

# ОТ АТОЛЛОВ В МОРЯ

ПАВЕЛ ПЕТЕР ПОВИНЕК И ЭККЕХАРД МИТТЕЛЬШТЕДТ

**М**оделирование переноса радионуклидов через морскую окружающую среду представляет сложную задачу. В рамках исследования радиационной обстановки на атоллах Муруроа и Фангатауфа ученые занимались рассмотрением проблемы рассеяния радионуклидов после их высвобождения из лагун Муруроа и Фангатауфа и из подземных источников. Изучение охватывало процессы смешивания радионуклидов в лагунах, их выхода в океан и переноса к побережью соседних островов и отдаленных континентов.

В данной статье освещается проведенная в ходе исследования работа по оценке рассеяния остаточных радионуклидов в океане и кратко излагаются основные выводы.

## МЕТОДОЛОГИЯ И ПОДХОДЫ

В целях моделирования пространства вокруг источника радиоактивности (т. е. вокруг точки, в которой радионуклиды высвобождаются в морскую окружающую среду) было разделено на три основные зоны: ближнее поле (лагун), региональное поле (в широком смысле район Французской Полинезии) и дальнее поле (территория южной части Тихого океана за региональным полем).

Для понимания динамики взаимодействия воды и отложений в ближнем поле рабочая группа по моделированию морской среды разработала в рамках исследования две модели. Модель смешивания воды использовалась для оценки концентраций радионук-

лидов в лагунах в отношении заданных поступлений из подземных источников в лагуны, а также для оценки скоростей потоков радионуклидов из лагун в окружающий океан.

Модель отложений была разработана в целях прогнозирования движения отложений между лагунами и океаном. Были сделаны оценки объемов отложений и соответствующего количества плутония, поступающих ежегодно из лагун в океан при средних погодных условиях или в условиях жестокого шторма.

Были рассчитаны уровни высвобождения радионуклидов из лагунных отложений, на основании которых были выведены оценки уровней высвобождения плутония, цезия-137, стронция-90 и трития из лагун в океан как функции времени.

Для моделирования рассеяния радионуклидов в региональном поле использовались три секторальные модели. Эти модели охватывали разные области с разным разрешением. Каждая из них имела свои достоинства и недостатки. Взятые вместе, они указывают на возможную неопределенность в оценках рассеяния и повышают устойчивость окончательных выводов.

Перенос и рассеяние радионуклидов в дальнем поле оценивались с использованием прогностической модели циркуляции в Мировом океане.

Выходные данные этих моделей представляют собой оценку концентрации радионуклидов в океане как временно-пространственной функции. Эти концентрации использовались для расче-

та доз облучения как реальных, так и гипотетических лиц в различных местах и в различные периоды в будущем.

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ЛАГУН

Радионуклиды в лагунных водах появляются вследствие выщелачивания радиоактивных материалов из донных отложений в лагунах и миграции материалов из подземных источников. Их концентрации в водах лагун определяются с учетом скорости их поступления в лагуну и обмена лагунных вод с океаном. При поступлении радионуклидов в лагуну первыми двумя стадиями процесса рассеяния являются смешивание в лагуне и обмен лагунных вод с океаном. Была разработана гидродинамическая модель циркуляции в лагуне и рассчитано среднее время обмена лагунных вод с океаном. Время такого водообмена, усредненное для всех времен года, по оценке, составило  $98 \pm 37$  дней и  $33 \pm 12$  дней для лагун Муруроа и Фангатауфа, соответственно.

Окончательная судьба незатвердивших отложений на дне

---

*Г-н Повинек — руководитель Радиометрической секции Лаборатории морской среды МАГАТЭ в Монако.*

*Г-н Миттельштедт, Федеральное морское и гидрографическое агентство Германии, был председателем Рабочей группы по моделированию морской среды в рамках исследования радиационной обстановки на атоллах Муруроа и Фангатауфа.*

лагуна (и содержащегося в них плутония) является важной с точки зрения оценки долгосрочных последствий радиационной обстановки на атоллах.

Для лагуны Муруроа была разработана модель переноса отложений; на ее основе был сделан предварительный расчет объема среднего годового переноса донных отложений через пролив в океан, который составил 80 тыс. т в год. Циклонический шторм, однако, в состоянии переместить очень большие объемы донных отложений из лагуны — один такой шторм может переместить около  $4 \times 10^6$  т отложений, в основном через край кольца атолла.

Годовой эквивалентный уровень поступления плутония из данного источника, по оценке, составляет порядка 0,1 ТБк. Ожидается, что энергетический уровень данного источника, реальный период полураспада которого составляет около десяти лет, уменьшится, поскольку содержащиеся плутоний отложения будут постепенно заноситься новыми осадочными породами.

## УРОВНИ ВЫСВОБОЖДЕНИЯ РАДИОНУКЛИДОВ

В качестве наиболее важных при моделировании рассматривались четыре радионуклида (триций, стронций-90, цезий-137 и плутоний-239, 240). Аналитики принимали во внимание поступление радионуклидов как в результате выщелачивания лагунных отложений, так и из подземных источников.

Никаких поступлений трития (период полураспада 12,3 года), наблюдаемого в форме воды, из отложений не отмечалось. Наблюдаемые концентрации (около 200 Бк/м<sup>3</sup>, двойное превышение по сравнению с океаническим фоном) относятся исключительно на счет подземных источников. Концентрации трития в ла-

гунах могут остаться относительно постоянными в течение ближайших нескольких десятилетий, прежде чем начнут медленно снижаться.

В отношении стронция-90 предполагается, что его концентрации образуются за счет как выщелачивания, так и подземных источников. Несмотря на отмеченный существенный разброс в прошлых данных по стронцию-90, представляется, что в течение нескольких десятилетий концентрации этого радионуклида могут превысить нынешние уровни, однако не более чем в два раза.

Что касается цезия-137, то его поступления из подземных источников в настоящее время связаны в некоторой степени с выщелачиванием отложений. Его концентрации в лагунах снижаются с учетом периода полураспада примерно в семь лет, и маловероятно, чтобы они превысили нынешние уровни в обозримом будущем.

В случае с плутонием выщелачивание лагунных отложений является сейчас единственным значительным источником его поступлений. На основе наблюдений сделан вывод, что концентрации плутония в лагунах будут снижаться с учетом периода его полураспада примерно в десять лет.

На основании измерений этих радионуклидов в лагунах и в открытом океане, проведенных морской рабочей группой, были сделаны расчеты нынешних уровней их высвобождения из лагун и прогнозы на будущее. Атолла Муруроа и Фангатауфа в качестве отдельных источников не рассматривались, поскольку в океанических масштабах они столь близки, что различить их невозможно. Высвобождение радионуклидов через лагуны рассматривается в качестве поверхностного; считается, что высвобождение их непосред-

ственно в океан происходит на глубине около 400 м.

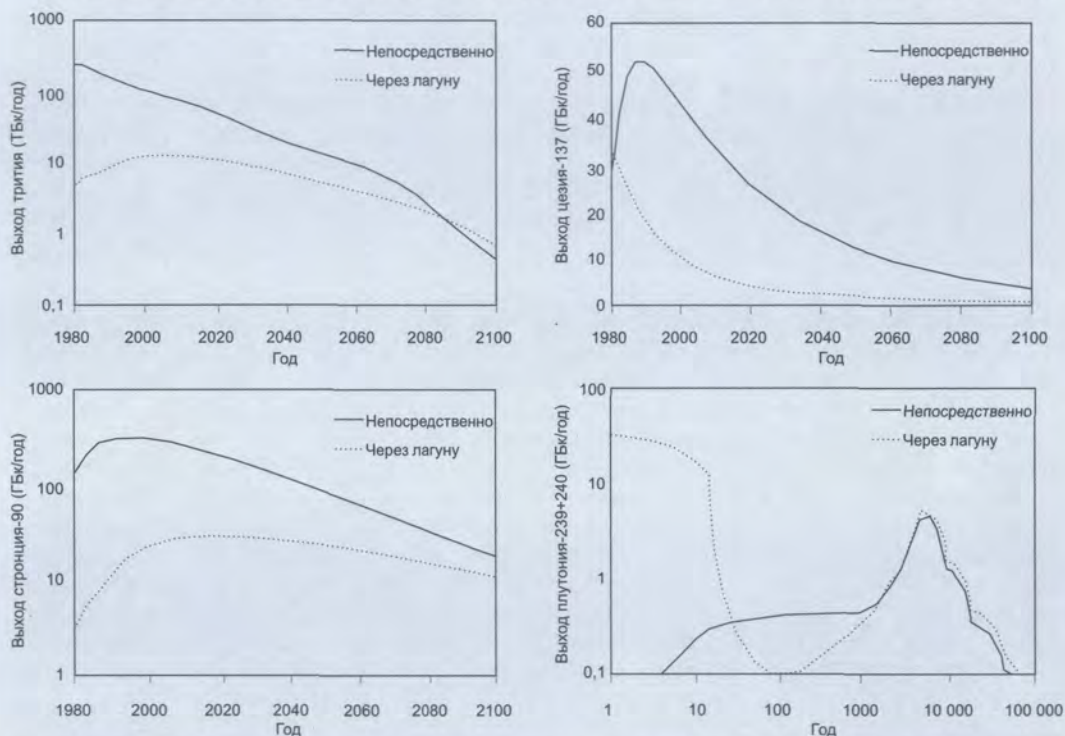
Суммарные уровни выделения стронция-90 и цезия-137 будут со временем снижаться с преобладающим поступлением этих радионуклидов из подземных источников непосредственно в океан (см. диаграммы на стр. 36). С другой стороны, в случае с плутонием, который будет мигрировать очень медленно, вклад подземных источников достигнет своего пика примерно через 6 тыс. лет и на гораздо более низком уровне, чем в настоящее время.

В случае какого-либо предполагаемого разрушительного события, например обвала карбонатной породы с мгновенным выбросом радионуклидов в морскую среду из подземных источников, расчетные выбросы составили 1 ПБк для трития, 30 ТБк для цезия-137, 10 ТБк для стронция-90 и 10 ТБк для плутония-239, 240.

## РЕГИОНАЛЬНЫЕ МОДЕЛИ РАССЕЙНИЯ

Для оценки рассеяния радионуклидов в региональном масштабе были разработаны три секторальные модели. Данная оценка охватывала такие близкие соседние атолла, как Турейя, и такие отдаленные, как Таити; она проводилась на долгосрочную перспективу. Указанные три модели имеют разное пространственное разрешение, разную степень, в какой принимается во внимание вертикальная структура в океане, и разное время, в течение которого удобно отслеживать рассеяние. Эти модели использовались применительно к “непрерывным” источникам, обусловленным миграцией в геосфере и меняющим свою мощность с течением времени, а также применительно к “мгновенным” выбросам, когда основная часть радионуклидов высвобождается в течение относительно корот-

## УРОВНИ ВЫХОДА РАДИОНУКЛИДОВ НА МУРУРОА И ФАНГАТАУФА



На диаграммах показаны прогнозируемые зависящие от времени уровни выходов трития, стронция-90, цезия-137 и плутония-239, 240 в биосферу.

кого времени (какой-то части года). Разумно предположить, что оба случая могут стать следствием разрушительных событий.

Было рассмотрено несколько гипотетических разрушительных событий. Они включали чрезвычайные события и явления, обусловленные климатическими изменениями, которые могут привести к повышенным уровням выброса радиоактивных материалов, удерживаемых в образованных взрывом кратерах, или к повышенным уровням облучения радиоактивным материалом в окружающей среде (например, плутонием в отложениях). Рассматриваемые события включали оледенение, приводящее к снижению уровня морей и обнажению дна лагун, а также обвал карбонатной породы, вызывающий «мгновенный» выброс высвобожденных этим обвалом радионуклидов.

Единственным разрушительным событием, потребовавшим тщательной оценки, оказался гипотетический отрыв и обвал крупных масс карбонатных формаций в северной зоне атолла Муруроа. Это — район, где проводились подземные проверочные испытания безопасности зарядов и отдельные ядерные взрывы, в ходе которых образовались кратеры, проникающие в карбонатные породы.

Секторальное моделирование регионального рассеяния радионуклидов обеспечивает оценку их концентраций в поверхностных водах у различных островов Тихого океана в разные периоды времени в рамках прогнозируемых выходов радионуклидов с атоллов Муруроа и Фангатауфа и мгновенных выбросов. Прогнозируемые концентрации на атоллах Французской Полинезии оказались ниже по сравнению с наблюдаемыми в

открытом океане в настоящее время концентрациями вследствие глобальных выпадений.

Лишь в случае выброса плутония, обусловленного разрушительным событием (обвалом), образуется более высокая концентрация (примерно на два порядка) на ближайшем атолле Турейя по сравнению с нынешними уровнями концентрации вследствие глобальных выпадений. Однако по истечении десяти лет прогнозируемые концентрации будут ниже нынешних фоновых концентраций.

### МОДЕЛИРОВАНИЕ ДАЛЬНЕГО ПОЛЯ

Для оценки концентраций радионуклидов в океане, высвобожденных на атоллах, а затем перенесенных на большие расстояния и рассеянных у восточного побережья Австралии и западного побережья Южной Америки,

была использована модель обшей циркуляции дальнего поля. Данная модель применялась в отношении источников непрерывной и мгновенной радиации, а также в отношении случаев, когда выброс радионуклидов происходит в поверхностный слой и когда он происходит на глубине 400 м, ниже термоклина. В последнем случае высвобожденный материал улавливается ниже термоклина и рассеяние сдерживается; более высокие концентрации радионуклидов наблюдаются на более удаленных расстояниях от места их выброса, но на глубинах около 400 м.

Лишь в случае гипотетического разрушительного события — обвал породы с выбросом радионуклидов на глубине 400 м — уровни концентрации трития, стронция-90 и цезия-137 в морской воде в районе атолла Турейя могут достичь уровней, наблюдаемых в южной части Тихого океана в настоящее время вследствие глобальных выпадений.

Например, максимальное прогнозируемое повышение концентрации трития через пять лет на полпути к Австралии составит около 10 Бк/м<sup>3</sup> и около 1 Бк/м<sup>3</sup> — у побережья Австралии пять лет спустя. Эти данные сравнимы с уровнем фоновой радиации трития в 50—100 Бк/м<sup>3</sup> на глубине 400 м. Выбросы плутония приведут к его прогнозируемой концентрации в океане в районе атолла Турейя, равной 100 мБк/м<sup>3</sup>, что примерно на два порядка превышает очень низкую концентрацию там в настоящее время (около 1 мБк/м<sup>3</sup>), обусловленную глобальными выпадениями вследствие всех ядерных испытаний в атмосфере. Концентрации плутония в океане в районе Турейя снизятся в течение десяти лет до фоновых концентраций.

В случае более реалистичного и зависящего от времени

выхода радионуклидов прогнозируемые долгосрочные концентрации радионуклидов опустятся ниже фоновых уровней в океане на расстоянии более 100 км от атоллов Муруроа и Фангатауфа.

Например, в случае поверхностного выброса плутония прогнозируемые максимальные поверхностные концентрации спустя десять лет составят в районе Муруроа около 0,2 мБк/м<sup>3</sup>. Это примерно на один порядок ниже нынешних уровней.

## ОБЩИЕ ВЫВОДЫ

В целом в результате работы по моделированию морской среды в рамках исследования были сделаны следующие выводы:

■ Расчетное время водообмена в лагунах составляет  $98 \pm 37$  дней для Муруроа и  $33 \pm 12$  дней для Фангатауфа.

■ Перенос связанных отложениями макрочастиц плутония-239, 240 из лагуны Муруроа в Тихий океан оценивается в 8 ГБк в год при умеренных ветрах и приливах и 0,7 ТБк в случае жестокого шторма (на один шторм). Считается, что один жестокий шторм бывает не более раза в десять лет. Предполагается, что энергетический уровень источника, обусловленный штормами, будет со временем снижаться вследствие истощения содержащих плутоний отложений и постепенного их заноса. Энергетический уровень источника, обусловленный высвободившимся в результате шторма плутонием, на один порядок ниже по сравнению с плутонием, высвободившимся в результате гипотетического разрушительного события.

■ Были смоделированы два основных сценария выхода радионуклидов: 1) разрушительное событие — обвал карбонатной породы с выбросом из карбонатной зоны радиоактивности, соответствующей инвентар-

ному количеству, полученному в результате одного проверочного испытания безопасности зарядов и одного испытания с образованием кратера; и 2) зависящий от времени источник, обусловленный миграцией материала из подземных полостей и выщелачиванием отложений в лагуне.

В большинстве случаев моделирования предполагается выход радионуклидов в поверхностные слои. Однако в некоторых расчетах предусматривалось расположение источника на глубине (400 м) с целью моделирования выхода из карстовых слоев.

В рамках этих сценариев рассматривалось максимальное повышение концентраций для лагун, а также островов и атоллов южной части Тихого океана. Прогнозируемые концентрации на ближайшем обитаемом атолле (Турейя) сопоставлялись с фоновыми концентрациями в открытом океане, обусловленными глобальными выпадениями. Лишь разрушительное событие может привести к выбросу плутония, концентрация которого окажется выше уровня фоновой радиации, и то лишь на несколько лет.

При выбросах на глубинах прогнозируемые концентрации радионуклидов на Хао и Таити будут выше, чем на атолле Турейя. Однако если данные для всех этих мест усредняются применительно к общей глубине в 450 м, то все они оказываются ниже максимальных значений.

В целом моделирование рассеяния радионуклидов с атоллов Муруроа и Фангатауфа в открытом океане дает четкие результаты. Проведенная работа показала, что ожидаемые концентрации на близлежащих обитаемых островах не будут настолько высокими, чтобы иметь значение с радиологической точки зрения. □