-3 приобретает все большую актуальность, поскольку прежние методы, предусматривающие использование одного трития, становятся менее полезными.

«Тритий позволяет нам узнать о возрасте подземных вод и о том, пополняются ли они, что является очень важной информацией, однако один тритий не может дать нам

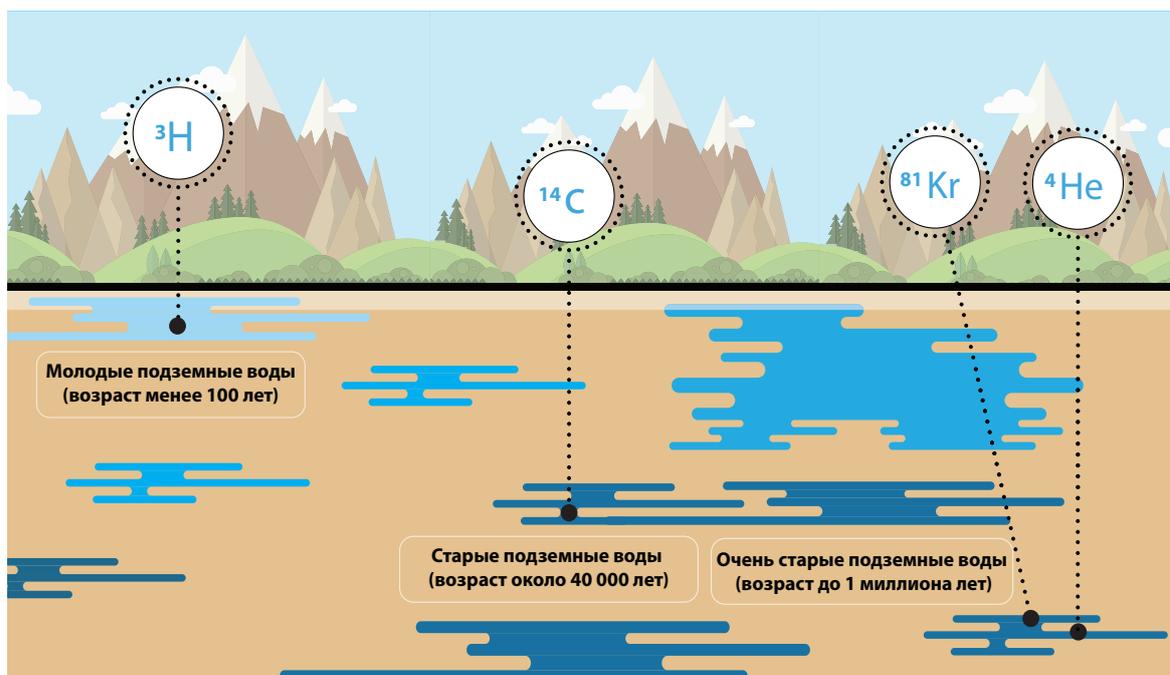


Ученые используют изотопные методы для определения возраста и происхождения воды из источников на севере Марокко.

(Фото: CNESTEN)

Для оценки возраста подземных вод могут использоваться природные радиоактивные изотопы, присутствующие в воде, такие как тритий ( $^3\text{H}$ ) и углерод-14 ( $^{14}\text{C}$ ), и изотопы инертных газов, растворенные в воде, такие как криптон-81 ( $^{81}\text{Kr}$ ).

(Изображение: МАГАТЭ)



нужный уровень детализации. Директивным органам необходимо знать больше: что значит “молодая вода”? Насколько она молода?» — отметил г-н Марах. Поскольку в 1950-х годах проходили атмосферные испытания термоядерных устройств, в 1960-х годах уровень содержания трития в атмосфере резко вырос и с тех пор постепенно снижается. «С 1960-х по 1990-е годы тритий был хорошим индикатором, но сегодня в атмосфере стало меньше трития, поскольку он распадается до гелия-3, поэтому сейчас мы уделяем больше внимания соотношению трития и гелия-3, которое дает значительно более точную информацию».

Гелий является инертным газом, т. е. он устойчив и не вступает в химические реакции с другими элементами, присутствующими в породах или воде. Это делает его постоянным и надежным ориентиром. Зная концентрацию гелия, происходящего из трития — гелия-3, — и сравнив ее с общей концентрацией гелия в воде, а также с концентрацией других инертных газов, ученые могут определить точный возраст молодой воды.

«Использование инертных газов для исследования воды становится все более распространенным, поскольку

в настоящее время аналитические приборы являются достаточно точными для того, чтобы улавливать очень малые количества этих газов, — отметил Такуя Мацумото, специалист по изотопному анализу МАГАТЭ. — Однако для многих стран создание своих собственных лабораторий для проведения таких анализов не является экономически целесообразным или возможным. Благодаря Лаборатории изотопной гидрологии МАГАТЭ страны получают доступ к этой услуге и могут воспользоваться преимуществами, которые дает этот сложный метод».

Лаборатория изотопной гидрологии МАГАТЭ является одной из очень немногих лабораторий в мире, способных проводить такие анализы. Начиная с 2010 года группа экспертов МАГАТЭ и внешних экспертов из десяти стран в течение шести лет занималась установкой, калибровкой и тестированием масс-спектрометра МАГАТЭ, а также математической модели для анализа получаемых результатов. Кроме того, они разработали руководство по использованию метода анализа содержания трития/гелия-3. С тех пор лаборатория работает в круглосуточном режиме, ежегодно обрабатывая от 300 до 400 проб из разных стран мира.

## НАУКА

Тритий является одним из трех изотопов водорода. Будучи радиоактивным изотопом, тритий с течением времени распадается и превращается в гелий-3 — стабильный изотоп, не подверженный распаду. Ученые знают, что распад половины атомов трития в воде до гелия-3 занимает около 12 лет.

Для сортировки изотопов по массе и определения их концентраций ученые используют специальный аппарат, называемый масс-спектрометром. Зная эти концентрации и время, необходимое для превращения трития в гелий-3, ученые могут отслеживать и определять возраст воды и периодичность ее пополнения.



# Гидроразрыв пласта: оценка воздействия на окружающую среду с помощью методов изотопной гидрологии помогает сохранить грунтовые воды

Миклош Гашпар

Любая производственная деятельность, осуществляемая вблизи водных ресурсов, способна, в принципе, привести к их загрязнению. Для контроля качества воды и отслеживания источника загрязнения, если таковое обнаружено, можно воспользоваться уникальным набором методов, которые предлагает изотопная гидрология. Все больше стран в мире прибегают к помощи этих методов для охраны поверхностных и грунтовых вод вблизи площадок, где ведется добыча нефти способом гидравлического разрыва пласта.

Технология гидроразрыва пласта, или ГРП, позволяет извлекать ранее недоступные запасы нефти и природного газа. Таким способом добывается почти половина всей нефти в США; помимо этого, возможность его внедрения рассматривают многие развивающиеся страны.

ГРП является способом интенсификации притока в скважину, при котором за счет закачивания туда жидкости под высоким давлением происходит растрескивание породы. Жидкость для гидроразрыва пласта состоит из смеси воды, песка и ряда химических добавок. В процессе закачивания в скважину она приводит к образованию в глубоко залегающих формациях трещин, через которые с большей интенсивностью могут поступать нефть и природный газ. Этот способ позволяет вскрыть залежи нефти и газа, заключенные в пласты породы с малой проницаемостью и не доступные для традиционных методов бурения и откачивания.

В результате утечек в процессе гидроразрыва пласта или случайного сброса жидкости из шламоборника, в который она собирается после извлечения из скважины, возможно загрязнение поверхностных вод; в случае, скажем, заброшенной скважины или скважины с течью может происходить миграция жидкости для гидроразрыва пласта и загрязнение грунтовых вод; а если природный газ попадет в неглубокие водоносные горизонты, то также могут быть загрязнены источники питьевой воды.

Дженнифер Макинтош, профессор кафедры гидрологии и науки об атмосфере в Аризонском университете (США), говорит, что во многих случаях, когда возникает подозрение на загрязнение вод, из-за отсутствия исходных данных установить источник и масштаб такого загрязнения бывает затруднительно. «У научного сообщества есть возможность представить рекомендации по наиболее подходящим аналитическим методам для оценки загрязнения грунтовых вод в результате непредусмотренного поступления газа или обводнения пласта жидкостью для гидроразрыва», — поясняет она.

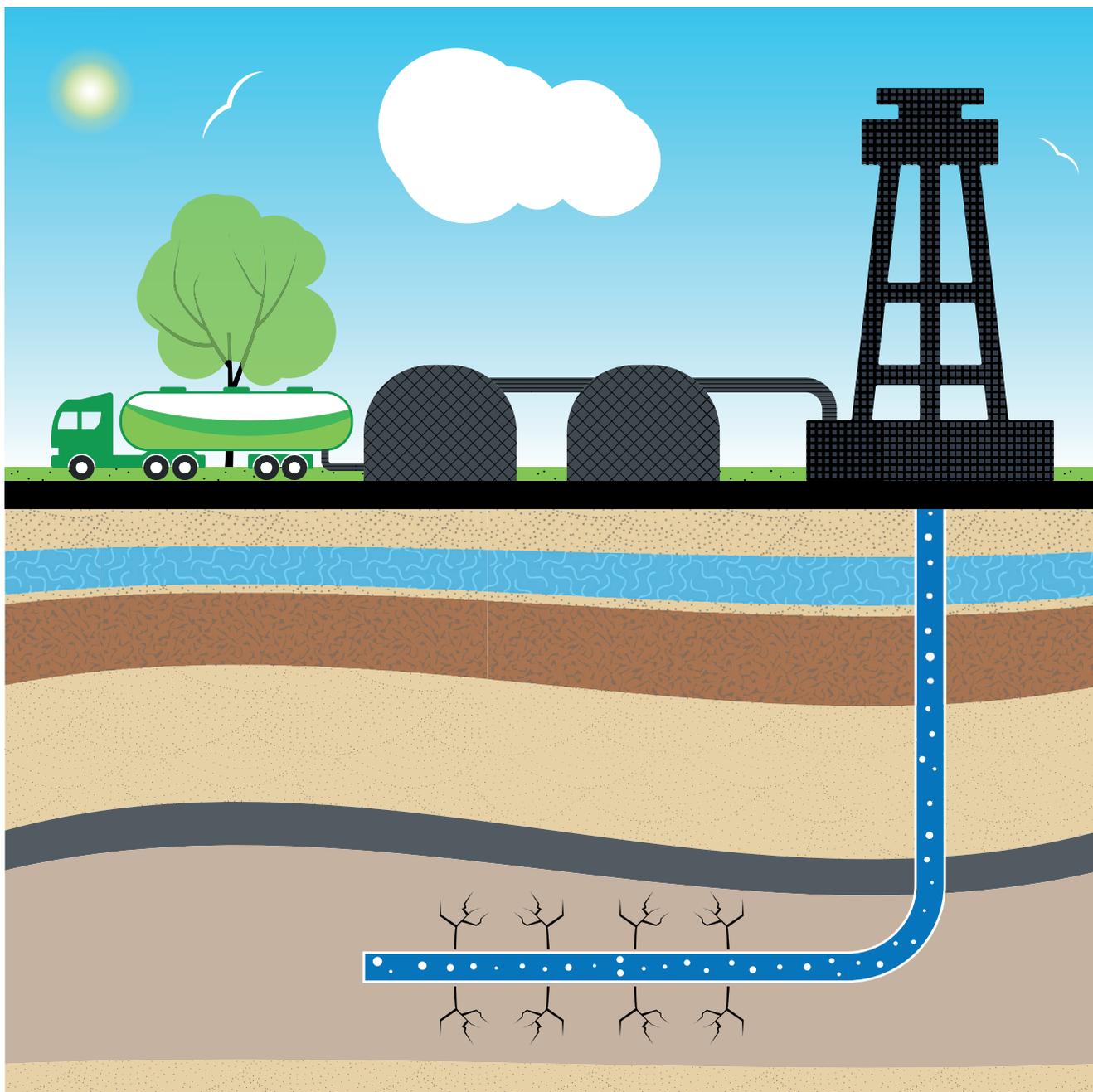
## На помощь приходит изотопная гидрология?

В недавно вышедшей статье за авторством г-жи Макинтош и 14 других ученых из ведущих университетов мира объясняется, как для мониторинга воздействия ГРП на грунтовые и поверхностные воды могут применяться те или иные методы изотопной гидрологии. В статье также содержатся рекомендации по выбору конкретных методов с учетом различных обстоятельств и условий внешней среды. Исходными идеями для данной статьи, которая была опубликована в декабре 2018 года в журнале «Environmental Science and Technology» под заголовком «Критический обзор современных и перспективных подходов к выявлению проникновения в водоносные горизонты газов и сопутствующих загрязнителей в результате ГРП», послужили материалы состоявшегося за два года до этого технического совещания в МАГАТЭ.

В числе эффективных аналитических способов выявления источников загрязнения можно упомянуть последние аналитические разработки, основанные на использовании естественных изотопных индикаторов в углеводородах, массивов высокоразрешающих данных по распределению природного газа и сопутствующих жидкостей от поверхности до целевых пластов, а также использование геохимических и микробиологических методов контроля инертных газов в рамках более традиционных гидрогеологических и геохимических подходов.

В грунтовых водах могут естественным образом встречаться такие вещества, как радиоактивные материалы или соли природного происхождения, однако их присутствие может также являться и следствием загрязнения. Чтобы распознать такие источники излучения, можно прибегнуть к помощи изотопной гидрологии. Изотопный состав источника зависит от природы его происхождения: сведения о происхождении воды и растворенных в ней компонентов можно получить путем измерения концентрации микроэлементов, присутствия в воде стабильных изотопов и растворенных компонентов, а также радиоактивных изотопов йода, радона и стронция. В дополнение к традиционным химическим методам анализа ионов, это позволяет установить происхождение воды и содержащихся в ней веществ — которые могут естественным образом присутствовать в окружающей среде, либо попасть в воду в результате ГРП или иной деятельности человека.

Для того, чтобы определить характеристики водной среды на исследуемом участке до его разбурирования, желательно до начала работ по гидроразрыву пласта провести исследование фонового содержания изотопов в почве и поверхностных водах. Затем, как поясняет



Гидравлический разрыв пласта, или ГРП, является способом интенсификации притока в скважину, при котором за счет закачивания туда жидкости под высоким давлением происходит растрескивание породы, что позволяет извлекать запасы нефти и газа. При этом специалисты по изотопной гидрологии могут контролировать качество грунтовых вод и отслеживать источник загрязнения, если таковое обнаружено.

г-жа Макинтош, подозрения на загрязнение в результате ГРП можно подтвердить или опровергнуть путем сравнения с фоновой пробой, используя изотопные методы.

Новый комплексный метод изотопного анализа, который основан на использовании так называемых «слипшихся изотопов» в метане, позволяет ученым определять положение изотопов водорода в молекуле метана относительно его единственного атома углерода. Исходя из этого, можно точно установить, из каких залежей проникли в воду газовые примеси, либо определить, поступил ли метан из глубинных очагов теплообразования или естественным образом образовался в водоносном горизонте в результате жизнедеятельности почвенных бактерий, или же имеет смешанное происхождение. «Новые радиоиндикаторы возраста грунтовых вод, такие

как криптон-81 и изотопы аргона, помогают нам понять, как долго могут присутствовать в месторождениях питьевых подземных вод загрязняющие вещества, образующиеся вследствие ГРП и добычи нефти и газа», — говорит г-жа Макинтош.

В заключительной части статьи содержатся рекомендации по разработке поэтапной программы для выявления загрязнения. Предложен стратегический план действий, на основе которого сотрудники регулирующих органов могут выбрать наиболее подходящий для условий конкретной площадки метод изотопного гидрологического анализа.

Как добавляет г-жа Макинтош, некоторые из подходов, разработанных для определения загрязнения вод в результате ГРП, имеют более широкие возможности применения, например, для изучения возможностей подземного хранения углекислого газа и захоронения радиоактивных отходов. Бюллетень МАГАТЭ, апрель 2019 года | 23

# Взгляд на будущее водных ресурсов и последствия изменения климата

Николь Яверт

Как изменение климата может отразиться на состоянии мировых запасов воды через сто лет? Чтобы дать ответ на подобные вопросы, ученые прибегают к помощи научных моделей. Одной из них является разработанная МАГАТЭ изотопная модель водного баланса, благодаря которой специалисты могут с достаточной точностью и надежностью прогнозировать воздействие изменения климата на водные ресурсы в далеком будущем. Собранные ими информация может быть полезной для директивных органов при разработке стратегий устойчивого водопользования для будущих поколений.

Подобные модели основываются на имеющихся данных и применяются для изучения и осмысления гипотез, объектов и процессов, непосредственное наблюдение за которыми может быть затруднительно. Это относится и к предварительным расчетам, таким как прогноз погодных условий на ближайшую неделю или оценка показателей безработицы в течение следующих пяти лет. Хотя модель по сути является более общей и упрощенной картиной реального мира, каждая ее составляющая тщательно калибруется, чтобы обеспечить точное представление происходящих в реальности процессов.

Модели водного баланса описывают гидрологический цикл с точки зрения процессов выпадения атмосферных осадков, суммарного испарения, речного стока и изменения объема водных запасов. В отличие от многих традиционных моделей водного баланса, калибровка и верификация модели МАГАТЭ выполняется на основе данных об изотопах, так как изотопы характеризуются отчетливо выраженными свойствами и постоянством поведения (см. стр. 4). Опираясь на тщательно откалиброванную и верифицированную модель водного баланса, ученые могут получить точную оценку тех процессов, которые будут происходить в будущем, например, воздействие изменения климата на водные ресурсы через сто лет и более.

## Точные долгосрочные прогнозы

«Для любой страны и климатической зоны важна точность долгосрочных исследований водных ресурсов, ведь пере- или недооценка доступных запасов воды в будущем может иметь негативные последствия», — говорит Десси Нидав Абтемариам, доцент Университета Аддис-Абебы (Эфиопия).

«Например, если мы неправильно спрогнозируем скорость восстановления запасов воды и, допустим, наша оценка окажется завышенной, то, попав в распоряжение директивных органов, эти результаты могут спровоцировать принятие решений, из-за

которых истощение подземных вод будет происходить быстрее, чем их пополнение», — поясняет он.

Подземные воды — то есть запасы воды в толще проницаемой породы ниже поверхности земли — являются для большей части населения Эфиопии основным источником питьевой воды. Как добавляет г-н Абтемариам, «это приведет к резкому сокращению доступных запасов подземных вод, в результате чего некоторые скважины могут быть заброшены, и даже может возникнуть дефицит питьевой воды».

Недооценка запасов, с другой стороны, может подразумевать установление излишне строгих правил водопользования или влиять на решения по развитию территорий, например, сдерживать рост городов по причине недостаточности водных ресурсов.

По словам Триши Стаднок, доцента кафедры гидротехники в Университете Манитобы (Канада), в контексте долгосрочных исследований с временным горизонтом в 100 лет и более получение точных результатов с помощью других моделей водного баланса всегда представляло значительную сложность. «Многие модели водного баланса очень хорошо воспроизводят сток воды в ручьях, реках и других водных объектах, но при этом дают очень плохое представление об объемах суммарного испарения, — уточняет она, говоря об испарении воды с поверхности суши, а также о ее возвращении в атмосферу в процессе дыхания растений. — Это серьезная проблема при составлении прогнозов об изменении климата, ведь суммарное испарение является одним из ключевых факторов».

По мере повышения температур вследствие изменения климата увеличивается и величина суммарного испарения. Соответственно, чем больше величина суммарного испарения, тем меньше воды остается на поверхности суши, и наоборот. Это, в свою очередь, влияет на весь годовой гидрологический цикл и может спровоцировать возникновение не поддающихся прогнозированию экстремальных условий, когда недостаток воды приводит к засухам, а ее переизбыток — к наводнениям.

От подобных изменений не застрахован ни один климатический регион. Так, например, они могут затрагивать климат такой страны, как Канада, где более 60% массива суши находится в условиях вечной мерзлоты — то есть замерзшего грунта — и где отчетливо выделяются четыре времени года, либо такой страны, как Эфиопия, где большая часть территории находится в зоне тропического климата и на протяжении всего года держится более-менее постоянная температура.



**Благодаря разработанной МАГАТЭ изотопной модели водного баланса специалисты могут с достаточной точностью и надежностью прогнозировать воздействие изменения климата на водные ресурсы в далеком будущем.**

(Фото: Л. Торо/МАГАТЭ)

Все эти разнообразные условия могут быть учтены путем корректировки модели, что делает ее применимой в глобальном масштабе. В настоящее время ученые из ряда стран сотрудничают с МАГАТЭ для прохождения обучения и получения поддержки в том, что касается применения разработанной Агентством изотопной модели водного баланса и других моделей для улучшения управления водными ресурсами. Например, в Эфиопии стартует рассчитанный на три года проект технического

сотрудничества по изучению Верхнеавашского бассейна — крупного массива подземных вод, который служит источником питьевой воды для более чем 2,6 млн человек. Другие страны, такие как Канада, развертывают сети станций по отбору проб для изотопного анализа или уже завершили их создание. Благодаря данным сетям можно повысить точность моделирования с помощью таких инструментов, как модель МАГАТЭ.

## Изотопная модель водного баланса, разработанная МАГАТЭ

Ученые используют разработанную МАГАТЭ изотопную модель водного баланса для имитации и оценки долгосрочного влияния климатических изменений на движение и доступность воды на протяжении всего гидрологического цикла — из атмосферы, на поверхность земли, под землю и далее по кругу. Для улучшения калибровки и обоснования адекватности модели в ней учитывается массовое соотношение изотопов для каждого компонента водного баланса с шагом в один месяц.

Программная реализация модели, которая была впервые представлена в 2015 году, имеет удобный пользовательский интерфейс и основана на ПО с открытым исходным кодом, включает инструменты предварительной обработки, моделирования и анализа для упрощения загрузки данных, визуализации и анализа результатов. В ней предусмотрена поддержка различных локальных и глобальных массивов данных, относящихся, в том числе, к климату, растительности, осадкам, водному стоку, топографии и почвенному составу. Используемые для калибровки модели и обоснования ее результатов изотопные данные, как правило, основываются на локально собранных данных, а также на данных из глобальных репозиториях, таких как созданные МАГАТЭ Глобальная сеть «Изотопы в осадках» (ГСИО, см. стр. 18) и Глобальная сеть по изотопам в реках (ГСИР).



# Исследователи держат марку

## МАГАТЭ проверяет качество исследований проб воды в лабораториях

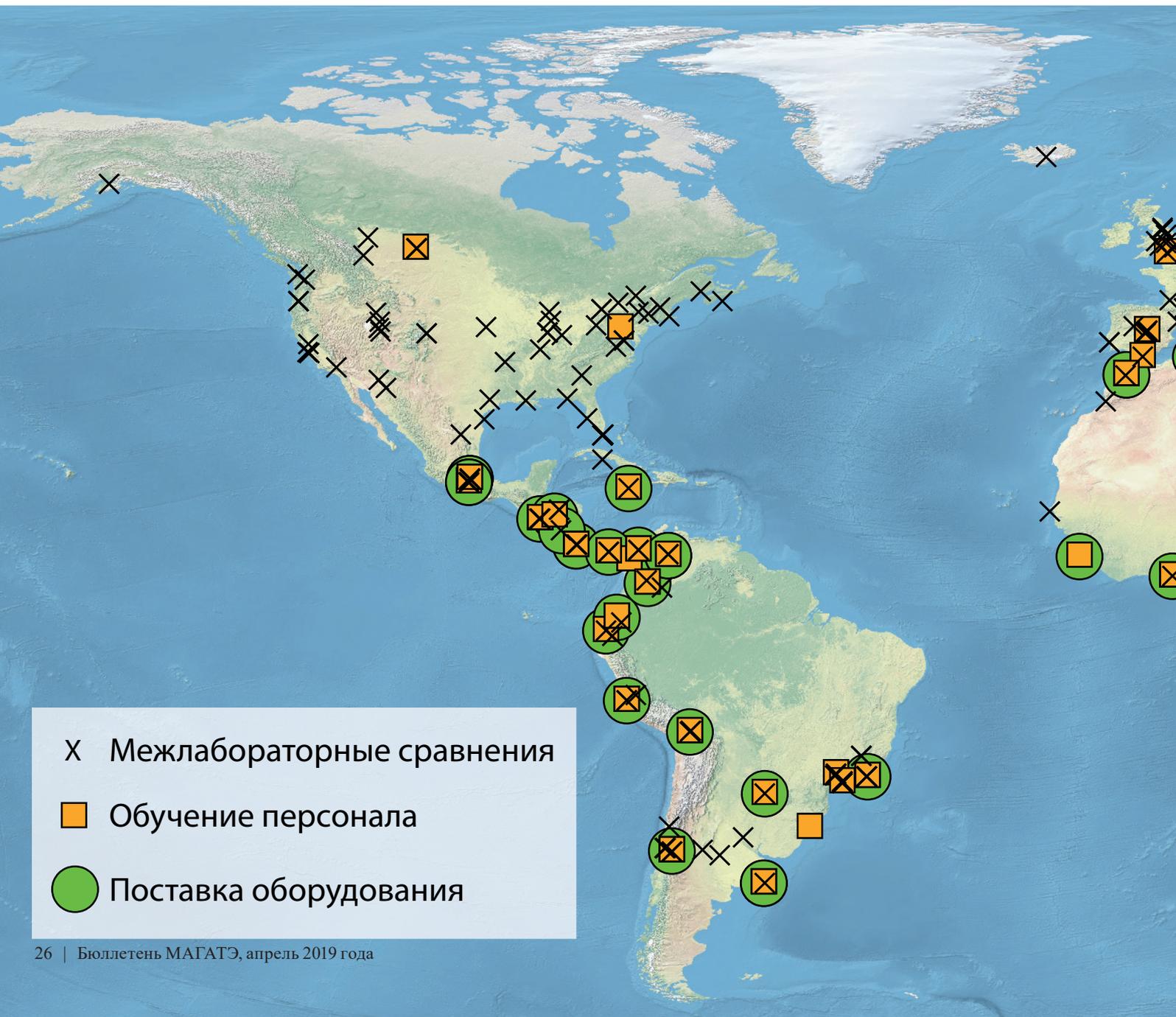
Лаура Хиль

Отлично, хорошо, под вопросом или неприемлемо: как можно охарактеризовать точность химического анализа воды? В научном мире для ответа на этот вопрос разумно прибегнуть к сравнению. На протяжении вот уже 30 лет МАГАТЭ сравнивает между собой результаты исследований в области изотопной гидрологии, полученные в сотнях различных лабораторий, и выступает в качестве всемирного центра по организации аттестационных испытаний в области изотопной гидрологии.

«Точность измерений является ключевым аспектом для любой научной дисциплины, — считает Луис Гонсалес

Ита, лаборант-гидролог из Мексиканского института гидротехники. — Это справедливо и для изотопной гидрологии. Если мы можем гарантировать правильность и достоверность наших данных, то наши доводы весьма убедительны для директивных органов».

Изотопная гидрология — это научная дисциплина, изучающая водные ресурсы с привлечением изотопных данных. Такие исследования дают важную информацию для разработки стратегий и политических мер по охране вод. Примерно раз в четыре года более 300 лабораторий изотопной гидрологии принимают



X Межлабораторные сравнения

■ Обучение персонала

● Поставка оборудования

участие в организуемых МАГАТЭ международных аттестационных испытаниях в форме межлабораторного сравнения.

Сравнение данных, полученных при анализе контрольных проб МАГАТЭ, которые включают в себя широкий спектр проб воды из разных регионов мира, помогает персоналу лабораторий выявить и устранить недочеты в своей аналитической работе. Таким образом, они могут быть уверены в том, что раз от разу получают верные и точные данные.

Сегодня регулярные перекрестные сравнения приобретают еще большую важность: технологии быстро совершенствуются, благодаря чему методы и приборы изотопной гидрологии становятся более дешевыми и доступными. Хотя доступность технологий имеет свои преимущества, она приводит к повышенному

рisku ошибки, так как новички в данной области зачастую не обладают высоким уровнем подготовки.

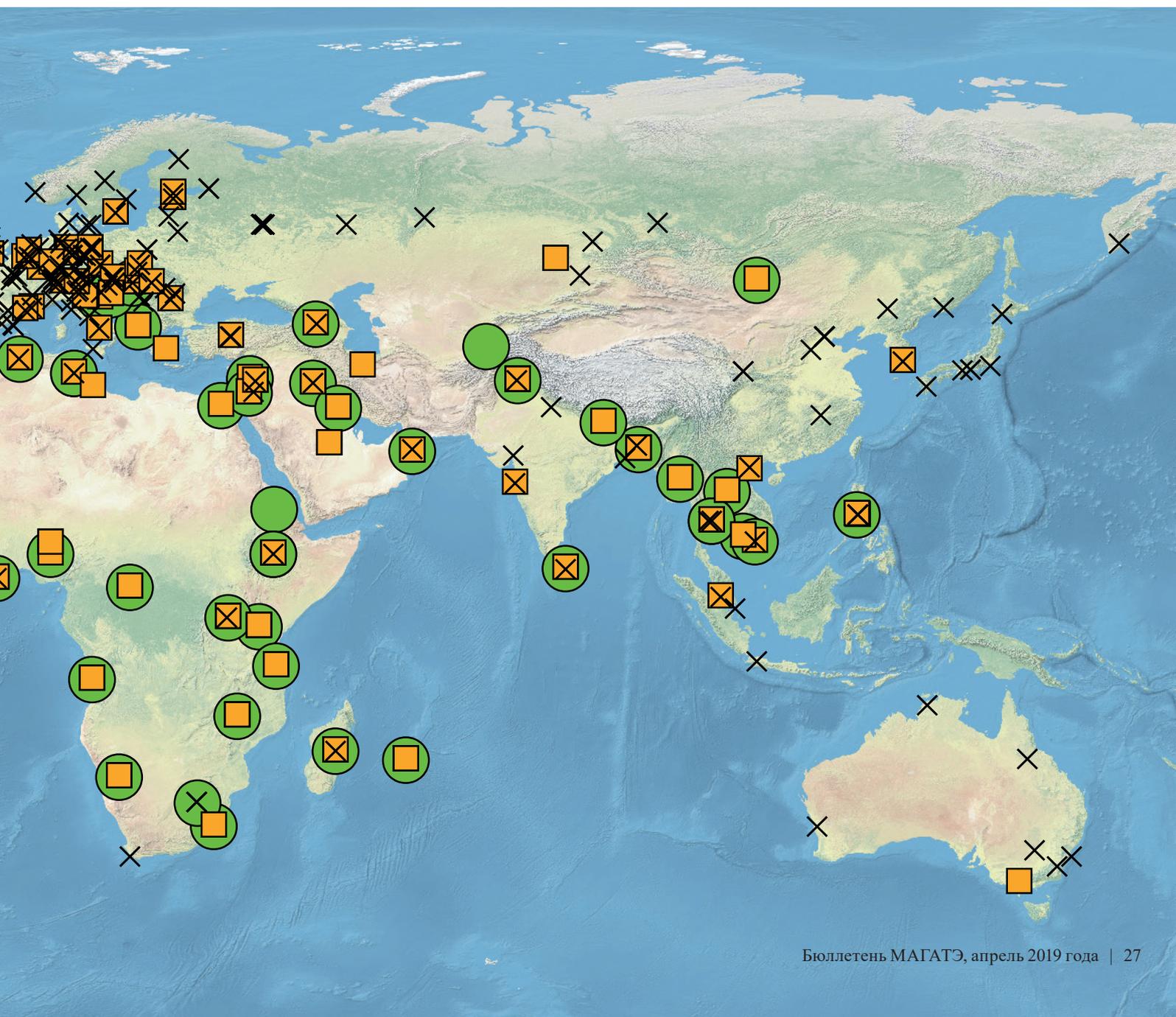
«В наши дни, особенно при использовании лазерных методов, большую часть работы выполняет техника, — говорит г-н Гонсалес Ита. — Это подразумевает, что при проведении исследований ученые все больше полагаются на методику, нежели чем на свою квалификацию».

### На пути к высоким достижениям

Существуют два проекта по сравнению возможностей лабораторий. Одним из них является межлабораторное сравнение содержания изотопов в пробах воды (WICO), в рамках которого проверяется способность лабораторий измерять содержание в воде дейтерия ( $^2\text{H}$ ) и кислорода-18 ( $^{18}\text{O}$ ). Располагая точными данными о содержании

**На карте показаны города, с 2016 года принимающие участие в межлабораторных сравнениях (WICO и TRIC), а также регионы, где с 2007 года Агентство проводит обучение специалистов в области изотопной гидрологии и куда с 2007 года безвозмездно поставляет приборы для изотопной лазерной спектроскопии в рамках программы технического сотрудничества МАГАТЭ.**

(Источник: МАГАТЭ)



этих изотопов, ученые могут определить возраст и происхождение воды (подробнее см. на стр. 4).

В рамках другого проекта — взаимного сравнения содержания трития (TRIC) — проверяется способность лабораторий измерять содержание в воде такого естественного радиоизотопа, как тритий ( $^3\text{H}$ ). Данные о содержании трития используются для анализа скорости пополнения запасов воды и изучения водных масс возрастом менее 60 лет (см. стр. 4). Проект TRIC позволяет оценить, насколько точными и правильными являются выполненные измерения. Последний учебный эксперимент TRIC состоялся в 2018 году и собрал рекордное количество участников — 90 лабораторий.

«Устроены эти проекты межлабораторного сравнения довольно просто, — объясняет Леонард Вассенаар, руководитель Лаборатории изотопной гидрологии МАГАТЭ, находящейся в Вене, Австрия. — Здесь мы подготавливаем и тщательно проверяем пробы воды, а потом отправляем их в каждую лабораторию. Там проводят анализ и высылают нам свои результаты, которые мы затем сравниваем с контрольными значениями, полученными в МАГАТЭ. В конечном итоге мы сводим все результаты в анонимной форме в общий доклад для научного сообщества и одновременно направляем отдельно в каждую лабораторию подробные доклады, где содержатся предложения и рекомендации по улучшению их работы».

В докладах, выпускаемых МАГАТЭ после каждого учебного эксперимента, представлены подкрепленные фактами рекомендации, которые помогают лабораториям совершенствовать применяемые методы и повышать эффективность работы. Кроме того, на их основе эксперты МАГАТЭ могут выявлять недостатки и в дальнейшем оказывать целевую помощь, в том числе обучение лабораторного персонала в рамках программы технического сотрудничества МАГАТЭ.

## Проверка бдительности

Крупнейшим международным мероприятием за всю историю межлабораторных сравнений в рамках анализа стабильных изотопов стал последний учебный эксперимент WICO, проведенный в 2016 году с участием 235 лабораторий. Его результаты были опубликованы в ноябре 2017 года в научном журнале «Rapid Communications in Mass Spectrometry».

Во время тренинга WICO в 2016 году возглавляемое Леонардом Вассенааром подразделение решило прибегнуть к хитрости.

«Чтобы проверить бдительность лабораторий в плане обнаружения загрязняющих примесей, которые

мешают проведению анализа, в одну из проб мы добавили метанол — но, естественно, об этом никого не предупредили, — рассказывает г-н Вассенаар. — После того, как выяснилось, что многие участники оставили этот момент без внимания, мы разработали для них несколько алгоритмов, с помощью которых можно выявить присутствие в воде посторонних примесей, которые могут исказить результаты анализа».

Большинство из лабораторий, принявших участие в WICO 2016, показали при анализе изотопов кислорода результаты, разнящиеся от приемлемых до отличных, а при анализе дейтерия подобных результатов удалось достичь примерно половине лабораторий. Однако порядка 5–6% участников продемонстрировали неприемлемо низкие результаты, что, по словам г-на Вассенаара, может быть связано со стремительным увеличением количества аппаратуры, например, доступных по цене лазерных приборов, особенно в лабораториях с менее опытным персоналом.

«Мы пришли к заключению, что, по всей вероятности, плохие показатели лабораторного анализа обусловлены наличием, так сказать, известных неопределенностей, которые даже не поддаются количественной оценке, — говорит г-н Вассенаар. — Из-за ошибок, например, погрешностей при обработке таблиц в Excel, или неправильного обслуживания измерительных приборов может сложиться ситуация, когда лаборатория вроде бы все делает правильно, но все равно показывает слабые результаты. Эти погрешности и ошибки персонала довольно распространены, однако могут быть незаметны для самой лаборатории».

Он также добавляет, что в этой ситуации играют роль факторы, зависящие от знаний или квалификации, например, опытность оператора, ошибки при обработке исходных данных, нарушения в процедуре замеров, использование поврежденных образцов или некорректно работающих аналитических приборов.

Как показывают опубликованные в журнале «Accreditation and Quality Assurance» результаты недавних исследований, недоработки при выполнении геохимического анализа также могут быть в значительной степени обусловлены человеческим фактором. Проведенное после WICO 2016 обследование лабораторий-участников лишь подтверждает тезис о том, что основными факторами низкой результативности анализа содержания изотопов в воде являются ошибки персонала, технические неисправности и погрешности приборов.

«Обнаруживая ошибки, в конце концов можно принориться. Нам важно знать, где мы выдаем достоверные результаты, а где нет, — резюмирует г-н Гонсалес Ита (на последнем проекте WICO его лаборатория в Мексике получила высокую оценку). — Благодаря WICO 2016 мы смогли убедиться в том, что делаем анализы хорошего качества. Это полезная информация и для соседних стран, так как они могут положиться на наши услуги, а мы можем делиться передовыми наработками».

# Управление городским водным хозяйством: роль изотопной гидрологии и уроки кризиса водоснабжения в Кейптауне

Джоди Миллер

Случившийся в 2017–2018 году в Кейптауне (ЮАР) кризис водоснабжения дал возможность оценить роль изотопной гидрологии в поддержании функциональности городских водопроводных сетей. Полноценное функционирование систем водоснабжения — это залог долгосрочной устойчивости южноафриканской экономики, и чтобы его добиться, необходимо понимание взаимосвязей между климатом и использованием водных ресурсов, а также тех последствий, которые эти взаимосвязи могут повлечь в социально-экономическом плане. Водный баланс в регионе — т. е. отношение между приходом и расходом воды — оказывает значительное воздействие на социально-экономическую сферу, включая возможности по снабжению населенных центров, сокращение масштабов нищеты, обеспечение продовольственной и энергетической безопасности и развитие научных знаний для обоснования региональных стратегий водопользования.

Ситуация достигла критической точки несколько лет назад, когда Кейптаун — город с населением около 3,8 млн человек на южной оконечности африканского континента — испытал на себе последствия сильной засухи. В период с 2014 по 2017 год там выпадало меньше средней нормы атмосферных осадков, в результате чего в летний сезон 2017–2018 года Кейптаун столкнулся с жесточайшей нехваткой воды. Большая часть водных запасов города находится в шести поверхностных водохранилищах суммарной вместимостью 828 991 млн литров. К марту 2018 года общий объем запасов в этих сооружениях достиг минимального зарегистрированного уровня в менее чем 20%, при этом в крупнейшем из них — водохранилище Зеэвотерсклуф — осталось всего лишь 13,5% от его номинальной вместимости в 480 188 млн литров. Высказывалось много прогнозов о неотвратимом наступлении «часа X» — момента, когда в городе в интересах обеспечения наиболее важной инфраструктуры, например, больниц, будет отключено коммунальное водоснабжение. В качестве экстренной меры от всех жителей требовалось сократить потребление воды до всего лишь 50 литров на человека в сутки.

В конечном итоге «час X» так и не наступил. Благодаря общим усилиям по экономии воды запасов в водохранилищах хватило до начала сезона зимних дождей. Так или иначе, вероятность отключения городской водопроводной сети изменила отношение людей к тому, как они расходуют и ценят воду, и стала причиной реальных изменений в привычках потребления воды. В то же время, вопрос о том, как можно укрепить и дополнить меры по обеспечению краткосрочной безопасности водоснабжения в крупном населенном центре, обозначил ряд важных научных проблем, в частности — как отследить и измерить относительный вклад самых разных



Джоди Миллер — доцент факультета наук о Земле в Стелленбошском университете (ЮАР). Ее работа преимущественно связана с проектами в области изотопной гидрологии в Мозамбике, Намибии и Южной Африке. Она также участвует в проекте МАГАТЭ по координированным исследованиям в области изотопной гидрологии в городской среде, является вице-президентом Международной ассоциации геохимии (IAGC) и инициатором

Платформы по предоставлению инфраструктуры для биогеохимических исследований по поручению министерства науки и техники ЮАР.

источников поступления воды в сети водоснабжения. Для пополнения запаса поверхностных водохранилищ, обслуживающих многие городские сети, в разных масштабах используются такие способы, как опреснение воды, регенерация сточных вод, непосредственный сбор дождевого стока и забор подземных вод. В той или иной мере это может сказываться на качестве воды. В свете постоянно растущей номенклатуры источников поступления воды управление водным хозяйством как с точки зрения количества, так и качества требует применения новых подходов и научных инструментов, которые помогают выработать оптимальные практические методы.

## Изотопная гидрология в городской среде

Одним из научных методов, позволяющих отслеживать различные источники поступления воды в городские сети, является исследование содержания стабильных изотопов. В основе изотопной гидрологии лежит изучение и практическое применение данных об изотопах водорода и кислорода, которые естественным образом присутствуют в рамках водного цикла.

Вследствие повсеместной урбанизации и увеличения населения в последние годы изотопная гидрология получила широкое распространение как инструмент анализа процессов, характерных для городского водопроводного хозяйства. Ключевым механизмом применения изотопной гидрологии в городских условиях является составление «отпечатка» изотопных характеристик каждого источника поступления воды в городскую сеть, что позволяет отслеживать его роль в рамках всей системы водоснабжения. Данная информация может использоваться руководителями соответствующих предприятий для планирования стратегий управления



**Установившаяся с 2014 года средняя норма выпадения осадков привела к тому, что уровень воды за плотиной Зеевотерсклуф в Западной Капской провинции ЮАР упал до критических отметок.**

(Фото: А. Сильва Гардуно / МАГАТЭ)

водным хозяйством в краткосрочной и долгосрочной перспективе. С ее помощью контролируется вклад тех или иных источников, время пребывания воды в водопроводной сети, утечки воды и соответствующие потери в системе, а также организуются меры по устранению загрязнения воды или окружающей среды.

В городе Стелленбош, вокруг которого раскинулись самые известные винодельческие районы страны, находится Стелленбошский университет. Его сотрудники отобрали пробы водопроводной воды из частных домовладений и проанализировали соотношение в них изотопов кислорода-18 ( $^{18}\text{O}$ ) и дейтерия ( $^2\text{H}$ ). Результаты исследования открыли захватывающую картину того, насколько чутко изотопная гидрология

позволяет отслеживать любые колебания в городской водопроводной сети. Привычная нам вода, которая течет из кранов, с точки зрения изотопного анализа предстает в виде многообразных сочетаний высоких и низких, совпадающих и различающихся концентраций изотопов.

В сущности, с помощью изотопов можно получить «отпечаток» каждого сегмента местной водопроводной сети: откуда берется вода, через какую водоочистную станцию она проходит и как долго циркулирует в сети. В условиях, когда во всем мире возникает запрос на обеспечение долгосрочной устойчивости водоснабжения для растущего населения городов, данные исследований изотопной гидрологии в городской среде становятся важнейшим элементом инструментария руководителей в сфере водного хозяйства.

**Джоди Миллер берет образец воды в Западной Капской провинции.**

(Фото: А. Сильва Гардуно / МАГАТЭ)



# Изотопное картирование загрязнения и пополнения подземных вод

Жоэль Подгорски, Михаэль Берг и Рольф Кипфер

**Р**ост численности населения, чрезмерная эксплуатация водных ресурсов, землепользование и климатические изменения ведут к тому, что все труднее становится обеспечить хорошее качество подземных вод для пищевых, промышленных и сельскохозяйственных целей. За счет подземных водных ресурсов покрывается 50% мировых потребностей в питьевой воде и 43% — в воде для орошения. Однако приповерхностные подземные водоносные горизонты подвержены загрязнению удобрениями, пестицидами, химическими веществами и сточными водами. Кроме того, чрезмерная эксплуатация и неконтролируемый отбор воды из водоносных горизонтов могут привести к потере источников водоснабжения в связи с резким падением уровня воды.

Полезным инструментом, помогающим водохозяйственным органам охранять и сберегать подземные водные ресурсы, являются карты уязвимости водоносных горизонтов. Эти карты позволяют определять, какие зоны ландшафта особенно подвержены загрязнению или чрезмерной эксплуатации, предоставляя таким образом информацию для организации управления водными ресурсами и восстановительных мероприятий. Помимо этого, картирование уязвимости подземных вод является залогом достижения намеченной ООН цели 6 в области устойчивого развития, или ЦУР 6, которая предусматривает обеспечение устойчивого доступа к воде, в частности к безопасной воде, для всех (задача 6.1). Данная цель включает также комплексное управление водными ресурсами (задача 6.5).

## Уязвимость водоносных горизонтов

С технической точки зрения существует множество способов оценки уязвимости того или иного водоносного горизонта для загрязнения или чрезмерной эксплуатации водных ресурсов. В прошлом использовались общие геологические характеристики, данные скважинных исследований и региональные гидрологические данные. Между тем такие данные часто либо отличаются неточностью и недостоверностью, либо вовсе отсутствуют. Применяются также сложные компьютерные модели, но они требуют наличия точных данных, и их частым недостатком являются высокие вычислительные затраты и нехватка данных, в связи с чем их использование, как правило, ограничивается небольшими изучаемыми районами.

Для установления связи между имеющимися данными о состоянии окружающей среды и уязвимостью подземных вод можно использовать химические индикаторы и статистический анализ. Например, нитраты — загрязнители воды чаще всего сельскохозяйственного происхождения — легко поддаются измерению без



Жоэль Подгорски, Михаэль Берг и Рольф Кипфер являются сотрудниками отдела водных ресурсов и питьевой воды Швейцарского федерального научно-исследовательского института по водоснабжению, очистке сточных вод и защите водных ресурсов (EAWAG).

EAWAG — это швейцарский научно-исследовательский институт водных ресурсов, разрабатывающий концепции и технологии рационального обращения с водными объектами и водой как ресурсом. В сотрудничестве с университетами, другими научно-исследовательскими институтами, государственными учреждениями, промышленными предприятиями и неправительственными организациями EAWAG задействует свою глобальную сеть в интересах согласования экологических, экономических и социальных интересов в отношении водопользования.

больших финансовых затрат. Для создания карт уязвимости или охраны подземных вод необходимо, чтобы данные о загрязнителе (например, нитратах) или индикаторах уязвимости имелись в наличии по соответствующему району изучения, — таким образом будут получены достоверные и точные прогнозные карты.

## Онлайновое картирование

В целях демонстрации эффективности статистического картирования уязвимости водоносных горизонтов проведен повторный анализ данных существующей карты уязвимости в Канаде при помощи бесплатной онлайн-платформы для оценки качества подземных вод GAP ([www.gapmaps.org](http://www.gapmaps.org)). На основании карт уязвимости водоносных горизонтов GAP получена точная карта прогнозирования вероятности высокой уязвимости водоносных горизонтов, для создания которой не требовался сбор большого количества данных со всего изучаемого района.

## Использование трития для картирования интенсивности пополнения подземных вод

Незначительное количество радиоизотопа трития естественным путем образуется в атмосферных осадках под действием космического излучения в верхних слоях атмосферы. В ходе испытаний ядерного оружия на земле и в атмосфере, проводившихся в период 1952–1962 годов, в гидрологический цикл попало большое количество трития, который в результате превратился в измеряемый индикатор пополнения молодых подземных вод. Несмотря на то, что с тех пор содержание трития в атмосферных осадках во всем мире снизилось до естественного уровня, наблюдавшегося до ядерных испытаний, чувствительные аналитические средства обнаружения микроэлементов по-прежнему позволяют с точностью выявлять наличие этого изотопа.

Одним из главных преимуществ использования трития, или изотопа  $^3\text{H}$ , для целей картирования является то, что этот изотоп представляет собой основной кирпичик построения молекулы воды ( $^1\text{H}^3\text{HO}$ ) и поэтому присутствует в атмосферных осадках. Это означает, что любое присутствие поддающегося обнаружению трития на других отрезках гидрологического цикла — в реках, озерах, подземных водах — свидетельствует о наличии новой воды, происходящей из недавно выпавших атмосферных осадков. Из этого можно сделать вывод, что вода, о которой идет речь, образовалась за последние несколько десятилетий, а эти данные можно использовать для непосредственного определения и составления карты подверженности водоносных горизонтов загрязнению через атмосферные осадки, даже если подземные воды не были загрязнены.

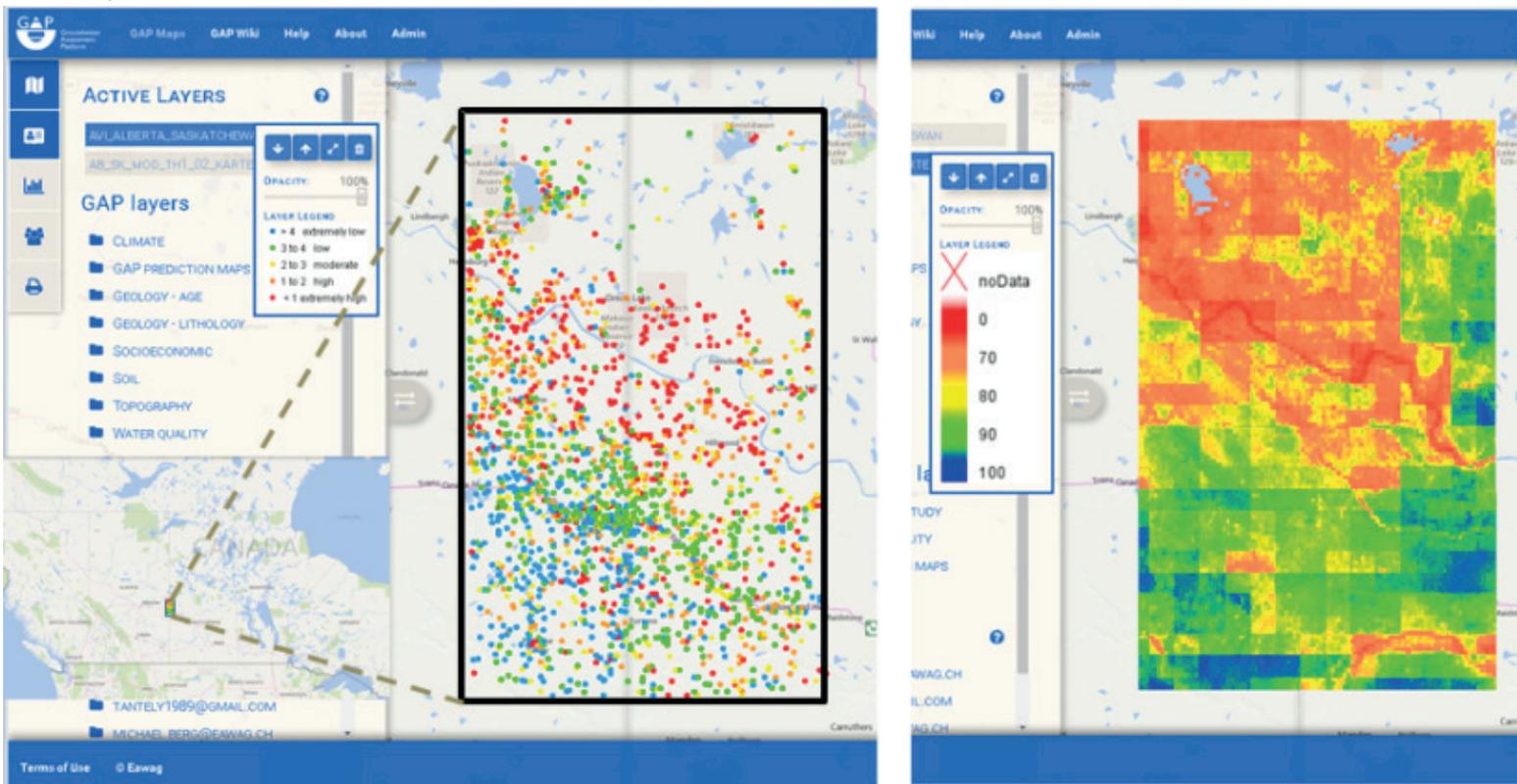
На данный момент в методах статистического картирования для оценки уязвимости водоносных горизонтов измерение уровня содержания трития не получило широкого использования. Это связано с тем, что тритий, как правило, не включается в исследования подземных вод и стоимость данного вида анализа по-прежнему высока. Между тем при картировании уязвимости можно использовать другие, легко собираемые параметры качества воды или изотопные параметры. Например, углерод-14, стабильный изотопный состав воды ( $^2\text{H}$ ,  $^{18}\text{O}$ ), нитраты и хлориды также могут

помочь в определении возраста подземных вод или их вероятного загрязнения.

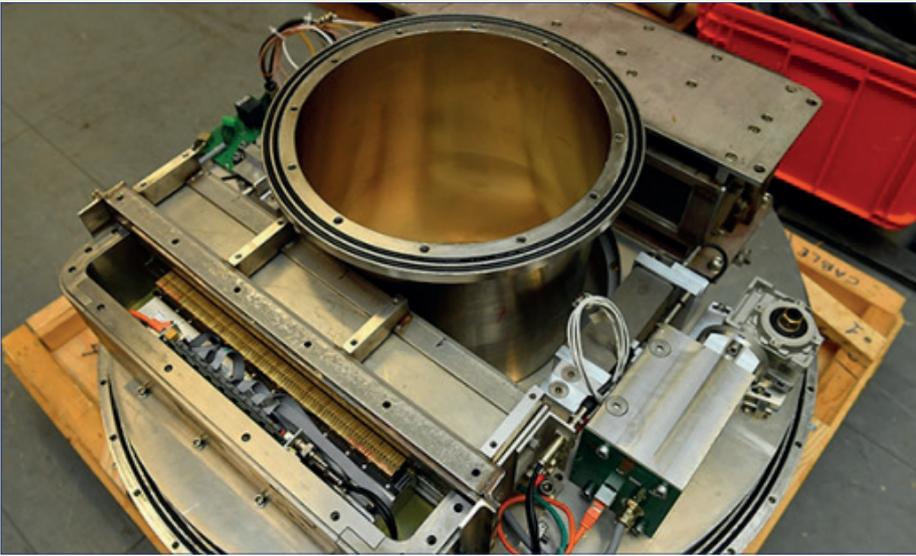
Статистическое и онлайнное картирование уязвимости водоносных горизонтов и пополнения подземных вод на основе исследования изотопов и химического состава представляет собой значительный шаг вперед и один из вариантов практического применения трития и аналогичных природных изотопных индикаторов. В настоящее время использование накопленных МАГАТЭ глобальных массивов данных, касающихся  $^3\text{H}$ ,  $^2\text{H}$  и  $^{18}\text{O}$ , в сочетании с геостатистическим картированием, описанным выше, обладает огромным потенциалом для решения проблем, связанных с качеством и количеством мировых запасов подземных и поверхностных вод. МАГАТЭ, в сотрудничестве со Швейцарским федеральным научно-исследовательским институтом по водоснабжению, очистке сточных вод и защите водных ресурсов (EAWAG) предпринимает новые усилия в этой области, направленные на проведение оценки на основе фактологических данных и картирование запасов безопасной питьевой воды в глобальных масштабах. Кроме того, ожидается, что изотопное картирование будет применяться с целью помочь экспертам по всему миру в управлении подземными водами сбалансированным и устойчивым образом.

*В подготовке данного материала принимали участие специалисты МАГАТЭ по изотопной гидрологии.*

**Индексное исследование уязвимости водоносных горизонтов в западной части Канады (слева) в сравнении с новой логистической регрессионной картой этих значений индекса уязвимости на онлайнной платформе GAP (справа). Красным отмечены зоны наибольшей уязвимости. Зоны, отмеченные зеленым, менее уязвимы или достаточно защищены от поверхностного загрязнения.**  
(Изображение: EAWAG)



## Проверка отработавшего ядерного топлива инспекторами МАГАТЭ упрощается благодаря новому инструменту осуществления гарантий



**Внутреннее устройство инструмента ПГЭТ, который используется для проверки отработавшего ядерного топлива.** (Фото: Д. Кальма/МАГАТЭ)

МАГАТЭ стремится удостовериться в том, что во всех государствах, где действует соглашение о всеобъемлющих гарантиях, весь ядерный материал используется для мирной деятельности. Для достижения этой цели применяются технические меры, известные как гарантии. Теперь МАГАТЭ может проверять количество топливных стержней — или твэлов — в сборках отработавшего ядерного топлива с помощью нового инструмента пассивной гамма-эмиссионной томографии (ПГЭТ).

В отличие от других инструментов, используемых для проверки состава отработавшего топлива, таких как цифровое устройство для наблюдения излучения Черенкова и устройство для проведения атрибутивных тестов

отработавшего топлива, инструмент ПГЭТ способен также подтвердить тот факт, что в закрытом контейнере с отработавшей тепловыделяющей сборкой нет недостающих твэлов. Это очень удобно при осуществлении гарантий на АЭС, в хранилищах бассейнового типа и на установках по герметизации в геологических хранилищах. По мнению эксперта МАГАТЭ по технологиям Тима Уайта, использование пассивной гамма-эмиссионной томографии для проверки ядерного материала станет «весьма ценным дополнением к инструментарию по гарантиям МАГАТЭ».

По истечении срока службы топливных стержней в реакторе их помещают на хранение и в дальнейшем

захоранивают, а в некоторых случаях — перерабатывают. Одним из ключевых факторов уверенности международного сообщества в том, что государства выполняют свои обязательства по нераспространению, является проведение проверки на предмет того, что ядерный материал в топливных стержнях не переключается с мирного использования.

Для обнаружения присутствия урана или плутония инструмент ПГЭТ производит три одновременных замера — суммарной интенсивности потока нейтронов и гамма-излучения, гамма-спектрометрию и томографическую визуализацию расположения твэлов в сборке с отработавшим топливом. Для выполнения этих измерений инструменту требуется всего пять минут — и еще одна минута для обработки и анализа данных. В этом смысле, по словам Уайта, ПГЭТ «предоставляет инспекторам дополнительный результат обработки данных. Данный инструмент позволяет получить более полное представление о ведущейся деятельности и повышает надежность процесса проверки».

МАГАТЭ все еще находится на начальном этапе интеграции метода ПГЭТ в свою деятельность по гарантиям. Инструмент ПГЭТ был протестирован в бассейнах выдержки отработавшего топлива на трех АЭС и в настоящее время готов к внедрению в практическую работу по проверке соблюдения гарантий и к применению инспекторами по гарантиям на местах. Кроме того, интерес к использованию данной технологии в деятельности по проверке проявляет Европейское сообщество по атомной энергии (Евратом), и ряд стран могут последовать его примеру.

— Мэтт Фишер

## В центре внимания семинара-практикума МАГАТЭ в Узбекистане — выбор и оценка площадок для атомных электростанций

Местные руководители в Узбекистане, который на данный момент является последней страной, приступившей к реализации ядерно-энергетической программы, подтвердили, что процесс выбора площадки для атомной электростанции уже начался, а получение лицензии на площадку ожидается в сентябре 2020 года. Узбекистан — одна из около 30 стран, которые рассматривают, планируют или уже активно реализуют шаги по включению ядерной энергетики в национальную структуру энергопроизводства.

МАГАТЭ и недавно созданное Агентство по развитию атомной энергетики «Узатом» по просьбе правительства Узбекистана провели в феврале 2019

года в Ташкенте семинар-практикум по ядерной безопасности и прочим не связанным с ней вопросам, которые должны учитываться при выборе и оценке площадок для АЭС.

Семинар-практикум, участие в котором приняли представители «Узатома» (регулирующего органа в сфере атомной энергетики) и других соответствующих национальных организаций, был посвящен услугам МАГАТЭ по рассмотрению вопросов безопасности, а также нормам безопасности и другим ресурсам, применимым в процессе выбора и оценки площадок для АЭС.

Как отметил директор Отдела безопасности ядерных установок

МАГАТЭ Грег Жентковский, «реализации ядерно-энергетической программы требует, чтобы сразу после принятия решения о ее разработке были приняты долгосрочные обязательства по обеспечению ядерной безопасности. На ранних этапах процесса важно, во-первых, создать эффективную правовую и регулируемую основу и, во-вторых, до выбора площадки для размещения ядерной установки надлежащим образом оценить возможные варианты. Четкие указания применительно к обеим областям можно найти в нормах безопасности МАГАТЭ, и мы призываем все страны применять их». На семинаре-практикуме был представлен подход к разработке новой



**Подход к ядерной энергетике, изложенный в документе «Milestones» («Основные этапы»), — это поэтапный и комплексный метод для оказания помощи странам, которые рассматривают возможность строительства своей первой АЭС или планируют соответствующий проект.**

(Изображение: МАГАТЭ)

ядерно-энергетической программы, изложенный в документе МАГАТЭ «Milestones» («Основные этапы»). В рамках этого подхода «площадка и вспомогательные объекты» являются одним из 19 касающихся ядерной инфраструктуры пунктов, по которым при разработке ядерно-энергетической программы потребуется принять соответствующее решение.

В соответствии с подходом, изложенным в документе «Milestones», МАГАТЭ предоставляет комплексные услуги, в том числе в области ядерной безопасности, физической безопасности, правовой и регулирующей основы, развития людских ресурсов, планирования действий в чрезвычайных ситуациях и осуществления гарантий. Сюда входит проведение независимых экспертиз и консультативных миссий, в частности комплексное рассмотрение ядерной инфраструктуры и услуги по экспертизе проектирования площадки с учетом внешних событий.

— Айхан Алтынйоллар

## Как ядерные методы помогают накормить население Китая



**При проведении исследований в Академии сельскохозяйственных наук Китая широко внедряются ядерные технологии. На фото лаборант готовит образцы пищевых продуктов для проверки на безопасность.** (Фото: М. Гашпар/МАГАТЭ)

Китай, на долю которого приходится 19% населения и всего 7% пахотных земель мира, стоит перед дилеммой: как накормить свой народ, численность и доходы которого постоянно увеличиваются, и в то же время защитить природные ресурсы? Китайские ученые-аграрии в последние десятилетия все чаще применяли ядерные и изотопные методы в сфере растениеводства. В сотрудничестве с МАГАТЭ и Продовольственной и сельскохозяйственной организацией Объединенных Наций (ФАО) теперь они помогают специалистам из Азии и других регионов мира создавать новые сорта сельскохозяйственных культур с помощью облучения.

В то время как во многих странах ядерные исследования в сфере сельского хозяйства проводятся в рамках специализированных агентств по атомной энергии, работающих независимо от национальных исследовательских учреждений в сфере сельского хозяйства, в Китае вопросы применения ядерных методов в сельском хозяйстве входят в круг ведения Академии сельскохозяйственных наук Китая (АСНК) и академий сельскохозяйственных наук в провинциях. Благодаря этому результаты исследований сразу же внедряются на практике.

Так, например, второй по масштабу распространения мутантный сорт пшеницы в Китае — «Лююань 502» — был выведен

Институтом растениеводства АСНК и Академией сельскохозяйственных наук провинции Шаньдун путем селекции на основе мутации, индуцированной космическими лучами (см. вставку «Наука»). По словам Лусяна Лю, заместителя генерального директора Института, данный сорт обладает на 11% большей урожайностью по сравнению с традиционными сортами, а также более устойчив к засухе и основным болезням растений. Площадь его посевов составляет более 3,6 млн гектар — почти столько же, сколько вся территория Швейцарии. Г-н Лю уточняет, что это один из 11 сортов пшеницы, выведенных с учетом требований повышенной соле- и засухоустойчивости, качества зернового материала и урожайности.

«В рамках тесного сотрудничества с МАГАТЭ и ФАО за последние 60 лет Китаем было районировано более 1000 мутантных сортов сельскохозяйственных культур, при этом на созданные в Китае сорта приходится четверть всех мутантов, зарегистрированных на данный момент в базе данных ФАО/МАГАТЭ по мутантным сортам, производимым во всем мире», — говорит Собхана Сивасанкар, руководитель секции селекции и генетики растений в объединенном отделе ФАО/МАГАТЭ по ядерным методам в продовольственной и сельскохозяйственной областях. Она добавляет, что нашедшие применение в практике Института новые подходы на основе индуцирования мутаций и высокопроизводительного отбора мутантов служат примером для исследователей со всего мира.

Для индуцирования мутаций у самых разнообразных видов культур, в том числе пшеницы, риса, кукурузы, сои

и овощей, в Институте применяются пучки тяжелых ионов, космические лучи и гамма-лучи, а также химические реагенты. «Ядерные технологии имеют принципиальное значение для нашей работы и широко внедряются при выведении сортов сельскохозяйственных культур в интересах повышения продовольственной безопасности», — подытоживает г-н Лю.

На протяжении многих лет Институт вносит существенный вклад в программу технического сотрудничества МАГАТЭ: в учебных курсах и программах стажировки АСНК приняли участие более 150 селекционеров из более чем 30 стран мира.

«Национальное агентство Индонезии по ядерной энергии (БАТАН) и АСНК ищут возможности сотрудничества в области мутационной селекции растений, а индонезийские исследователи стремятся почерпнуть китайский опыт, — говорит Тотти Тжиптосумират, руководитель Центра прикладных изотопных и радиационных методов в БАТАН. — Активное распространение и продвижение достижений Китая в области мутационной селекции растений идет на пользу сельскохозяйственным исследованиям во всей Азии».

### От безопасности пищевых продуктов до проверки подлинности

Ядерные и изотопные методы используют в своей исследовательской и опытной работе и некоторые другие институты АСНК, которые принимают участие в ряде проектов МАГАТЭ по техническому сотрудничеству и координированным исследованиям. Так, Институтом по стандартам качества и технологиям испытания сельхозпродукции был разработан алгоритм определения поддельного меда с помощью изотопного анализа. «По имеющимся оценкам, большая часть того, что продается в Китае под видом меда, производится не пчелами

в ульях, а искусственным способом в лабораториях, поэтому данная разработка позволит нанести мощный удар по производителям контрафакта», — говорит Чэнь Ган, руководитель ведущих в Институте исследований на базе изотопных методов. По его словам, также реализуется программа исследований для отслеживания географического происхождения говядины с помощью стабильных изотопов.

Институт применяет изотопные методы для проверки безопасности и установления подлинности молока и молочной продукции — данная работа стала результатом проектов координированных исследований и технического сотрудничества, проводимых МАГАТЭ в период 2013–2018 годов. «Мы получали помощь в течение нескольких лет, а теперь стали полностью самостоятельными», — резюмирует г-н Ган.

### Улучшение усвояемости питательных веществ

Стабильные изотопы применяются различными институтами в рамках АСНК для изучения процессов поглощения, переноса и метаболизма питательных веществ у животных. Результаты этих исследований позволяют оптимизировать состав кормов и режим кормления. «По сравнению с традиционными аналитическими методами, изотопный анализ обладает более высокой чувствительностью, что является существенным преимуществом при изучении поглощения питательных микроэлементов, витаминов, гормонов и лекарственных препаратов», — говорит Дэнпань Бу, профессор Института зоотехники.

Хотя Китай уже в совершенстве освоил многие ядерные методы, в некоторых областях он обращается за помощью к МАГАТЭ и ФАО: проблемой китайской молочной промышленности является низкая усвояемость белка дойными



**Китайские ученые стремятся применять ядерные методы, чтобы получить лучшее представление о метаболизме у крупного рогатого скота, как на этой ферме в окрестностях Пекина, и увеличить долю азота, усваиваемого коровами из корма.**

(Фото: М. Гашпар/МАГАТЭ)

коровами. Жвачными животными усваивается лишь менее половины белка, содержащегося в корме, остальное выводится вместе с навозом и мочой. Ученый поясняет: «Это расточительно для фермеров, а высокое содержание азота в навозе вредит окружающей среде». Использование изотопов для отслеживания переноса азота из корма в организм животного поможет улучшить его усвояемость за счет внесения необходимых коррективов в состав кормов. Это будет иметь особенное значение в условиях, когда потребление молочной продукции в Китае, которое в настоящее время составляет лишь треть от среднемирового уровня в расчете на человека, продолжает расти. «Мы хотим приобщиться к международному опыту посредством программ МАГАТЭ и ФАО, что поможет нам решить эту проблему», — говорит г-н Бу.

— Миклош Гаушпар

## НАУКА

### Селекция на основе мутации в условиях космоса

В процессе мутации под воздействием облучения возникают случайные генетические варианты, что приводит к появлению мутантных растений с новыми полезными свойствами. Мутационная селекция растений не связана с генетическими трансформациями: она задействует собственные генетические ресурсы растения и воспроизводит естественный процесс спонтанной мутации, которая является движущей силой эволюции. Используя радиацию, ученые могут значительно сократить время выведения новых и усовершенствованных сортов растений.

Селекция на основе индуцированной космическими лучами мутации, для описания которой также используется термин «космический мутагенез», подразумевает, что семена доставляются в условия космоса, где воздействие космических лучей сильнее и вызывает мутацию. Для проведения такого рода экспериментов используются спутники, космические корабли и высотные аэростаты. Одно из преимуществ метода заключается в том, что при этом риск нанести вред растениям ниже, чем при использовании гамма-облучения на Земле.

# Читайте бесплатно тысячи публикаций МАГАТЭ в Интернете



[www.iaea.org/books](http://www.iaea.org/books)

[sales.publications@iaea.org](mailto:sales.publications@iaea.org)

# Международная конференция по изменению климата и роли ядерной энергетики

7–11 октября 2019 года, Вена, Австрия



Организатор:



**IAEA**

Международное агентство по атомной энергии

**#Atoms4Climate**

CN-275



• Читайте этот и другие выпуски Бюллетеня МАГАТЭ в Интернете по адресу [www.iaea.org/bulletin](http://www.iaea.org/bulletin)  
С более подробной информацией о МАГАТЭ и его работе можно ознакомиться на сайте [www.iaea.org](http://www.iaea.org)

или в соцсетях      

и на странице [h2o.iaea.org](http://h2o.iaea.org)