

МИГРАЦИЯ РАДИОНУКЛИДОВ В ГЕОСФЕРЕ

РОБЕРТ ФРАЙ, ДЕС ЛЕВИНС И ЭРНСТ ВАРНЕККЕ

После прекращения ядерных испытаний в атмосфере в 1974 г. французское правительство в период с 1975 по 1996 г. провело еще 147 ядерных экспериментов под атоллами Муруроа и Фангатауфа. Десять из них были проверочными испытаниями безопасности зарядов (при имитации аварийных условий) с незначительным выходом продуктов деления или без него.

Ни одно ядерное устройство очень высокой мощности не было взорвано под землей на атоллах Муруроа и Фангатауфа. Ни одно из них по мощности не превышало 150 килотонн. По сообщениям французского правительства, суммарный выход энергии в результате всех подземных испытаний составил 3,2 мегатонны (см. таблицу на стр. 32). В мире было произведено в целом свыше 1800 подземных ядерных испытаний, суммарная мощность которых составила 90 мегатонн, что в 30 раз превышает объявленную мощность французских подземных испытаний.

При ядерных испытаниях в атмосфере большая часть радиоактивных материалов рассеивается в верхних слоях атмосферы и в конечном счете оседает глобально в виде выпадений. При подземных испытаниях, наоборот, основная масса остаточных радиоактивных материалов удерживается породой, в которой размещался заряд, хотя при этом и остается потенциальная возможность выхода радионуклидов в локальную окружающую среду. При оценке радиологических последствий подземных испытаний необходимо рассчитывать возможные в будущем выходы радионуклидов из геосферы в доступную окружа-

ющую среду на протяжении периодов времени, обычно охватывающих 10 тыс. или более лет.

Расчет уровней выхода радионуклидов из геосферы являлся одной из самых сложных и трудных задач в рамках общего исследования радиационной обстановки на атоллах Муруроа и Фангатауфа. Хотя геологическая среда на атоллах во многих отношениях является уникальной, методология, использованная в исследовании, пригодна для оценки миграции радионуклидов из других мест подземных ядерных испытаний.

ГЕОЛОГИЯ АТОЛЛОВ

С воздуха атоллы кажутся тонкими кольцами кораллов, выступающими всего лишь на несколько метров над уровнем моря. В действительности же они представляют собой массивные вулканические подводные горы, поднимающиеся примерно на 4 км со дна моря и покрытые несколькими сотнями метров карбонатной горной породы, образованной коралловыми приращениями.

Вулканические извержения, приведшие к образованию атоллов, происходили примерно 11 млн. лет назад. Питаемые горячей зоной в земной коре вулканы росли в размерах, достигая поверхности океана и продолжая действовать в течение некоторого времени в качестве субаэральных вулканов. После прекращения вулканической деятельности эти структуры медленно оседали за счет своей огромной тяжести и изостатического состояния лежащей в их основе Тихоокеанской плиты. В ледниковые периоды уровень моря снизился почти на 120 м, уничтожая кораллы и подвергая карбонатную горную породу воз-

действию эрозии и выщелачиванию дождевой водой. Всего вероятнее, что карсты (взаимосвязанные области высокой проницаемости), встречающиеся в карбонатных горных породах, образовались в эти ледниковые периоды.

В настоящее время вулканические горные породы увенчаны шапкой из карбонатной породы высотой до 450 м, нижняя часть которой превратилась в доломит вследствие диагенетических обменных процессов с окружающей морской водой.

Вулканическое основание атолла включает разветвленную сеть преимущественно линейных расщелин различных размеров. Проводящие пути образовывались благодаря действию самых разных механизмов, таких как крупномасштабные интрузии магмы, усадка пород вследствие охлаждения, образование более широких разломов (дайки и силли) инъекциями магмы, имевшими место после охлаждения первичной вулканической горной породы. Эта сеть разломов является главным каналом переноса воды (и радионуклидов).

Стенки первоначально крупных каналов в базальте подвергаются химическому изменению

Г-н Фрай был руководителем технического проекта МАГАТЭ по исследованию радиационной обстановки на атоллах Муруроа и Фангатауфа. Г-н Левинс, сотрудник Австралийской организации по ядерной науке и технике, был председателем Целевой группы В в рамках исследования. Г-н Варнекк, сотрудник Отдела радиационной безопасности и безопасности радиоактивных отходов МАГАТЭ, входил в Рабочую группу 3.

под воздействием проточной воды, что с течением времени может привести к частичной закупорке каналов продуктами этих изменений, такими как глина и кальциты. У этих продуктов, как правило, большая площадь поверхности и отличные удерживающие свойства в отношении некоторых радионуклидов, в частности актинидов, поэтому они играют важную роль в замедлении процесса переноса радионуклидов через геосферу.

ЯДЕРНЫЕ ИСПЫТАНИЯ И МЕСТА ИХ ПРОВЕДЕНИЯ

В процессе подземного ядерного взрыва вулканическая порода атоллов в непосредственной близости от центра детонации подвергается плавлению и испарению, при этом образуются примерно сферическая полость и на дне полости — принимающая форму линзы масса расплавленной вулканической породы, которая по мере охлаждения превращается в стеклообразную лаву.

Масса испарившегося во время взрыва материала составляет около 80 т на килолтонну мощности. Количество лавы, образованной во время взрыва, колеблется от 500 до 1000 т на килолтонну мощности, в зависимости от характера породы и содержания в ней влаги.

Французские официальные органы не предоставили исследовательской группе информации о точном расположении площадок по каждому из 147 подземных взрывов. Однако они обеспечили ее схематическим планом каждого атолла с указанием зон испытаний, количества испытаний, максимальной мощности и суммарной мощности взрывов в каждой зоне.

Все ядерные испытания проводились в вулканических породах на глубинах от 500 до 1100 м. Все десять взрывов, проведенных в рамках проверочных испытаний безопасности зарядов, были проведены в одной зоне на атолле Муруороа, при этом семь из них — в карбонатных породах

на глубинах ниже 280 м. Три из указанных проверочных испытаний, проведенных в карбонатных породах, имели незначительный выход продуктов деления.

Не все испытания были в равной степени эффективными с точки зрения удержания радионуклидов, образовавшихся во время ядерных взрывов. В расчетных целях дискретные источники радиации по энергетическому уровню были разбиты на семь категорий:

Категория 1. 121 обычное испытание, при проведении которых поверх каждого испытательного столба обрушения в целях обеспечения хорошей герметизации сохранялся слой по преимуществу неповрежденной вулканической породы необходимой толщины.

Категория 2. Четыре испытания с вполне достаточной толщиной покрывного слоя, но, однако же, с определенной неадекватностью вулканического покрытия.

Категория 3. Двенадцать испытаний, в которых столб обрушения достигал вершины вулканической горной породы.

Категория 4. Три проверочных испытания безопасности зарядов, в которых отмечался (очень низкий) выход продуктов деления, на глубине по крайней мере 280 м в карбонатной породе.

Категория 5. Четыре проверочных испытания безопасности зарядов на глубине по крайней мере 280 м в карбонатной породе без выхода продуктов деления.

Категория 6. Три проверочных испытания безопасности зарядов в вулканической породе без выхода продуктов деления.

Категория 7. Два шахтных ствола для отходов, пробуренных глубоко в вулканической породе, в каждый из которых были удалены отходы, содержавшие 3,7 кг плутония.

Практически было установлено, что основную массу выхода радиоактивных продуктов в биосферу следует отнести на счет четырех категорий: 2, 3, 4 и 5.

ИНВЕНТАРНОЕ КОЛИЧЕСТВО РАДИОНУКЛИДОВ

Первым шагом в расчетах уровня миграции радионуклидов является определение инвентарного количества радионуклидов под землей. Французские ученые предоставили верхние предельные значения по выходу продуктов деления для каждой зоны испытаний. Эти данные подвергались независимой проверке с использованием независимых сейсмических данных по каждому испытанию, полученных с сейсмической станции Раротонга на островах Кука. Была отмечена отличная согласованность французских данных с оценками МАГАТЭ, что позволяло с большой долей вероятности утверждать, что французские верхние пределы в действительности очень близки к реальным значениям.

Инвентарное количество радионуклидов рассчитывалось на основе выхода продуктов деления, при этом делались допустимые предположения о соотношении энергии деления плутония-239, урана-235, урана-238 и энергии синтеза изотопов водорода. Указанные расчеты также хорошо согласовывались с данными, предоставленными французскими официальными органами (см. таблицу на стр. 32).

ГИДРОГЕОЛОГИЯ АТОЛЛОВ

Как вулканические, так и карбонатные зоны атоллов насыщены водой. По существу, циркуляция грунтовых вод в атолле определяется подъемными силами, обусловленными нагревающими систему снизу геотермальными потоками. Холодные и более плотные океанические воды проникают на глубину с боков атолла, движутся к центральным более теплым областям, постепенно нагреваются, становятся легче и поднимаются вверх в направлении лагуны. Высокая проницаемость внутри карбонатных формаций способствует прохождению мощных почти гори-

зонтальных центростремительных потоков холодной воды.

В результате ядерного взрыва естественное доиспытательное состояние гидрологии вблизи кратера меняется вследствие повышения проницаемости и нагревания воды и породы. Это приводит к усилению восходящего потока воды из кратера в направлении доступной окружающей среды.

После установления теплового баланса температура в кратере превышает температуру окружающей среды примерно на 25—50°C. Такой рост температуры, по существу, не зависит от мощности взрыва. Температура в кратере будет медленно снижаться в течение нескольких сот лет вследствие комбинированного воздействия процессов конвекции и теплопроводности.

Что касается потоков подземных вод под атоллom Муруроа, то скорости их движения являются наиболее высокими в районе каждого испытания и в карбонатных породах с повышенной проницаемостью. Кроме того, потоки в карбонатных породах подвергаются воздействию приливно-отливных флуктуаций, которые фактически перемешивают воду в карбонатных зонах (особенно в карстах), влияя тем самым на уровень выброса радионуклидов как в лагуну, так и непосредственно в океан.

МИГРАЦИЯ РАДИОНУКЛИДОВ

Прежде чем начать мигрировать в геосфере, радионуклиды должны присутствовать в водной фазе. Ввиду высоких давлений на глубине летучие или газообразные радионуклиды (такие как тритий, благородные газы и йод), присутствовавшие ранее в газообразной фазе, растворяются в воде.

Большинство радионуклидов, однако, либо удерживается лавой, либо сорбируется на обломках породы. Экспериментальные данные показывают, что выделение радионуклидов из лавы и обломков породы осу-

ИНВЕНТАРНЫЕ КОЛИЧЕСТВА ОТДЕЛЬНЫХ ДОЛГОЖИВУЩИХ РАДИОНУКЛИДОВ НА АТОЛЛАХ МУРУРОА И ФАНГАТАУФА

Радионуклиды	Данные исследования (ТБк)		
	Муруроа	Фангатауфа	Всего
Тритий	232 000	48 000	280 000
Углерод-14	25	2,6	28
Хлор-36	1,3	0,4	1,7
Кальций-41	1,0	0,3	1,3
Никель-59	2,9	0,9	3,8
Никель-63	340	110	450
Селен-79	0,008	0,003	0,011
Криптон-85	670	380	1 000
Стронций-90	7 300	3 500	10 800
Цирконий-93	0,23	0,09	0,32
Технеций-99	1,9	0,6	2,5
Палладий-107	0,18	0,03	0,21
Йод-129	0,0047	0,0014	0,0061
Цезий-135	0,20	0,07	0,27
Цезий-137	10 700	4 100	14 800
Европий-152	230	100	330
Нептуний-237	0,22	0,03	0,25
Плутоний-238	185	15	200
Плутоний-239	1 030	70	1 100
Плутоний-240	280	20	300
Плутоний-241	6 200	620	6 800
Америций-241	350	30	380

СРАВНЕНИЕ РАСЧЕТОВ МОЩНОСТЕЙ ПОДЗЕМНЫХ ЯДЕРНЫХ ИСПЫТАНИЙ

Место испытания	Общая энергия (эквивалент в килотоннах TNT)		
	Число испытаний	Расчеты в рамках исследования	Французские данные
Атолл Муруроа	83	970	<1060
Лагуна Муруроа	54	1443	<1450
Атолл Фангатауфа	2	39	<20
Лагуна Фангатауфа	8	731	<750
Всего	147	3183	<3280

ществляется посредством разных механизмов. Выщелачивание лавы является медленным, малоинтенсивным процессом, в то время как выделение из обломков породы предполагает равновесно контролируемый процесс взаимодействия между грунтовыми водами и радионуклидами, сорбированными твердой поверхностью.

Для оценки скорости переноса радионуклидов из образованного взрывом кратера в карбонатные формации в исследовании использовалась модель двойной пористости. Расчеты делались для 32 радионуклидов, но особое

внимание было уделено четырем ключевым радионуклидам — плутонию-239, цезию-137, стронцию-90 и тритию.

В рамках анализа была инициирована программа независимого отбора проб грунтовых вод. Это было сделано с целью проверки результатов более крупномасштабных измерений, сделанных французскими учеными, а также с целью сравнения сделанных исследовательской группой прогнозов с измеренными концентрациями радионуклидов. Были взяты пробы воды из двух кратеров, образовавшихся в результате испытаний, и из карбонат-

ных формаций в девяти других местах.

Была отмечена хорошая согласованность между французскими данными и результатами, полученными в рамках исследования. Концентрации плутония оказались или на пределе обнаружения, или не обнаруживались вообще, даже в кратерах. Был сделан вывод, что плутоний реально удерживается стеклообразной лавой, образующейся в результате ядерного взрыва, хотя в исследовании придерживались консервативного первоначального предположения о том, что 5% радионуклидов осаждаются в обломках породы.

На основе результатов взятия проб грунтовых вод были сделаны расчеты инвентарных количеств радионуклидов в пределах конкретных зон карбонатных формаций. Выход радионуклидов из карбонатных формаций в геосферу может осуществляться либо посредством восходящего потока грунтовых вод в лагуну, либо посредством потока вдоль карстовых слоев и в океан на глубине около 300 м.

Хотя карбонатные формации и отличаются хорошей проницаемостью, они в то же время являются крупными водными резервуарами, среднее время пребывания которых в немигрирующем состоянии значительно больше времени полураспада отдельных радионуклидов, таких как тритий, стронций-90 и цезий-137.

Для описания выхода радионуклидов в биосферу оценивались две модели: модель одинаковой пористости и модель смешивания.

В модели смешивания выход радионуклидов в лагуны или в океан пропорционален их инвентарному количеству в карбонатах. Для случая выхода радионуклидов в лагуны константа пропорциональности может быть рассчитана по результатам оценки текущего инвентарного количества трития в карбонатных формациях и измерения уровня повышения содержания трития в лагунах; это соответствует

выходу примерно 0,12% инвентарного количества в год. Что касается выхода радионуклидов в океан, то этот уровень, по расчетам на основе ограниченных данных по латеральному рассеянию трития в карбонатах, составляет приблизительно 5% в год.

С использованием модели смешивания для выхода радионуклидов из карбонатов и модели двойной пористости для их переноса сквозь вулканические породы были рассчитаны инвентарные количества в карбонатах и уровни выхода радионуклидов в биосферу на сотни лет вперед для трития, стронция-90 и цезия-137, а также на период более 100 тыс. лет — для плутония-239.

Важнейший вывод из этих прогнозов заключается в том, что уровни выхода трития, стронция-90 и цезия-137 в лагуны в будущем, по всей видимости, не превысят этих уровней в настоящее время. Максимальные прогнозируемые уровни выхода радионуклидов в океанические глубины уже подтвердились.

В отношении плутония-239 максимальные уровни выхода радионуклидов из подземных источников прогнозируются на период от 5 тыс. до 10 тыс. лет в будущем, но ожидается, что они будут ниже, чем нынешние уровни их выхода в лагуны, вследствие выщелачивания содержащих плутоний отложений.

Уровни выхода радионуклидов в лагуны и океан, прогнозированные с помощью описанных выше моделей, использовались в качестве исходного материала в моделировании рассеяния радионуклидов в морской среде и, наконец, в расчете доз облучения от этих радионуклидов (см. соответствующие статьи на стр. 34 и 38).

ВЫВОДЫ

Основные выводы из оценки миграции радионуклидов из подземных источников на атоллах Муруроа и Фангатауфа следующие:

■ Полученные в рамках исследования независимые расчеты выделения энергии и инвентарных количеств радионуклидов, образовавшихся в результате подземных ядерных испытаний, хорошо согласуются с объявленными французскими данными.

■ Ядерные испытания приводят к повышению проницаемости в породах, прилегающих к месту взрыва.

■ В вулканических и карбонатных породах существует естественный восходящий поток грунтовых вод, который поднимается выше всего в непосредственной близости к месту ядерного взрыва.

■ Отбор и анализ проб подземных вод из двух кратеров, образованных взрывом, показали очень низкие концентрации плутония. Большая часть плутония (>99%) эффективно удерживается затвердевшей стеклообразной лавой, образовавшейся после ядерного взрыва.

■ Карбонатные зоны подвергаются воздействию приливно-отливных флуктуаций, которые могут привести к определенному высвобождению радионуклидов непосредственно в океан на глубине.

■ Большая часть выбросов радионуклидов непосредственно или вскоре после взрыва происходит в тех относительно немногих случаях, когда отсутствует вулканическое покрытие над кратером или когда такое покрытие оказывается дефектным.

■ Лишь весьма незначительная часть инвентарного количества радионуклидов попадает из геосферы в доступную окружающую среду. Наивысшие уровни высвобождения радионуклидов (с точки зрения их активности) следует отнести на счет трития, но они не имеют радиологического значения. Уровни высвобождения других радионуклидов обычно не поддаются определению в окружающей среде по причине их растворения в лагунах и океане до пренебрежимо малых концентраций. □