

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЫПАДЕНИЙ, ОБУСЛОВЛЕННЫХ ЯДЕРНЫМИ ИСПЫТАНИЯМИ

“ГОРЯЧИЕ ЧАСТИЦЫ” И “ХОЛОДНАЯ ВОЙНА”

ПЬЕР РОБЕРТО ДАНЕЗИ

К началу следующего столетия число зарегистрированных ядерных испытательных взрывов различной мощности и типов составит более 2 тыс. Почти все они были проведены в период “холодной войны”, закончившейся в 90-е гг.

Остаточные радиоактивные материалы ядерных испытаний в атмосфере рассеялись в окружающей среде. В зависимости от типа испытаний, места их проведения и мощности они разделились между локальной земной (или водной) поверхностью и тропосферными и стратосферными районами. В дальнейшем атмосферные осадки, содержащие остаточные радиоактивные материалы, образуют как локальные, так и глобальные радиоактивные выпадения. Концентрации определенных радионуклидов могут привести к образованию “горячих частиц” — крошечных кусочков материи, содержащих радиоактивные химические элементы.

Локальные радиоактивные выпадения включают крупные радиоактивные аэрозоли — частицы, осаждаемые обычно в радиусе около 100 км от места взрыва. Локальное радиоактивное загрязнение на полигонах по испытанию ядерного оружия, кроме того, увеличивается за счет проверочных испытаний безопасности зарядов, которые часто приводят к рассеянию делящегося материала. Выброс такого материала происходит в различных формах, включая пары плутония, аэрозоли плутония различных размеров, макрочастицы оксида плутония, покрытые плутонием частицы, крупные куски загрязненных плуто-

нием конструкционных материалов, разрушенных в результате испытательного взрыва.

Глобальные выпадения подразделяются на тропосферные и стратосферные. Первые состоят из аэрозолей, которые не переносятся через тропопаузу и которые осаждаются в среднем в течение 30 дней. За это время радиоактивные остатки рассеиваются в широтной полосе, в которую они были внесены взрывом, по траекториям, определяемым розой ветров. Стратосферные выпадения обусловлены частицами, которые позже порождают широкомасштабные глобальные выпадения, по большей части в том полушарии, где был проведен ядерный взрыв. На их счет относится основная часть остаточных долгоживущих продуктов деления.

В результате ядерных выпадений люди подвергаются воздействию радиоактивности посредством внутреннего облучения (вдыхание находящихся в воздухе радиоактивных материалов или потребление загрязненных пищевых продуктов) и внешнего облучения (радиоактивными материалами, присутствующими в приземном слое воздуха или осажденными на почву). В этой области уже проведены крупномасштабные исследования.

В случае ядерных испытаний оценка характера основного события обычно включает анализы

Фото: Памятный знак на месте бывшего ядерного полигона в Марлинге, Южная Австралия. Рабочая группа МАГАТЭ проводит отбор проб почвы на полигоне Муруроа во Французской Полинезии для анализа горячих частиц. (Danesi/IAEA)



радиоактивного материала, осажденного на землю. Однако такие исследования вызывают сомнения, поскольку за время между ядерным взрывом и отбором проб для радиохимического анализа могут произойти существенные изменения в составе радионуклидов. Процесс, именуемый фракционированием, делает пробы радиоактивных остатков нерепрезентативными в отношении продуктов взрыва.

Фракционирование начинается с конденсацией радиоактивного и инертного материала, образованного огненным шаром. Смесь может начать разделяться еще в процессе конденсации под влиянием ветра, силы тяжести и турбулентности атомного облака. В дальнейшем разделение конденсата происходит через различные процессы, включая контакт радиоактивных остатков с инертным материалом.

После образования атомного облака процессы охлаждения,

Г-н Данези — директор Лабораторий МАГАТЭ в Зайберсдорфе близ штаб-квартиры Агентства в Вене, Австрия.

конденсации, коагуляции, смешения и разделения происходят одновременно, но с разной степенью интенсивности в различных районах облака. Кроме того, в результате процессов радиоактивного распада меняется элементарная форма первоначальных радиоактивных продуктов.

Горячие частицы. Научное понимание явления фракционирования является важным для интерпретации глобальных выпадений и ядерной химии процесса взрыва; оно полезно также для оценки опасностей, связанных с заражением и потреблением в пищу зараженных продуктов.

Вариации в размерах и типах частиц сопровождаются различиями в радиохимическом составе в соответствии с моделями фракционирования. Природа и концентрация радионуклидов, наряду с размером и формой частиц, являются, в свою очередь, факторами, определяющими связанные с процессами вдыхания или потребления пищи опасности.

Другая важная научная информация касается химической формы, в которой радионуклиды присутствуют в частицах. Радионуклиды в горячих частицах являются в целом относительно инертными по сравнению с ионами, атомами и изотопами, обладающими низкой молекулярной массой, которые более подвижны и легко выделяются.

Подробная физико-химическая информация по энергетическому уровню этого источника важна для оценки краткосрочных и долгосрочных последствий атмосферных выпадений, и в частности утечки радионуклидов из горячих частиц. Обычно характеристики энергетического уровня источника радиации сводятся к оценке инвентарных количеств, уровней активности или концентраций активности осажденных радионуклидов. Информация по

физико-химической форме является ограниченной.

После осаждения частицы подвергаются воздействию атмосферных условий, и содержащиеся в них радионуклиды становятся со временем подвижными. На интенсивность разрушения под воздействием атмосферных условий будут оказывать влияние состав частиц, возможные структурные изменения и химические условия в месте осаждения. Кроме того, ставшие подвижными радионуклиды могут также взаимодействовать с почвой и отложениями.

В большинстве моделей по оценке переноса и последствий загрязнения радионуклидами предполагается, что радионуклиды присутствуют в виде ионов или изотопов с низким молекулярным весом. Это может легко привести к завышенной оценке краткосрочных последствий радиационного загрязнения.

С другой стороны, если частицы довольно инертны, как это часто случается, перенос радионуклидов будет задержан до их окончательного разрушения в результате атмосферного воздействия. Следовательно, оценка долгосрочных последствий радиационного загрязнения может оказаться заниженной.

Отсюда очевидно, что без учета роли горячих частиц сделанные на основе моделей прогнозы могут содержать значительные погрешности.

Присутствие горячих частиц может также сделать несостоятельными некоторые предположения, касающиеся загрязнения почвы и отложений. Это относится к довольно частому допущению, что пересчет концентраций радиоактивности на поверхности или в какой-либо массе в единицы разных порядков (например, из Бк/см² в Бк/м² или Бк/км², и наоборот) является правомерной операцией.

Приведенные ниже примеры иллюстрируют конкретные подходы к изучению горячих час-

тиц на полигонах по испытанию ядерного оружия.

ИССЛЕДОВАНИЯ В ЮЖНОЙ АВСТРАЛИИ

С 1953 по 1963 г. Соединенное Королевство осуществляло программу испытаний ядерного оружия на полигонах Маралинга и Эму в Южной Австралии. На этих площадках, в настоящее время полностью возвращенных в первоначальное состояние, было проведено девять ядерных взрывов и несколько сот более мелких проверочных испытаний безопасности зарядов.

В то время как мощность крупных взрывов колебалась от 1 до 27 килотонн, при малых испытаниях происходило лишь стогранье и взрывное рассеяние урана, плутония и короткоживущих радионуклидов. Последствия таких испытаний для окружающей среды широко исследовались Австралийской радиационной лабораторией (АРЛ) и явились предметом ряда публикаций.

Наиболее существенное загрязнение плутонием на полигоне Маралинга явилось следствием серии из 12 проверочных испытаний безопасности зарядов, в ходе которых в окружающую среду было выброшено 22 кг плутония (и аналогичное количество урана-235). Указанный материал был рассеян обычными взрывчатыми веществами, при этом имели место лишь незначительные ядерные реакции или они полностью отсутствовали. Плутоний выбрасывался вертикально вверх на высоту до 800 м и рассеивался господствующими ветрами на значительные расстояния. Это вызвало загрязнение крупных участков земли. Плутоний мог быть обнаружен за многие километры от мест detonации.

АРЛ идентифицировала плутоний в основном в трех формах: в виде поверхностного покрытия на таких материалах, как куски металла, пластика, проволоки и свинцовых кирпичей, яв-

лявшихся частью экспериментальных сборок: в виде крохотных фрагментов или частиц, не всегда различимых глазом, но легко обнаруживаемых гамма-мониторами; и в виде очень мелкого рассеянного материала, состоящего из частиц зараженной почвы и частиц реконденсированного плутония, диапазон размеров которых был тот же, что у частиц почвы.

Образцы такого материала отбирались и отделялись путем просеивания до размера 45 микрон в диаметре в целях определения концентраций по массе и активности. Результаты показали, что наибольшая масса, как правило, была связана с фракцией в 250—500 микрон, однако наивысшая концентрация активности (около 41%) отмечалась у фракции размером менее 45 микрон, которая составляла лишь 5% общей массы.

Наименьшая фракция подвергалась дальнейшему разделению на семь аэродинамических размеров в диапазоне от 45 до менее 3 микрон. Таким способом была также выявлена вдыхаемая фракция, которая была определена как фракция размером менее 7 микрон.

Были также идентифицированы частицы в образце почвы весом 800 г (с активностью 25 Бк америция-241), размельченном в процессе бинарных разделений на дискретные частицы. Было установлено, что вся активность образца содержалась в 54 выделенных горячих частицах. Активность индивидуальных частиц была, по оценке, порядка от 0,1 до 2,0 Бк америция-241, а их средний диаметр составлял около 20 микрон.

В процессе исследования было идентифицировано также большое число субмиллиметровых горячих частиц, которые анализировались методом гамма-спектрометрии с высоким разрешением (для определения отношения плутония-239 к америцию-241), а также на случай

возможного биологического поглощения. Пять субмиллиметровых частиц с активностью от 30 Бк до 5 кБк были также подвергнуты анализу методом протониндуцированной рентгеновской спектроскопии с целью получения информации по их элементарному составу и однородности.

В этих частицах диаметром в несколько сот микрон было установлено однородное распределение плутония и урана на поверхности. Основными обнаруженными элементами были алюминий (1,8%), калий (2,3%), кальций (1%), железо (23%), свинец (от 1,9% до 35%), уран (от 2,9% до 0,8%) и плутоний (19%). Исследования по растворению данных частиц в имитированной легочной жидкости показали, что они обладают лишь незначительной растворимостью.

ИССЛЕДОВАНИЯ ВО ФРАНЦУЗСКОЙ ПОЛИНЕЗИИ

Другие исследования горячих частиц проводились во Французской Полинезии группой экспертов в рамках Международного исследования радиационной обстановки на атоллах Муруроа и Фангатауфа, завершено в 1998 г. С июля 1966 г. по сентябрь 1974 г. там было проведено 41 ядерное испытание в атмосфере. В дополнение к этому было проведено пять проверочных испытаний безопасности зарядов на поверхности северной оконечности атолла Муруроа, в местах, называемых обычно районом Колетт.

Проверочные испытания безопасности зарядов проводились с целью исследования поведения центральной части ядерных устройств в условиях моделированного аварийного взрыва. Центральная часть подвергалась разрушению с помощью детонации обычных взрывчатых веществ с последующим рассеянием в ходе каждого испытания около

3,5 кг плутония-239 в форме мелкоразделенного плутония и оксида плутония. Несмотря на крупномасштабные операции по очистке территории, проведенные в 1982—1987 гг., горячие частицы плутония остались на поверхности в районе Колетт и на прилегающем песчаном берегу лагуны.

В рамках Международного исследования группа ученых провела оценку остаточного загрязнения наземной окружающей среды на атоллах Муруроа и Фангатауфа, включая район Колетт. Операции по отбору проб были организованы и координировались лабораториями МАГАТЭ в Зайберсдорфе и проводились летом 1996 г. За ними последовали широкомасштабные радиохимические измерения примерно 300 проб (*см. статью на стр. 24*).

Анализ остаточного загрязнения в районе Колетт обнаружил присутствие содержащих плутоний горячих частиц. Двадцать относительно крупных частиц, размером от 200 микрон до 1 мм, были выделены из обломочного кораллового материала и измельченной коралловой породы. Они были измерены методом гамма-спектрометрии с высоким разрешением с целью оценки их активности и отношения плутония-239 к америцию-241. Установленная активность плутония-239 была в диапазоне от 5 до 300 кБк, хотя была также обнаружена частица с уровнем активности около 1 МБк. Активность америция-241 в частицах составляла от 0,2 до 5,6 кБк. Шесть из этих горячих частиц диаметром от 200 до 500 микрон были также изучены методом оптической микроскопии и микрофлуоресценции. Наблюдения показали, что некоторые частицы были гладкими, стекловатыми и компактными, в то время как другие казались шероховатыми и могли даже быть конгломератами более мелких частиц.

В дополнение к плутонию в частицах были обнаружены другие элементы. Они включали уран и нептуний в концентрациях в 10—100 раз меньших по сравнению с плутонием; кальций (что говорит о наличии в них кальциокарбонатной матрицы); железо (что свидетельствует об их металлической природе); хлор (по всей видимости, из соли морской воды); и следы марганца, никеля, хрома, кобальта и титана (что, по-видимому, отражает состав стальных контейнеров для делящихся материалов, использовавшихся в проверочных испытаниях безопасности зарядов).

Для оценки распределения плутония в коралловых обломочных материалах был отобран образец весом в 1053 г, который был разделен на ситах до получения фракций семи размеров. Активность плутония и америция в различных фракциях измерялась методом гамма-спектрометрии с высоким разрешением. Результаты показали, что 99,9% массы и 95,8% активности присутствовали в частицах размером более 250 микронов.

Тем не менее необходимо отметить, что по результатам исследования не исключается присутствие частиц размером менее 10 микронов (содержащих вдыхаемую фракцию) с активностью плутония-239 в несколько сот беккерелей. Исследования процессов растворения *in vitro* в моделированной сыворотке шести горячих частиц показали, что количество растворенного плутония во всех случаях было ниже 0,07% от исходного его количества в частицах, что указывает на характеристики растворимости, аналогичные характеристикам частиц с испытательного ядерного полигона Маралинга.

БУДУЩЕ ПОТРЕБНОСТИ

Исследование горячих частиц имеет большое значение для получения точных оценок ради-

ационной опасности на площадках, загрязненных в результате испытаний ядерного оружия. Однако проведенные до сих пор исследования породили больше вопросов, чем дали окончательных ответов. Они показывают, что информация по горячим частицам и их фракционированию, полученная в процессе радиохимических, химических и физических анализов обломков, все еще продолжает оставаться слишком недостаточной и разрозненной с учетом многообразной природы полученных частиц и количества переменных, требующих изучения. Поэтому сложные явления, управляющие образованием горячих частиц, их химическим и радиохимическим составом, физическими и морфологическими свойствами и поведением в природной окружающей среде, до сих пор до конца еще не поняты.

Очевидно, что явления, ведущие к образованию горячих частиц, и их поведение в экосистемах отличаются сложностью. Таким образом, к любым обобщениям необходимо подходить с осторожностью. Считается, что дальнейший прогресс в этой области потребует участия междисциплинарных коллективов ученых. Они должны включать физических химиков, специалистов в области неразрушающих микроаналитических методов, радиохимиков, ядерных физиков и специалистов в области защиты от ионизирующих облучений.

Необходимо также отметить, что горячие частицы различных размеров и состава, содержащие актиниды, продукты деления или активации, выбрасываются в окружающую среду и из других источников помимо ядерных испытаний. Например, они образовывались во время пожара на ядерном реакторе Уиндскейл в 1957 г., во время аварии самолета Б-52 в Туле в 1968 г. и спутника "Космос" в Канаде в 1978 г., а также во

время аварии на Чернобыльской АЭС в 1986 г. Выброс горячих частиц в окружающую среду происходит также на предприятиях по изготовлению делящихся материалов в рамках программ по производству ядерного оружия.

В целом, как известно, любая установка по переработке ядерных материалов выбрасывает незначительные, но поддающиеся обнаружению количества радиоактивных и нерадиоактивных изотопов непосредственно в окружающую среду. Эти выбросы, зачастую незначительные с точки зрения радиационной опасности, принимают разную форму — потоков, аэрозолей или частиц отходов — и могут быть обнаружены на некотором расстоянии от места сброса с подветренной стороны или вниз по течению потока.

Для изучения других источников радиоактивности в окружающей среде могут быть использованы те же современные аналитические методы, что и для исследования горячих частиц, образованных в результате ядерных испытаний. Они позволяют ученым проводить измерения исключительно малых объемов химических элементов и изотопов, присутствующих в высвобожденных радиоактивных материалах, и тем самым получать информацию о процессах их формирования.

Можно надеяться, что в предстоящие годы будет проведено больше исследований горячих частиц в местах, загрязненных в результате испытаний ядерного оружия и различных ядерных аварий, а также вблизи ядерных установок. Такой работе будет содействовать прогресс в развитии инструментальных аналитических методов. Это, далее, приведет к более глубокому пониманию роли горячих частиц в оценке радиационных опасностей и к получению информации о видах и назначении произведших их установок. □