

Изотопы в исследованиях окружающей среды

Изучение бассейна реки Амазонки в Бразилии помогает провести оценку влияния изменений в землепользовании на экологию и климат

Глин Боуэн, Казимир Розаньский и Питер Воуз

Угроза значительного изменения окружающей среды становится все более реальной.

Быстро возрастающие концентрации газов, обуславливающих парниковый эффект в атмосфере, ухудшение качества водных ресурсов, лесозаготовки и промышленные загрязнители – вот всего лишь несколько примеров усиливающейся нагрузки на глобальную экосистему. Существует острая необходимость в проведении достоверной оценки возможных социально-экономических последствий таких далекоидущих изменений, а также в выработке адекватных ответных стратегий. Такие стратегии требуют лучшего понимания этих чрезвычайно сложных систем, имеющих неоднородные внутренние структуры и многочисленные механизмы обратной связи.

Существуют различные по своим масштабам проблемы охраны окружающей среды, и все они взаимосвязаны. Некоторые из них более или менее ограничены территорией определенного района, например, эрозия неустойчивых почв, подвергшихся слишком интенсивной эксплуатации. Плохие методы землепользования, особенно на больших территориях, приведут к таким внешним эффектам, как, например, эвтрофикация воды нитратами и фосфатами. Заготовка и сплав леса могут усилить заиление рек и ручьев, ухудшить качество воды и изменить пищевые цепочки водных животных. Внешние эффекты, способные повлиять на весь ландшафт, могут проявляться на значительном расстоянии от источника, например, возможные изменения в вы-

падении осадков в результате широкомасштабной вырубки тропических лесов или кислотные дожди. И, наконец, существуют вызывающие беспокойство глобальные эффекты, а именно, климатические изменения в результате глобального потепления.

Радиоактивные и стабильные изотопы в течение уже длительного периода времени считаются очень эффективным инструментом изучения физических и биологических аспектов функционирования глобальной экосистемы. Они применяются в различных исследованиях окружающей среды, охватывая все уровни исследований.

В данной статье рассматривается лишь несколько подходов к проблемам охраны окружающей среды, для решения которых используются изотопы. Особое внимание уделено исследованиям в бассейне реки Амазонки.

Бассейн реки Амазонки

Бассейн реки Амазонки занимает площадь в 6 млн. кв. км и является самым крупным испарительным бассейном на континенте. На его территории расположена примерно половина тропических лесов земли. Он дает пристанище примерно 80000 разновидностей растений и, возможно, 30 млн. видов животных, в основном насекомых. Воды реки Амазонки дают 20 % речных стоков в Мировой океан. В настоящее время эта уникальная, имеющая глобальное значение экосистема находится под серьезной угрозой в результате широкомасштабных лесозаготовок. В течение последних 10 лет в бразильской части Амазонии было вырублено 180000 кв. км девственных лесов.

В рамках программ технического сотрудничества МАГАТЭ давно участвует в различных проектах исследования окружающей среды Бразилии с при-

Г-н Боуэн возглавляет Секцию плодородия почвы, ирригации и растениеводства Объединенного отдела ФАО/МАГАТЭ по применению ядерных методов в пищевой промышленности и сельском хозяйстве; г-н Розаньский – сотрудник Секции изотопной гидрологии Отдела физических и химических наук МАГАТЭ. Г-н Воуз является старшим техническим консультантом Проекта Амазония МАГАТЭ.

менением изотопов. Реализация наиболее грандиозного до настоящего времени проекта началась в 1985 г. Это крупная многоцелевая программа исследований с использованием изотопов влияния изменений в землепользовании на экологию и климат бразильской Амазонии. В рамках данного проекта объединили свои усилия 80 ученых целого ряда институтов Бразилии. Техническую помощь проекту оказывают Объединенный отдел ФАО/МАГАТЭ и Секция изотопной гидрологии Отдела физических и химических наук МАГАТЭ.

В Бразилии координацию проекта осуществляет Национальная комиссия по атомной энергии (CENEA), в которой принимает участие целый ряд бразильских институтов. Проект имеет очень хорошие и эффективные связи с рядом учреждений за пределами Бразилии. Например, правительство Швеции с помощью Шведского агентства по научно-исследовательскому сотрудничеству с развивающимися странами (SAREC) внесло значительный вклад в гидрологическую программу. Существуют эффективные связи с Французским бюро по проведению научных исследований в целях развития и сотрудничества (ORSTOM), Национальным научным фондом, США, Институтом лимнологии им. Макса Планка, Германией, Факультетом наук о земле Университета Ватерлоо, Канадой, Международным фондом любителей диких животных и другими институтами.

Региональные водные балансы—суммарное испарение

Природные изотопы являются очень эффективным инструментом исследований гидрологического цикла, частично благодаря тому факту, что три различных изотопа, введенных в молекулы воды, можно эффективно использовать в качестве радиоизотопных индикаторов. Тритий, являющийся радиоактивным индикатором, особенно полезно использовать в исследованиях динамики движения воды в различных областях гидросферы как в локальном, так и глобальном масштабах. Тяжелые стабильные изотопы водорода и кислорода (дейтерий и кислород-18) помогают получить информацию об установившихся характеристиках гидрологического цикла.

Ежемесячный мониторинг распределения трития, дейтерия и кислорода-18 в осадках осуществляется с начала 60-х годов с помощью глобальной сети станций, совместно эксплуатируемых МАГАТЭ и Всемирной метеорологической организацией (ВМО). Эта уникальная база данных позволяет широко использовать природные изотопы в гидрологии, климатологии и исследованиях атмосферы. (См. соответствующую статью в данном номере Бюллетеня МАГАТЭ.)

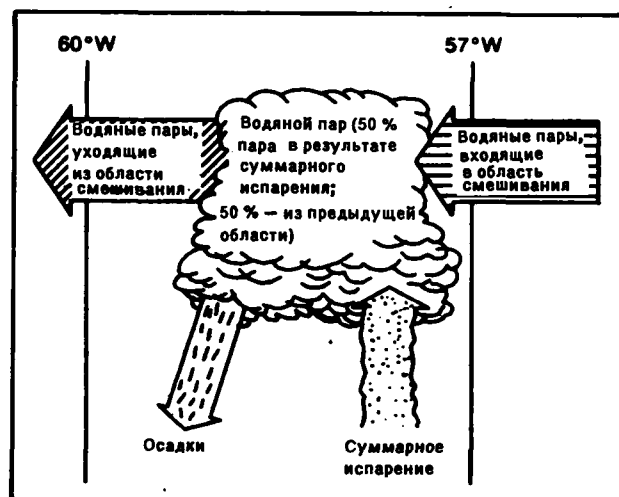
В последние годы проводится все возрастающее количество исследований различных аспектов переноса воды в атмосфере с использованием изотопных методов. В своем развитии методологический подход к этим проблемам прошел от полупериментальных моделей „изолированной воздушной массы“ до общих глобальных циркуляционных моделей (ГЦМ). В этих моделях учитывается значительная сложность атмосферных процессов, ве-

дущих к образованию осадков, в различных временных и пространственных масштабах. Последние исследования были направлены на включение изотопных циклов в ГЦМ, и они подтвердили полезную роль базы данных МАГАТЭ/ВМО в проверке и дальнейшем усовершенствовании таких моделей.

Широкомасштабные лесозаготовки ведут к изменению регионального водного баланса в результате уменьшения суммарного потока испарений в атмосферу. Данная проблема имеет особенно важное значение для бассейна реки Амазонки. Плотный растительный покров и относительно высокие температуры приповерхностного воздуха делают „биологический водяной насос“ очень эффективным, возвращая значительную часть осадков в атмосферу. С помощью региональной изотопной модели переноса водяного пара в атмосферу бассейна (основанной на ранних исследованиях изотопных данных об осадках) было установлено, что около 50 % осадков в бассейне реки Амазонки представляют собой рециркулируемую влагу. (См. рис. 1.) Более поздние данные, как правило, подтверждают этот вывод. Такая высокая доля рециркулируемой влаги делает гидрологический цикл чувствительным к вырубке лесов: в результате ослабления биологического водяного насоса все большее количество влаги попадает в реки и происходит локальное повышение температуры.

Стремясь к более точному пониманию схем переноса водяных паров в бассейне реки Амазонки, в рамках Бразильского проекта была недавно

Рис. 1. Упрощенная схема процесса образования дождевых осадков в бассейне реки Амазонки.



На данном рисунке показана общая схема, объясняющая процесс образования дождевых осадков в бассейне реки Амазонки, обусловленный двумя источниками пара: Атлантическим океаном и лесами. (Схема основана на результатах исследований природных источников воды с использованием изотопа кислород-18 и дейтерия, проведенных Салати и его соавторами, а также Далия Олио и соавторами.)

создана специальная сеть станций, собирающих пробы осадков для проведения изотопного анализа. Полученные таким образом данные, дополненные результатами изотопного анализа водяных паров, позволяют разработать более совершенную модель маршрута движения атмосферной влаги в этом регионе. Доступ к реалистичным моделям атмосферной циркуляции и переноса водяных паров в этом регионе приобретает особенно важное значение, учитывая потенциальные глобальные эффекты, обусловленные вырубкой лесов в Амазонии.

Если лесозаготовки ведут к уменьшению количества возвращаемой в атмосферу воды, то, вероятно, эти эффекты будут варьироваться в зависимости от размера площади со сплошной вырубкой. Имеется небольшой объем подробной информации об относительных водных балансах различных по размеру изолированных и неизолированных лесных площадей или соседних лесосек. Однако исследования, проводимые в рамках Бразильского проекта и охватывающие измерения влаги с помощью нейтронных приборов, микрометеорологические и физиологические исследования растений показали, что влияние крошки леса ощущается по крайней мере на расстоянии 100 метров в глубь леса на уровне земли. Это означает, что с метеорологической точки зрения влияние вырубки леса несколько больше по своему масштабу и выходит за пределы фактической зоны вырубки. Этот эффект будет усиливаться по мере продолжения лесозаготовок и увеличения соотношения размеров крошки леса и девственного леса.

Маршруты движения поверхностных вод

Второй важный шаг на пути к лучшему пониманию динамики гидрологического цикла в бассейне реки Амазонки заключается в более глубоком изучении маршрутов движения средних объемов поверхностных вод в основном русле реки Амазонки и ее притоках. Ожидается, что изотопные данные, собранные с помощью региональной сети метеорологических станций и дополненные результатами систематического изотопного мониторинга речных вод основного русла и поймы во всем бассейне, будут очень полезными в этом отношении. В частности, с их помощью можно будет определить пропорции объемов воды, проходящих по основному руслу и накапливающихся в пойме. Кроме того, можно будет также измерить скорости переноса воды и водообмена между этими двумя крупными накопителями в различное время года и на каждом участке речной долины. Предварительные данные изотопных анализов дают основание предположить, что около 30 % воды в основном русле реки составляют воды, прошедшие через ее пойму.

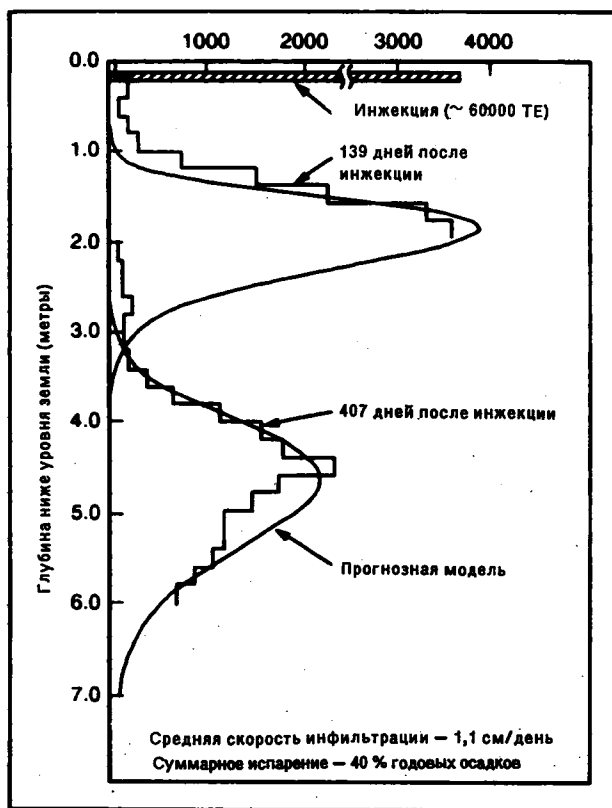
Перенос воды в почве. На основе результатов измерений с использованием природных изотопов можно также получить информацию о переносе и накоплении воды в ненасыщенной зоне конкретной площадки. Результаты многочисленных исследований указывают на то, что тритий является очень мощным радиоизотопным индикатором движения вод в ненасыщенной зоне.

В ходе исследования, проводившегося в рамках Бразильского проекта, можно было провести оцен-

ку средней скорости инфильтрации и потока суммарных испарений в районе девственного леса и лесосек в данном регионе. (См. рис. 2.) Если с помощью радиоизотопных индикаторов можно получить информацию о динамике движения воды в ненасыщенной зоне, то накопление воды в почве, как правило, определяется с использованием нейтронных измерительных приборов.

Заиливание. Усиливающееся заиливание рек уже давно считается одним из основных последствий вырубки леса. Однако очень трудно провести фундаментальное исследование или определить изменения в темпах заиливания быстрых рек в бассейне реки Амазонки. Проводится геохронологическое ис-

Рис. 2. Результаты инфильтрационных экспериментов в Центральной Амазонии.



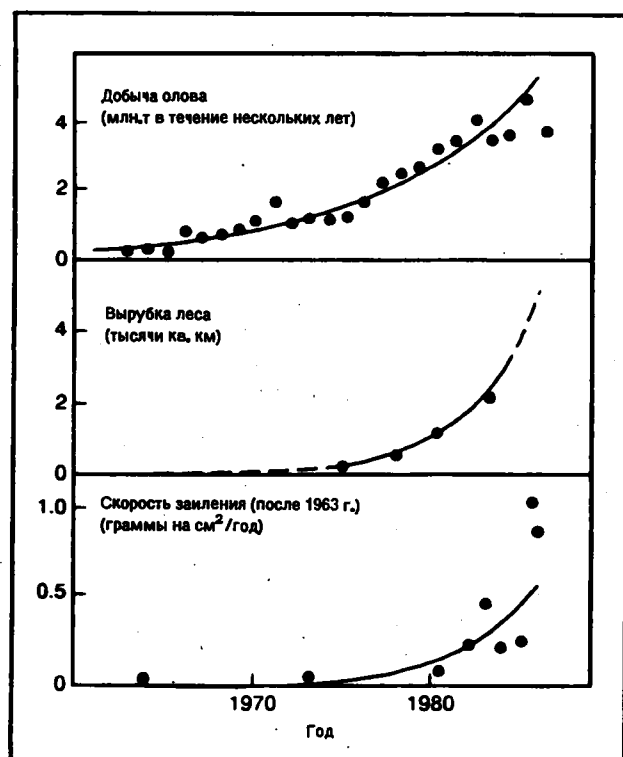
На данном графике показаны результаты инфильтрационного эксперимента, проведенного недалеко от Манауса (Центральная Амазонка) в рамках проекта Бразилия-МАГАТЭ. Искусственно инжестрированный тритий использовался в качестве радиоизотопного индикатора движения воды в ненасыщенной зоне. Пробы почвы брались через 139 и 407 дней после инъекции, а затем измерялось содержание трития в воде, извлеченной из проб грунта. На основании максимальных значений содержания радиоизотопного индикатора и воды в почве можно было определить среднюю скорость инфильтрации и средний поток суммарных испарений для данного региона. Была разработана числовая модель, которая позволяет моделировать движение воды в почве с однодневными интервалами.

следование процесса заиления озер в пойме рек Джамари и Джипарана, дренажирующих район Рондонии, т.е. анализируется стратиграфия изотопа свинец-210 и цезий-137 в керновых пробах донных отложений. Результаты исследования Лаго Пака, небольшого озера в пойме реки Джамари, указывают на десятикратное усиление заиления в течение последнего десятилетия, что непосредственно коррелируется с вырубкой леса и добычей олова. (См. рис. 3.)

Влияние на систему питания растений в пределах площадки

По своему характеру эффекты, ограниченные размерами конкретной площадки, перерастают в более крупномасштабные. С точки зрения питания растений тропический лес является точно сбалансированной системой. Такое крупное нарушение баланса, как вырубка лесов, поднимает проблемы динамики почвенных ресурсов азота, серы и других питательных веществ. Какое количество будет потеряно? Останется ли в почве достаточно ресурсов для возобновления девственного леса? До-

Рис. 3. Влияние добычи полезных ископаемых и вырубки леса на скорость заиления.



Исследования с применением изотопа свинец-210 показывают, что заиление озера Лаго Пака в Рондонии непосредственно связано с вырубкой леса и гидравлическими методами добычи олова (Данные Форсберга, Годова и Викторина).

статочны ли эти ресурсы для ведения сельскохозяйственной деятельности на освобожденных от леса площадках? Или эта тропическая почвенная система, как и многие другие, начнет приходить в упадок, необратимо двигаясь по спирали ухудшения плодородия почв? Как можно создать самовосстанавливающиеся системы?

Изотопные методы, часть которых являются относительно новыми, играют важную роль в исследованиях конкретных площадок. Вот несколько показательных примеров.

- **Исследования обмена органических веществ.** Изменения в соотношении изотопов углерод-13/углерод-12 в органическом веществе использовались для определения относительного вклада органического углерода, поступающего из леса и пастбищ. Через год после начала исследований в бассейне реки Амазонки доля углерода, поступившего из пастбищ, составляла 5 % в слое глубиной 20 см, а через два года – 20 %. Около 40 % углерода, поступившего из леса, исчезло. Однако пастбища в значительной степени возместили потери органического вещества.

- **Исследование биологической фиксации азота.** Биологическая фиксация азота является одним из путей поддержания уровней содержания азота в почве и сохранения ее плодородия. Оценку возможностей и масштабов этого процесса можно провести с помощью технологии применения радиоизотопного индикатора азот-15, включая относительное содержание природного изотопа азот-15 в растениях.

- **Исследования усвояемости и потерь азота.** Трудно переоценить значение экспериментального применения радиоизотопного индикатора азот-15 для определения потерь почвенного азота и его переноса в атмосферу и грунтовые воды, а также усвояемости азота из разлагающихся органических веществ. Аналогичным образом можно проводить исследования стабильных и радиоактивных изотопов серы.

Водные пищевые цепочки

Природные сочетания стабильных изотопов углерода, азота и серы используются в качестве индикаторов для определения энергоисточников водных пищевых цепочек. Исследования в бассейне реки Амазонки велись в основном с применением азота-13, который использовался, главным образом, для идентификации растительных источников энергии для рыб, аллигаторов и водных насекомых. Наиболее удивительным открытием до настоящего времени был тот факт, что травы типа C_4 , которые дают более половины первичной продукции поймы Амазонки, кажется, вносят очень небольшой вклад в водные пищевые цепочки. Данные указывают на то, что источники углерода типа C_3 занимают абсолютно доминирующее положение среди кормов для 90 % вылавливаемой в коммерческих целях рыбы в бассейне реки Амазонки.

Загрязняющие вещества

Существует множество типов загрязнителей и методов их исследования с использованием радиоизотопных измерительных приборов, например, в целях устранения загрязнителя или изучения его поведения и минимизации воздействия. Меченые радиоизотопными индикаторами ядохимикаты уже давно используются для изучения переноса и разложения пестицидов. В настоящее время разрабатываются мощные изотопные датчики ДНК для мониторинга развития редуцентов кальцирующих загрязнителей в почве.

Сильное беспокойство в промышленно развитых странах вызывает загрязнение воды нитратами в результате интенсивного применения удобрений. Одно из частичных решений этой проблемы заключается в селекции генотипов сельскохозяйственных культур, отличающихся хорошей урожайностью и требующих значительно меньших количеств удобрений (т.е. уменьшающих нагрузку на почву). Например, некоторые сорта зерновых культур более эффективно усваивают вносимые в почву азотные удобрения, чем другие зерновые. Такие изотопы, как азот-15, могут иметь ключевое значение в изучении причин данного явления и их применение растениеводами должно быть обязательным в определении свойств, которые нужно включить в их программы.

Аналогичным образом можно использовать стабильные изотопы азот-15 и сера-34 для проведения исследований воздействия атмосферного загрязнения. Изотопы углерод-14 и фосфор-32, например, широко применяются в физиологических исследованиях растений.

факторы. Кроме того, бобовые, определяющие соотношения углерод-13/углерод-12, открывают большие возможности для селекции генотипов растений, более рационально использующих воду в процессе роста. Эти и другие аспекты изучаются в рамках программ исследования почв Объединенного отдела ФАО/МАГАТЭ.

Оценка изменений

В данной статье обсуждаются некоторые возможные пути использования изотопов в исследованиях окружающей среды; они являются мощными инструментами, потенциал которых пока еще используется неполностью. Несмотря на то, что в статье конкретно не рассматриваются основные проблемы глобального изменения климата, вырубка лесов в бассейне реки Амазонки, один из вопросов, стоящих в центре внимания программы МАГАТЭ по охране окружающей среды, может иметь серьезные последствия для климата планеты. Эта проблема включает в себя значительное сокращение количества скрытого тепла, переносимого в регионы, расположенные за пределами тропиков, и усиление парникового эффекта за счет выброса огромных количеств двуокиси углерода и других газов, обуславливающих парниковый эффект.

Результаты, полученные с помощью современных климатических моделей, дают основание предположить, что полное и быстрое уничтожение амазонских лесов может стать необратимым процессом. Изменения в региональном гидрологическом цикле и нарушение сложных связей между растениями и животными могут привести к таким жестоким результатам, что после вырубки леса потеряют способность к самовосстановлению. Поэтому определенные „выходные данные“, полученные при изучении различных аспектов амазонской модели, станут важными „выходными данными“ для разрабатываемых в настоящее время моделей глобального изменения климата. Это с одной стороны. Другой аспект заключается в том, что изотопные методы будут играть полезную роль в определении и борьбе с прогнозируемыми изменениями. Можно привести два примера: применение изотопов углерода и азота в исследованиях изменений в органических веществах почвы и использование соотношений углерод-13/углерод-12 для выявления генотипов растений, которые более эффективно используют воду, в частности в районах с более сухим климатом, наступление которого предсказывают во многих частях мира.

Эрозия и опустынивание

Эрозия и опустынивание являются двумя крупными проблемами охраны окружающей среды глобального значения. Ежегодно около 6 млн. гектаров поглощаются пустынями. Очень часто определенную роль в измерениях эрозии играют изотопы, например, данные об изменениях в уровнях содержания цезия-137 в верхнем слое почвы использовались для измерения эрозии (цезий, попавший в почву с радиоактивными осадками).

Ключевую роль в восстановлении эродированных/опустыненных почв играют деревья и растения, фиксирующие в них азот. Азот-15 играет важную роль для определения фиксации азота различными деревьями и растениями, включая эффект регулирования объемов вырубки лесов и другие