

НАЧАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ВОЗМОЖНОСТИ ДЕТЕКТИРОВАНИЯ АЭРОЗОЛЯ UO_2F_2 , ОБРАЗОВАННОГО ПРИ УТЕЧКЕ ГЕКСАФТОРИДА УРАНА ИЗ ПРЕДПРИЯТИЙ ПО КОНВЕРСИИ УРАНА

Р. Скотт Кемп

Эта статья рассматривает возможность взятия анализов природных образцов с большой площади, чтобы обнаружить скрытые программы обогатительных центрифуг. Предполагается, что обнаружение может оказаться более осуществимым, если следить за предприятиями программы конверсии урана, которые изготавливают исходное сырье для центрифуг, а не непосредственно за центрифугами. Частицы аэрозоля UO_2F_2 , взвешенные в атмосфере, рассматриваются как положительный сигнал о наличии производства. Проведены грубые оценки источников утечки газа на небольшом предприятии, основанные на ограниченных сведениях о выделении газа, атмосферной химии и термодинамике утечек гексафторида урана. Использовано моделирование атмосферного рассеяния, чтобы оценить расстояние, на котором можно разумно ожидать обнаружение. Необходимы дальнейшие исследования до того, как делать выводы об осуществимости этого метода.

Автор статьи – сотрудник Программы по науке и всеобщей безопасности при Принстонском университете, Принстон, Нью Джерси, США.

Статья получена редакцией 27 мая 2007 года и принята к опубликованию в июне 2008 года.

Почтовый адрес для корреспонденций: R. Scott Kemp Program on Science & Global Security, 221 Nassau street, 2nd Floor, Princeton University, Princeton, NJ 08524.

Электронный адрес: rskemp@princeton.edu

ВВЕДЕНИЕ

Каскады газовых центрифуг, применяемые для обогащения урана изотопом уран-235, могут изготовить уран высокого обогащения для использования в ядерном оружии. По этой причине большинство стран согласилось позволить Международному агентству по атомной энергии (МАГАТЭ) контролировать их предприятия с центрифугами. Однако, будет очень трудно обнаружить тайные подобные предприятия, что создает лазейку в режиме инспекций. Предприятия с центрифугами не имеют отличительных характеристик или инфракрасных сигналов, по которым их можно отличить от обычных промышленных предприятий, если пользоваться аэрофотосъемкой. Далее, большинство труб на заводах с центрифугами работают под давлением ниже атмосферного и поэтому очень малы утечки рабочего газа в атмосферу. В настоящее время нет публично известного пути для обнаружения или отождествления завода с центрифугами на расстоянии, превышающем несколько километров.

Ключ к не обнаруженным секретным заводами с центрифугами может лежать не в самих предприятиях, а в обслуживающих их установках. Заводы сами по себе бесполезны без поставок газообразного гексафторида урана (UF_6). Если *меры безопасности по проверке исходных материалов* применять к предприятиям для производства UF_6 , а все поставки UF_6 известны, для нарушителя окажется затруднительным забирать даже частично UF_6 от этих проверяемых источников на скрываемый завод с центрифугами. Такие меры безопасности уже находятся в компетенции МАГАТЭ¹. Дополнение *мер безопасности по проверке производства* затруднит изготовление избыточного (не заявленного) UF_6 для скрываемых установок. В сочетании такие меры безопасности заставят нарушителя искать UF_6 на черном рынке или же изготавливать его на скрываемом предприятии. Поэтому, если бы скрываемые установки по производству UF_6 были обнаружены, это сильно подтвердило бы существование скрываемых усилий по обогащению. Эта статья обрисовывает один возможный путь обнаружения скрываемых установок для производства UF_6 (называемых также *конверсионными* установками) на основе его утечки в атмосферу.

РАЗРУШЕНИЕ UF₆ В АТМОСФЕРЕ

Обнаружение атомов урана в воздухе не является чувствительной методикой для нахождения ядерных установок, поскольку уран составляет в среднем около 1.7 ppm от вещества земной коры и поэтому естественным образом присутствует в воздухе в виде пыли. Уран естественного фона и уран, утекший с конверсионного предприятия, имеют идентичные изотопные составы. Поэтому необходимо рассматривать отличия на молекулярном уровне. Уран естественного фона обычно существует в виде оксида, в то время, как UF₆ имеет четкое антропогенное происхождение. Когда UF₆ попадает в атмосферу, он реагирует с водяным паром и образует фторид уранила (UO₂F₂) согласно реакции $UF_6 + 2H_2O = UO_2F_2 + 4HF$.

UO₂F₂ является исключительно устойчивым соединением. Он не разлагается на энергетически более выгодный U₃O₈ (или U₄O₉) при температурах ниже 200-300 °C². Кроме того, UO₂F₂ не реагирует с важными атмосферными составляющими, например, с озоном O₃, синглетом дельта-доксида O₂(¹Δ), возбужденным атомным кислородом O(¹D), H₂, HONO, H₂SO₄, HNO₃, SO₂ и NH₄³. Фторид уранила может образовывать комплексные соли на органической основе, но они нетипичны для атмосферы, а ядро UO₂F₂ обычно остается нетронутым даже в этих случаях. Все это наводит на мысль, что UO₂F₂ будет устойчив в окружающей среде, но такой вывод должен быть проверен экспериментально.

Несмотря на химическую устойчивость UO₂F₂, физические свойства подсказывают, что его жизнь в атмосфере окажется достаточно короткой, чтобы можно было пренебречь шансами на атмосферный фон. При атмосферных температурах и давлениях UO₂F₂ оказывается твердым веществом, так что он существует в виде аэрозоля. Крупные аэрозоли образуют гравитационные осадки, а большинство аэрозолей эффективно вымываются дождями. Однако мелкие и ультрамелкие аэрозоли могут оставаться на сроки 4-40 дней, где время жизни определяется частично их растворимостью в воде. Не существует экспериментальных данных о времени жизни в атмосфере мелких аэрозолей UO₂F₂, но UO₂F₂ гигроскопичен и умеренно растворяется в воде (он будет образовывать растворы с M = 2.1). В зависимости от реального времени жизни могут появиться смущающие результаты от соседних конверсионных предприятий, но глобальный фон должен стремиться к нулю. В этой статье предполагается отсутствие вызывающего смущение фона.

ИСТОЧНИКИ ФОНА

Олбрайт и Барбур⁴ оценили источники фона как для обычной утечки, так и при аварийном выбросе UF₆. Обычные утечки являются результатом регулярного ремонта, небольших течей в рабочих трубах, где на конверсионных установках UF₆ переносится под давлением, превышающим атмосферное, и испарения оставшегося на выпускных клапанах газа. Обычные утечки, как правило, малы по величине и попадают в атмосферу через вентиляцию, установленную на крыше, или большие двери в отсеках, типичные для таких установок. На хорошо спроектированной установке система управления вентиляцией поддерживает помещение при давлении, слегка меньшем атмосферного, так чтобы большая часть загрязненного воздуха проходила в первую очередь через систему воздушных фильтров.

При авариях UF₆ может утекать в гораздо более заметных количествах, чем от обычных операций. Несчастные случаи могут включать в себя падение или прорывы цилиндров, где хранятся UF₆, прорыв сварного шва или сорванные краны. Такие случаи происходили на большинстве американских установок. Вытекший при несчастных случаях UF₆ может (или не может) пройти через систему фильтрации воздуха в зависимости от того, где произошел несчастный случай, и утекшего количества. Очень крупная утечка может насытить некоторые системы фильтрации.

Источники фона были подсчитаны для "справочной установки", такого размера, чтобы произвести достаточно сырья UF₆ для завода с центрифугами, способного изготавливать ежегодно по 25 кг 90%-ного обогащенного урана, что эквивалентно одной атомной бомбе в год. Точное количество необогащенного сырья зависит от операционных параметров завода по обогащению. Если нарушитель имеет большое количество возможностей для обогащения, но ограничен доступом к необогащенному сырью, тогда могут иметь место иные оптимальные режимы. Компромисс иллюстрирован в Таблице 1.

Таблица 1: Требования к сырью при разных ограничениях.

	Отходы (% ²³⁵U)	Разделительная работа (кг·ЕРР)	Сырье (кг)
Сырье ограничено (низкие)	0.11	7000	3700
Экономичная операция (средние)	0.32	4700	5700
Обогащение ограничено (высокие)	0.60	3500	20000
Примечание: ЕРР – единица разделительной работы (SWU)			

В этой статье предполагается, что разделительная работа более дефицитна, чем урановое сырье, дающее ежегодно 12500 кг природного урана, содержащегося в UF₆, и соответствующего 0.525% урана-235, остающихся в обедненном уране. (Естественный уран содержит 0.72% урана-235).

Размер обычных утечек оценивается из опыта конверсионной установки США 60-х годов, которая теряла в атмосферу примерно 0.24 г урана на каждый килограмм урана в произведенном UF₆. Хотя такая старая установка не представляет современную технологию или стандарты сохранения окружающей природы, она может лучше представлять установку такого типа, какую может иметь нарушитель. Неясно, была ли эта ранняя американская установка снабжена системой фильтрации воздуха. Если допустить тот же уровень утечки, то из эталонной установки буде утекать 3.8 кг UF₆ в год или около 10 граммов в день.

Аварийные утечки менее предсказуемы. Единственный известный случай, из которого можно взять грубую оценку вероятности, это записи несчастного случая при заполнении цилиндра на американской действующей установке Секвойа Фюел⁵. Из примерно 11600 цилиндров, заполненных в Секвойе, только один привел к полному вытеканию содержимого из переполненного цилиндра - около 13400 кг UF₆. Было подсчитано, что около половины потока перешло в атмосферу (эта цифра основана на количестве собранного с грунта материала во время очистки). Примерно три четверти этой половины по оценкам вытекло в течение первых пяти минут, а остальное вытекало в течение последующих сорока минут.

Цилиндры того типа, какие применялись в Секвойе, нормально содержат 12000 кг UF₆ и только одного такого цилиндра хватит на год для нашей справочной установки. Если вероятность несчастного случая зависит только от количества использованных цилиндров, то крупная утечка такого типа, что была в Секвойе, происходила бы каждые 10000 лет. Аварии с выделением десятков или сотен кг UF₆ из-за поломок вентилях или трубопровода будут происходить до некоторой степени более часто. Более мелкие аварии будут происходить, как считается, раз в 600 лет. Такие цифры наводят на мысль, что обнаружение случайных прорывов не станет полезным орудием верификации.

С точки зрения количественной перспективы, впрочем, более интересны аварии. Они обычно являются результатом неидеальных процедур обращения, так что должны более часто происходить у неопытных заводских операторов. Вообще говоря, если бы аварии происходили бы в десять раз чаще, чем следует из установленной частоты, аварии все же были бы слишком маловероятны в представляющих интерес промежутках времени – не более одной каждые 60 лет. Однако, может оказаться неразумным вводить масштабы частоты аварий на выходе предприятия, особенно при множителях более тысячи. Количественное истинное заявление, что “большинство американских предприятий имели аварии с цилиндрами”, говорит о том, что авария, вероятно, произойдет раньше срока и не имеет ничего общего с размером предприятия. Эта статья приходит к выводу, что реалистичные оценки вероятности аварии нельзя получить из доступных данных, но авария все же рассматривается в качестве одного из возможных сценариев.

Другие истории аварий, хотя и лишены информации о частоте появлений, полезны для оценки размеров и условий случайных выбросов. Например, разрыв сварного шва на опытном предприятии в Манхеттене привел к выбросу 123 кг урана (как следует из оценок), сохранившегося в UF₆, в течение 17 секунд. Поток жидкого UF₆ на заводе в Комурэ (Франция), как сообщалось, унес около 330 кг урана в атмосферу за период 10-15 минут.

Если суммировать, авторы рассматривают обычные операции как единственно надежный источник стока UF_6 . Для нашего эталонного предприятия это происходит со скоростью 3.8 кг UF_6 в год. Предполагается, что природа утечки (как описано далее) такова, что она происходит безотносительно к рабочим часам предприятия, приводя к постоянному источнику фона интенсивностью 120 $\mu\text{г/с}$. Авторы также смоделировали случайный не фильтрованный выброс 200 кг жидкого UF_6 в течение 10 минут.

ДИНАМИКА ВЫБРОСА UF_6 И ОБРАЗОВАНИЯ АЭРОЗОЛЯ

Часть выброса, зависшая в атмосфере, и размер частиц аэрозоля зависят от сценария выброса. Твердые остатки UF_6 и UO_2F_2 на поверхности вентиляей могут медленно сублимировать в газовую форму и выглядеть как непрерывная обычная утечка. Эти пары будут иметь размеры частиц в одну или несколько молекул и поэтому авторы рассматривают их в газовом приближении.

Выделившийся в газовом виде UF_6 (это может произойти из-за течи в рабочем трубопроводе) оказывается перегретым паром и не образует немедленно никаких твердых форм. Когда пар охладится, он превращается в аэрозоль⁷. Как общее правило, аэрозоли, образованные из газа, образуют частицы диаметром от 10^{-2} до 10^{-3} мкм. Эти сверхмелкие аэрозоли затем коагулируют в размеры 0.1-1 мкм в зависимости от частоты столкновений между частицами, что, в свою очередь, зависит от локальной концентрации стока. При изучении газа UF_6 , вытекающего во влажный воздух, обнаружено, что в клубах пара образуются частицы аэрозоля размером 0.05-0.08 мкм, а при "низкой концентрации" дальнейшая коагуляция была пренебрежимо малой⁸. Воздушные фильтры, анализировавшие после аварий на Секвойе, как сообщалось, содержали частицы UO_2F_2 с размерами в диапазоне 0.4-2.5 мкм и пиком между 1.27 и 1.59 мкм.⁹ Эксперимент Пикерелла¹⁰ по изучению образования UO_2F_2 обнаружил сфероиды размером 0.3-0.6 мкм, которые со временем принимали размер 1-2 мкм. В другом эксперименте, проведенном на заводе газовой диффузии в Портсмуте, обнаружены частицы с размером в диапазоне 1.1-1.4 мкм.¹¹

Предполагается, что небольшие утечки газа с минимальной коагуляцией соответствуют обычным утечкам, а образующиеся частицы находятся в экспериментально определяемом диапазоне размеров для малых концентраций (0.05-0.08 мкм) с верхним пределом, соответствующими частицам раннего образования и найденным Пикереллом (0.3-0.6 мкм). Для аварийных утечек предполагалось, что частицы должны находиться в пиковом диапазоне, обнаруженном в воздушных фильтрах после аварии на заводе Секвойа (1.27-1.59 мкм). Выброшенный в жидком виде UF_6 (как могло случиться во время аварии с цилиндром, аналогичной тем, отчеты по которым существуют для заводов Секвойа, Комуре и Манхетен) образует вспышку из твердых частиц и паров после декомпрессии к атмосферному давлению.

Массы твердой и газовой фракций UF_6 могут быть ограничены термодинамически.¹³ Если расширение предполагается обратимым (то есть, изоэнтропным), оценивается нижняя граница паровой фракции, поскольку образование пара является процессом, повышающим энтропию. Если расширение считать адиабатическим, оценивается верхняя граница паровой фракции, так как никакая энергия не теряется в окружающую среду. Методы определения максимальной энтропии и энтальпии при выбросах UF_6 описаны Уильямсом.¹⁴ Доли массы ограничены, как показано на Рис.1.

Обратите внимание, что верхняя и нижняя границы близко совпадают и что примерно 50% будет выброшено в виде газа. Если допустить, что отвердевшая фракция быстро упадет на грунт и ничего не останется в воздухе, то термодинамические оценки согласуются с докладами об аварии на заводе Секвойа, где половина выброса была собрана с грунта. Паровая фракция в конечном счете сконденсируется в аэрозоль таким же образом, как было рассказано для газового выброса.

ПЕРЕНОС

Перенос в атмосфере был смоделирован с применением программы HYSPLIT 4.7¹⁵ и годовых записей в течение трех часов, представленных Национальным центром прогнозов НОАА (Национальная администрация по океанам и атмосфере). Концентрации на уровне грунта интегрировались каждые 12 часов и изолинии строились для каждого интеграционно-

го периода. Выбранные для репродукции кривые точны примерно на 70%: около 70% были менее подходящие, а 30% - более подходящие с точки зрения продолжения изолинии.

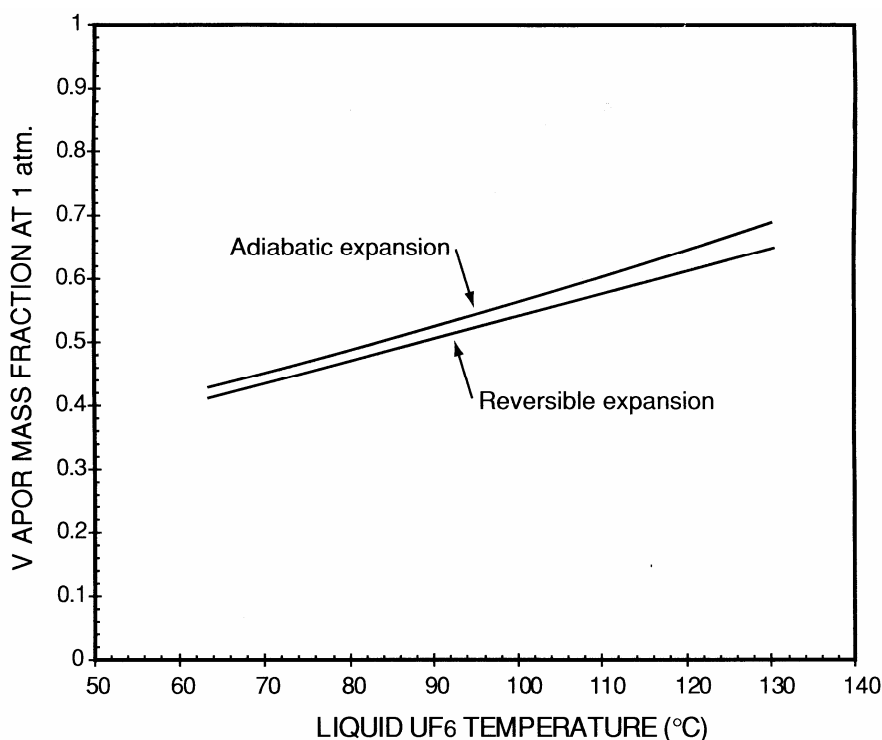


Рис.1: Доля массы пара, полученного при утечке жидкого UF₆ до давления 1 атм. По оси X отложена температура жидкого UF₆, по оси Y – доля массы пара при давлении 1 атм. Верхняя надпись – адиабатическое расширение, нижняя надпись – обратимое расширение.

С учетом общности этой модели авторы интересовались только оценками по порядку величины атмосферной концентрации UO₂F₂, а также общими формами и размерами пятен на плоской равнине. Облако было выпущено с муниципального аэропорта Эйбилин в центральном Техасе (северная широта – 32.413°, восточная долгота – 99.679°) в первые дни января 2003 года. В этот период не отмечались большие погодные события за исключением одного случая сильных ветров.

Отложение слоев не важно для сверхмелких аэрозолей при обычных утечках. Скорость их отложения, как следует из уравнения Стокса-Куннингема, исключительно мала (≈ 0.0002 см/с). Для более крупных аэрозолей от аварийного выброса скорость осаждения все еще меньше 0.05 см/с. Скорее, осаждение главным образом связано с воздействием и диффузией на поверхность, что сильно зависит от топографии местности и мутности переноса. Характерная скорость осаждения 0.1 см/с была выбрана на основе скоростей осаждения, использованных для других мелких инертных аэрозолей. Модель вычислялась с использованием скорости осаждения 1 см/с в качестве проверки чувствительности.

Обычные утечки содержали непрерывное выделение 0.378 г/час UO₂F₂ (эквивалент 0.432 г/час UF₆). На Рис.2 показана усредненная за 24 часа концентрация на 18 января – через 16 дней после начала непрерывной утечки. Единственное крупное погодное событие между началом утечки и представленными результатами было связано с четырехчасовым периодом сильных ветров (40-55 км/час) вечером 15 января. Изолинии, отстоящие на 200-400 км от места утечки, типично имели концентрации 10^{-7} - 10^{-9} мкг/м³, уменьшая их до диапазона 10^{-8} - 10^{-9} , когда скорость оседания возрастала до 1 см/с. Изолинии в диапазоне 500-1000 км типично имели концентрацию 10^{-9} мкг/м³ или меньше, переходя в диапазон 10^{-9} - 10^{-10} при увеличении скорости осаждения.

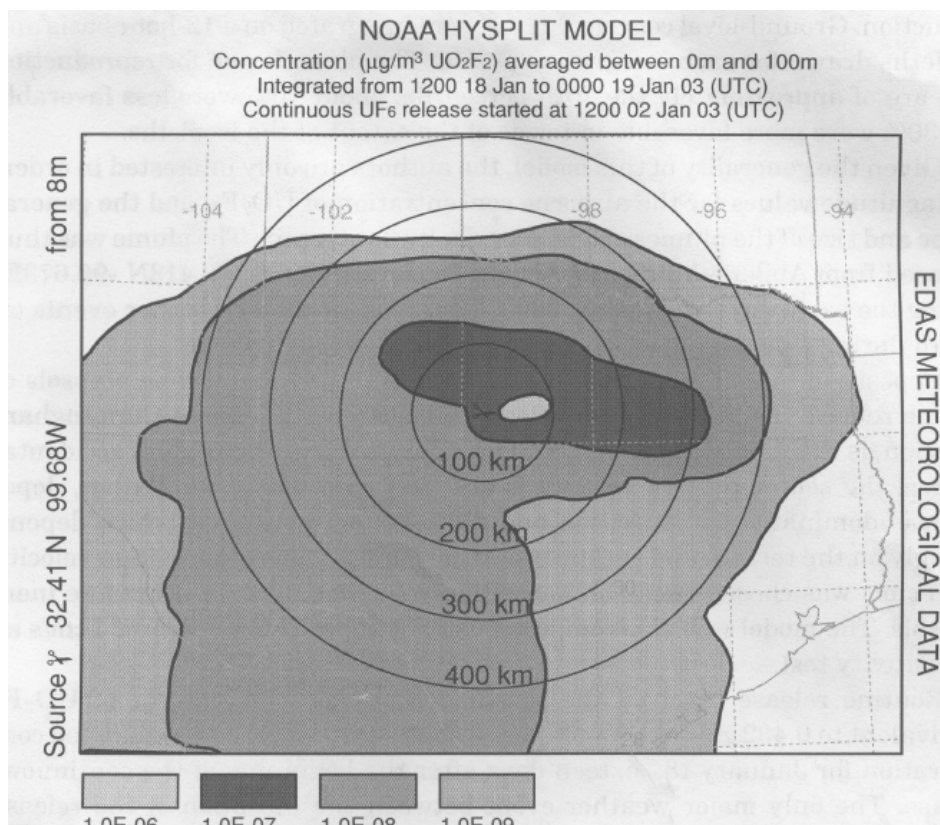


Рис. 2: Изолинии концентраций UO_2F_2 ($\text{мкг}/\text{м}^3$) при обычной утечке. Слева указаны координаты места моделированной утечки. Справа надпись: Метеорологические данные EDAS. Сверху: Модель NOAA HYSPLIT. Концентрации ($\text{мкг}/\text{м}^3$ UO_2F_2), усредненные по высоте в диапазоне 0-100 м. Интегрировано от 12-00 18 января до 00-00 19 января 2003 года (время местное). Утечка началась в 12-00 2 января 2003 года.

ДЕТЕКТИРОВАНИЕ

Было предположено, что возникает недоразумение от естественного фона UO_2F_2 или от находящихся поблизости конверсионных предприятий. Это исключает статистические расчеты, обычно требуемые для заявлений относительно положительного обнаружения. В этом случае минимальная обнаруживаемая концентрация устанавливается эффективностью сбора образцов и чувствительностью метода проб.

МАГАТЭ рассматривало сбор аэрозолей с использованием автоматической принудительной фильтрации воздуха.¹⁶ Более крупные аэрозоли от выброса аварийного типа (1.1 - 1.4 мкм), будут садиться на фильтр в результате столкновений, а более мелкие аэрозоли от постоянной утечки (0.05 – 0.6 мкм) будут собираться в результате броуновской диффузии частиц на материал фильтра. Характеристики фильтра обычно понижаются в диапазоне 0.1 – 0.4 мкм, где работают оба механизма, но ни один не играет решающей роли.¹⁷ Тем не менее существуют установленные методы для фильтрации всего спектра размеров аэрозолей. Стандартные фильтры частиц высокой эффективности должны удалять 99.97% частиц с размером 0.3 мкм, а этот размер, по-видимому, является наиболее трудным для захвата.¹⁸ Итак, непохоже, чтобы характеристики фильтров понизили минимально обнаруживаемую концентрацию на порядок величины.

Если предположить, что система сбора образцов собирает все взвешенные частицы, то имеющая отношение к делу концентрация – это не приведенные выше значения для воздуха, а доля массы UO_2F_2 во всех собранных аэрозолях. Типичная нагрузка воздуха аэрозолями составляет $100 \text{ мкг}/\text{м}^3$ в больших городах и $4 \text{ мкг}/\text{м}^3$ в не засушливой сельской местности. В пустынях содержание аэрозолей может превышать $1000 \text{ мкг}/\text{м}^3$.¹⁹ Для городских концентраций твердых примесей в воздухе величина $10^{-7} \text{ мкг}/\text{м}^3$ соответствует одной миллиардной доли (1 ppb) всех твердых веществ в воздухе, что для обычных утечек достигается на расстояниях около 300-300 км. Чувствительность 0.1 ppb потребуется на расстояниях более 400

км.

Многие аналитические методы, используемые при сборе атмосферных примесей, могут достичь чувствительности от 1 до 0.1 ppb, а иногда и лучше. Однако было невозможным идентифицировать хотя бы один метод, который определенно работал бы для UO_2F_2 в сильно разбавленных и весьма неоднородных образцах. Одним из возможных методов могла бы оказаться флюоресценция. Светящиеся комплексы уранила в кислотнo-водных растворах находятся среди наиболее ярких из известных образцов уранила.²⁰ UO_2F_2 возбуждается светом с длиной волны в диапазоне 330-472 нм и излучает при 521 нм. Другой методикой обнаружения может оказаться ионизация при лазерной десорбции, которая может мягко ионизовать частицы, не разбивая молекулярных связей, что делает возможной молекулярную масс-спектроскопию.

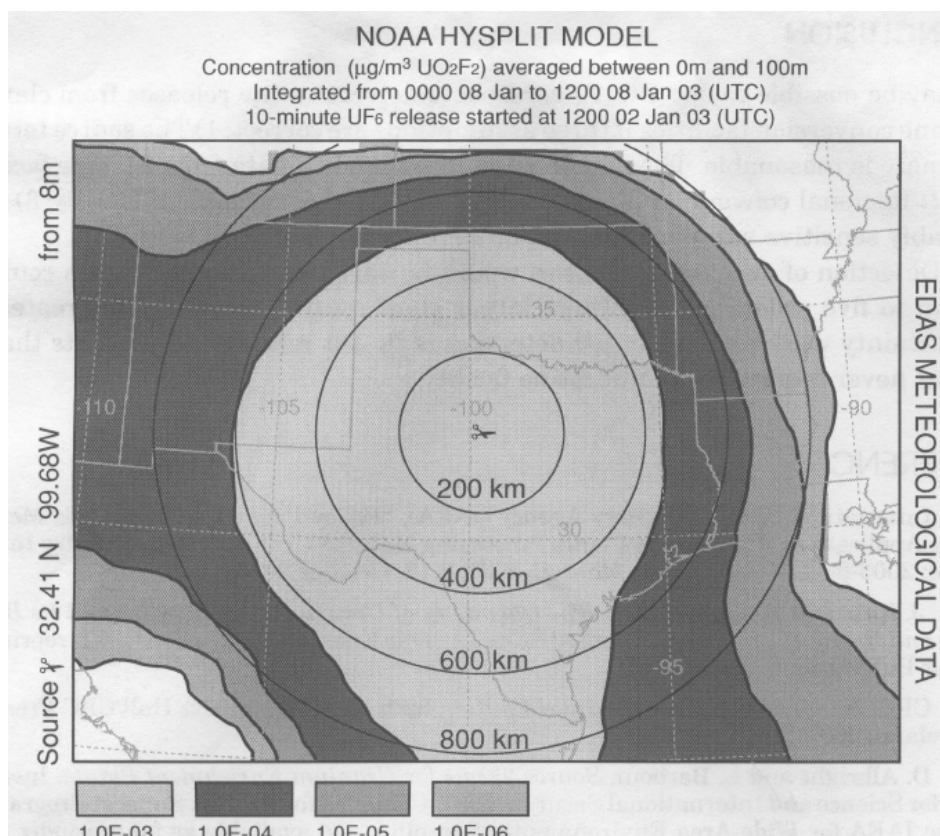


Рис. 3: Изолинии концентраций UO_2F_2 ($\text{мкг}/\text{м}^3$) при аварийном выбросе. Слева и справа те же надписи, что на Рис. 2. Снизу изменены две последние строки: Интегрировано от 00-00 8 января до 12-00 8 января 2003 года. Десятиминутный выброс UF_6 начался в 12-00 2 января 2003 года.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Может оказаться возможным использовать аэрозоли UO_2F_2 для обнаружения обычных утечек от скрывааемых конверсионных установок, если справедливы три допущения: 1) Оценки источника разумны. Используемые нами данные основаны на информации только об одной установки. 2) Местные конверсионные предприятия не создают фона UO_2F_2 . 3) Может быть разработан удобный и чувствительный метод количественного анализа.

Обнаружение аварийных выбросов оказалось бы более простым, поскольку источник мог бы на пять порядков величины оказаться сильнее, чем при обычной утечке. Наибольшая неопределенность с обнаружением аварийного случая заключается в том, что оно основано на редких событиях, которые могут никогда не произойти на скрывааемой установке.

ПРИМЕЧАНИЯ И ССЫЛКИ

1. Международное агентство по атомной энергии (МАГАТЭ), "Policy Paper 18: Safeguards Measures Applicable in Conversion Plants Processing Natural Uranium. Date of Entry Into Force: 2003-06-17." *Safeguards Manual*, SMR 2.18, October 2003.
2. J. Katz and E. Rabinowitch, *The Chemistry of Uranium: The Element and Its Binary and Related Compounds*, (United States Atomic Energy Commission, 1951: reprint Dover Publication, 1961); 570.
3. CRC, *Handbook of Chemistry and Physics*, 82th ed. (Chapman & Hall/CRC Press, Cleveland, 2001).
4. D. Albright and L. Barbour, *Source Terms for Uranium Enrichment Plants*, Institute for Science and International Security, 1997. Compiled for the U.S. Support Program to the IAEA for Wide-Area and available as an appendix to IAEA report STR-321.
5. U.S. Nuclear Regulatory Commission (NUREC), *Assessment of the Public Health Impact from the Accidental Release of UF₆ at the Sequoyah Fuels Corporation Facility at Gore, Oklahoma*. NUREC-1189, 1986.
6. S. K. Nair, C. B. Chambers, R. Zivorad, and S. Park, Transport, Chemistry, and Thermodynamics of Uranium Hexafluoride in the Atmosphere – Evaluation of Models Using Field Data, *Atmospheric Environment* 32(10) (1998):1729-1741.
7. W. R. Williams, *Computer Programs for Developing Source Terms for a UF₆ Dispersion Model to Simulate Postulated UF₆ Releases from Buildings*, Martin Marietta Energy Systems Inc. for Oak Ridge Gaseous Diffusion Plant. K/D-5696, 1986:13-14.
8. I. Zherin, S. T. Penin, K. Chistyakova and V. I. Kokhanov, "Experimental Study of the Aerosol Formation by Hydrolysis of UF₆ in Gaseous Phase under Atmospheric Conditions." *J. Aerosol Sci.* 27 (suppl. 1)(1996): 8405-8406.
9. Смотрите ссылку [5].
10. P. W. Pickerell, *Characterization of the Solid, Airborne Materials Created by the Interaction of UF₆ with Atmospheric Moisture in a Constant Volume*. Nuclear Division, Union Carbide Corp. K/PS-144, 1982 (In Kim et al. 1996).
11. S. H. Kim, N. C. J. Chen, R. P. Taleyarkhan, M.W. Wendel, R. D. Keith, R. W. Schmidt, J. C. Carter, and R. H. Dyer, *Source Term Evaluation for Postulated UF₆ Release Accidents in Gaseous Diffusion Plants – Summer Ventilation Mode (Non-Seismic Gases)*, Oak Ridge National Laboratory. ORNL/TM-13251, 1996.
12. Смотрите ссылку [10].
13. Смотрите ссылку [7].
14. Смотрите ссылку [7].
15. R. R. Draxler and G. D. Hess, *Description of the HYPSPPLIT A Modeling System*. Air Resources Laboratory, NOAA, ERL ARL-224, 2004.
16. T. Valmari, V. Tarvainen, J. Lehitnen, R. Rosenberg, T. Honkamaa, A. Ossintsev, M. Lehtimäki, A. Taipale, S. Ilatalo, and R. Zilliacus, *Aerosol Sampling Methods for Wide Area Environmental Sampling (WAES)*, 2002. Finnish Support program to the IAEA. Finnish Radiation and Nuclear Safety Authority, Helsinki, STUK-YTO-TR 183.
17. K. W. Lee and M. Ramamurthi, Filter Collection. *Aerosol Measurement: Principles, Techniques, and Applications*, K. Willeke and P. Baron, Eds. (Van Nostrand Reinhold, 1993).
18. U.S. Department of Energy (DOE), *Specification for HEPA Filters used by DOE Contractors*. DOE Standard. DOE-STD-3020-97, 1997.
19. Смотрите ссылку [16], а также A. H. Knap, ed., *NATO Advanced Research Workshop on the Long-Range Atmospheric Transport of Natural and Contaminant Substances from Continent to Ocean and Continent to Continent* (Kluwer, Boston, 1988): 59-82.
20. J. V. Beitz and C. V. Williams, "Uranium Fluoride Luminescence in Acidic Aqueous Solutions," *Journal of Alloys and Compounds* 250 (1997):375-379; J. V. Beitz and C. V. Williams, "Detection of Leaking Actinide Hexafluoride Storage Cylinders." *AIP Conf. Proc.* 532 (2000):329. See also Q. Wang and R. M. Pitzer, "Structure and Spectra of UO₂F₂ and Its Hydrated Species." *J. Phys. Chem. A* 205 (2001):8370-8375.