

ВЗРЫВЫ РЕЗЕРВУАРОВ С ЯДЕРНЫМИ ВЫСОКОАКТИВНЫМИ ОТХОДАМИ: ПОТЕНЦИАЛЬНЫЕ ПРИЧИНЫ И ВОЗДЕЙСТВИЯ ГИПОТЕТИЧЕСКОЙ АВАРИИ НА ПЕРЕРАБАТЫВАЮЩЕМ ЗАВОДЕ В КАЛПАККАМЕ

М.В. Рамана, А.Х. Найяр и Майкл Шеппнер

АННОТАЦИЯ

Резервуары с жидкими высокоактивными отходами от переработки отработавшего топлива содержат большое количество сильно радиоактивных материалов. Эти резервуары потенциально могут быть повреждены разнообразными химическими взрывами, что приведет к разбрасыванию значительной части их радиоактивного содержания. В этой статье описываются различные возможные химические взрывы и исследуется, как такие взрывы могли бы произойти на перерабатывающем заводе в Калпаккаме, Индия, на котором, вероятно, хранится большой объем жидких высокоактивных отходов, поскольку витрификация таких отходов не начнется менее, чем через 15 лет после начала работы завода в 1998 году. Распространение гипотетического радиоактивного выброса моделировалось с помощью гибридной одночастичной лагранжевой интегрированной модели траектории (HYSPLIT), разработанной в Лаборатории исследования воздуха Национального управления по изучению и освоению океана и атмосферы США. Результаты позволяют предположить, что модельный сценарий аварии приводит примерно к 97 000 раковых заболеваний, примерно 47 000 из которых закончатся смертельным исходом. Возможны и более крупные радиоактивные выбросы, которые приведут к пропорционально большему количеству раковых заболеваний и связанных с ними смертельных исходов.

М.В. Рамана, А.Х. Найяр и Майкл Шеппнер работают в Программе по науке и всеобщей безопасности, Принстонский университет, Принстон, штат Нью Джерси, США

Почтовый адрес для корреспонденции: M.V. Ramana, Program on Science and Global Security, Princeton University, 221 Nassau Street, Princeton, NJ 08542, USA.

Адрес электронной почты: ramana@princeton.edu

Статья получена 17 июля 2015 года и принята к публикации 18 июля 2016 года.

ВВЕДЕНИЕ

В операциях по переработке могут происходить различные типы аварий (смотрите таблицу 1)¹. По имеющимся сообщениям, историческая частота аварий на перерабатывающих заводах больше, чем частота аварий на ядерных реакторах². Во всем мире на 10 перерабатывающих заводах произошло по крайней мере 16 серьезных аварий³, в том числе 2 аварии из-за непредусмотренной критичности, 3 пожара, 8 химических взрывов и 2 аварии с потерей охладителя⁴. Среди рисков аварий, возможных на перерабатывающих заводах и связанных с ними установках, особыми потенциальными последствиями для общественного здравоохранения и окружающей среды будут обладать взрывы в резервуарах с жидкими высокоактивными отходами, в том числе взрывы, возникающие в результате высушивания резервуара⁵. В таких резервуарах содержатся высококонцентрированные радиоактивные продукты деления из отработавшего топлива. Поэтому взрыв резервуара может привести к рассеиванию большого количества радиоактивности в атмосфере.

Потенциальное количество выброшенных радионуклидов сравнимо с последствиями аварий 1986 года в Чернобыле и 2011 года в Фукусиме Дай-ичи. В обоих случаях первичный долгосрочный вредный эф-

фект вызывается загрязнением цезием-137. Радиоактивный изотоп цезий-137 испускает проникающее гамма-излучение при распаде с периодом полураспада в 30 лет⁶. Авария в Чернобыле привела к выбросу в атмосферу примерно 85 ПБк (1 ПБк = 10¹⁵ Бк) цезия-137⁷. Оценки выброса от последовательности аварий на атомной электростанции в Фукусиме Дай-ичи различаются в диапазоне от 10 ПБк⁸ до 18–19 ПБк⁹ и до 35,8 (23,3–50,1) ПБк¹⁰. Для сравнения, одиночный резервуар с радиоактивными отходами может содержать сотни ПБк цезия-137. Поэтому рассеивание даже небольшой части этих запасов может привести к серьезным последствиям.

Таблица 1. Типы, выбросы, местоположения и годы аварий на перерабатывающих заводах и связанных с ними ядерных установках.

Тип аварии	Выбросы жидкости	Выбросы газа	Место и время
Критичность в аппарате растворения	X	X	Уиндскейл, 1973
Пожар		X	Ла Хаг, 1981
			Карлсруэ, 1985
			Токаи, 1997
Взрыв		X	Саванна Ривер, 1953
			Кыштым, 1957
			ОукРидж, 1959
			Ла Хаг, 1970
			Саванна Ривер, 1975
			Томск-7, 1993
			Токаи, 1997
			Хэнфорд, 1997
Утечка в сливной трубе; повреждение резервуара	X		Ла Хаг, 1979-80
			Селлафилд, 1983
Потеря охладителя		X	Саванна Ривер, 1965
			Ла Хаг, 1980
Источник: Адаптировано из "Background, Status, and Issues Related to the Regulation of Advanced Spent Nuclear Fuel Recycle Facilities," Advisory Committee on Nuclear Waste and Materials White Paper (Rockville, MD: Nuclear Regulatory Commission, June 2008), p. 35.			

Особые опасения связаны с перерабатывающим заводом в Калпаккаме, Индия (в дальнейшем именуется как завод KARP), потому что связанный с ним завод по витрификации произведенных на заводе KARP высокоактивных отходов начал работу только через 15 лет после того, как завод KARP начал перерабатывать отработавшее топливо¹¹. Из этого следует, что в резервуарах хранения должно было накопиться существенное количество высокоактивных отходов¹².

В данной статье мы обращаем особое внимание на гипотетическую аварию на резервуаре с высокотоксичными отходами на заводе KARP. После краткого обзора переработки и обработки отходов мы рассмотрим три типа химических взрывов, которые происходили на перерабатывающих и связанных с ними предприятиях во всем мире, и условия, необходимые для возникновения таких взрывов. Затем мы обсудим некоторые из специфических особенностей резервуаров с высокоактивными отходами на заводе KARP, вместе с некоторыми причинами для опасений. И, наконец, мы обсудим результаты моделирования распространения в атмосфере радиоактивного выброса из резервуара высокоактивных отходов в Калпаккаме, включая расчет потенциальной радиационной дозы на подвергающуюся воздействию популяцию.

ОБЗОР ПЕРЕРАБОТКИ

Отработавшим топливом называют топливо, облученное в ядерных реакторах; оно состоит в основном из урана, который не подвергался делению, плутония, других трансурановых элементов, таких, как нептуний, и продуктов деления. Отработавшее топливо выделяет большое количество тепла и поэтому оно сначала охлаждается в бассейнах, заполненных водой. Имеется два основных варианта утилизации отработавшего топлива после охлаждения: непосредственное захоронение и переработка. В случае непосредственного захоронения отработавшее топливо хранится в промежуточном хранилище или в самом бассейне с целью окончательного захоронения в геологическом могильнике, если и когда такие сооружения станут доступными. Основной темой данной статьи будут переработка и перерабатывающие предпри-

ЯТИЯ.

ПРОЦЕСС ПЬЮРЕКС

Переработка может быть произведена посредством разнообразных химических процессов. Обычно используется процесс регенерации урана и плутония посредством экстракции (ПЬЮРЕКС – PUREX – Plutonium Uranium Redox EXtraction process), который первоначально был разработан для выделения плутония из отработавшего топлива для применения в ядерном оружии. Отработавшее топливо перерабатывается партиями (а не непрерывно); переработку каждой партии отработавшего топлива называют кампанией. Первая стадия процесса ПЬЮРЕКС представляет собой удаление оболочки, или покрытия отработавших топливных стержней (смотрите рисунок 1). Обычно стержни разрезаются на небольшие куски (около 5 см длиной), которые помещаются в горячий (около 100 °С) раствор азотной кислоты¹³. Азотная кислота растворяет содержимое топливных стержней, которое поступает в раствор в виде нитратов. Большая часть оболочки не растворяется и утилизируется по отдельности. При разрезании и растворении выделяются радиоактивные газы.

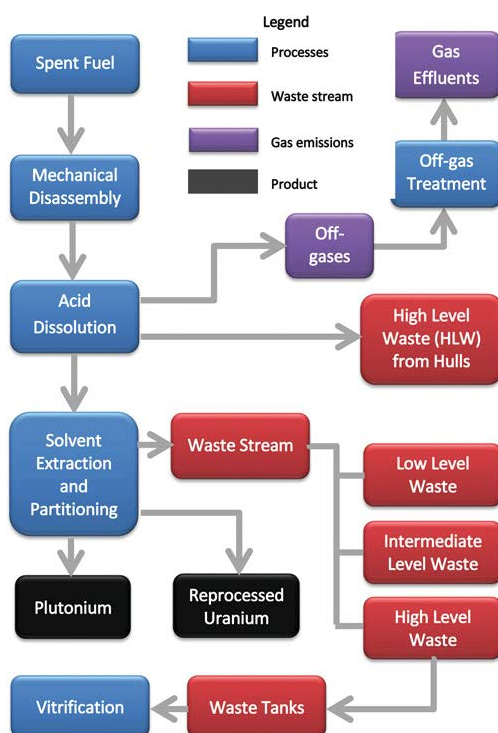


Рисунок 1. Схема переработки отработавшего топлива и обработки радиоактивных отходов. Синим цветом обозначаются процессы, красным – потоки отходов, лиловым – выбросы газов, а черным – продукция. Надписи на позициях (сверху вниз и слева направо): 1 – отработавшее топливо; 2 – механическая разделка; 3 – растворение в кислоте; 4 – экстракция растворителем и разделение; 5 – плутоний; 6 – витрификация; 7 – выделяемые газы; 8 – поток отходов; 9 – переработанный уран; 10 – резервуары с отходами; 11 – газовые отходы; 12 – обработка выделяемых газов; 13 – высокоактивные отходы от оболочек; 14 – отходы низкой активности; 15 – отходы промежуточной активности; 16 – высокоактивные отходы.

В процессе ПЬЮРЕКС плутоний и уран отделяются от раствора в азотной кислоте (называемого также водным раствором) на основании их относительной растворимости в двух несмешивающихся жидкостях, водном кислотном растворе и органическом растворе. В процессе ПЬЮРЕКС в качестве органического растворителя используется разбавленный керосином трибутилфосфат (ТБФ)¹⁴. Когда смешиваются водный и органический растворы, то присутствующие в водном растворе плутоний и уран переносятся в органическую фазу, а продукты деления и другие элементы остаются в водной фазе. Когда смеси дадут отстояться, две фазы разделятся, отделяя уран и плутоний от продуктов деления. Этот процесс смешивания и разделения повторяется несколько раз для выделения большей части урана и плутония от кислотно-

го раствора.

Уран и плутоний могут быть отделены друг от друга с использованием того же самого принципа дифференциальной растворимости и после этого преобразованы в оксиды для удобства хранения и транспортировки.

ВЫСОКОАКТИВНЫЕ ОТХОДЫ

Кроме плутония и урана, при переработке образуются потоки жидких отходов. В Индии потоки жидких отходов классифицируются как отходы низкой активности, отходы промежуточной активности и высокоактивные отходы в зависимости от уровня радиоактивности, или концентрации. Самой большую по объему компоненты представляют отходы низкой активности, на которые приходится 80% объема потока отходов, но всего лишь 0,1% от общей радиоактивности отработавшего топлива¹⁵. С другой стороны, высокоактивные отходы составляют менее 2% от объема, но они содержат почти 99% общей радиоактивности отработавшего топлива.

Состав высокоактивных отходов зависит от нескольких факторов, включая тип топлива, степень его выгорания, и химию переработки¹⁶. Они содержат как долгоживущие, так и короткоживущие радиоизотопы, включая невыделенные плутоний и уран, химикаты переработки, такие, как азотную кислоту и нитрат натрия, растворенные материалы оболочек, такие, как цирконий, и продукты коррозии резервуаров для хранения и трубопроводов. В высокоактивных отходах можно обнаружить некоторую часть растворенного трибутилфосфата ТВР. Высокоактивные отходы кислотные, типичная молярная концентрация азотной кислоты равна 1-3 моль/литр (или 63-189 граммов HNO_3 на кубический дециметр)¹⁷.

Высокоактивные отходы концентрированы и их объем уменьшается из-за испарения. Величина уменьшения объема зависит от степени выгорания и длительности охлаждения до переработки. В зависимости от «длительности периода охлаждения, либо тепловыделение образующихся высокоактивных отходов, либо содержание в них растворенных твердых составляющих, включая продукты деления и химикаты процесса, будут факторами, ограничивающими степень концентрации»¹⁸. Концентрация высокоактивных отходов также будет возрастать в процессе хранения в резервуарах из-за продолжающегося испарения. Окончательный объем высокоактивных отходов после концентрации будет находиться в диапазоне от менее 0,1 м³ до более 1 м³ на каждую тонну переработанного тяжелого металла¹⁹.

Из-за того, что высокоактивные отходы постоянно генерируют тепло, резервуары для их хранения приходится непрерывно охлаждать. Для того, чтобы уменьшать опасность, связанную с возможностью неисправности системы охлаждения, высокоактивные отходы витрифицируют, преобразовывая их в твердую фазу²⁰. Процесс витрификации высокоактивных отходов состоит из их концентрации в испарителях для сокращения их объема и последующего смешивания при высоких температурах с такими добавками, как SiO_2 , V_2O_5 , Al_2O_3 , P_2O_5 , Na_2O , и CaO ²¹. После охлаждения и отвердевания смесь образует стекло, или твердое тело, близкое к стеклообразному. Однако, витрификация – это сложная технология, очень чувствительная к химической природе отверждаемой радиоактивной смеси²². В данной статье мы обращаем особое внимание на потенциальные аварии в резервуарах для хранения жидких высокоактивных отходов, и не рассматриваем опасности, связанные с процессом витрификации, или с остеклованными отходами.

АВАРИИ

Из-за сложной природы перерабатывающих заводов, есть много типов аварий, которые могут привести к выбросу радиоактивности. Такие аварии могут быть вызваны неисправностями аппаратуры, человеческими ошибками, внешними природными явлениями и недоброжелательными действиями. Выброс радиоактивности может быть обусловлен действием одного, или более, механизмов, включая утечку и распространение в атмосфере. Аналитики подчеркивают потенциал лавинообразного развития аварий, когда первоначальные события могут создать «сильные радиационные поля, или другие явления, которые препятствуют исправляющим действиям», что делает более вероятным дальнейшее развитие аварии²³.

Были проведены вероятностные оценки безопасности (PSA) и вероятностные оценки риска (PRA) для многих перерабатывающих предприятий по всему миру²⁴. Однако, эти оценки большей частью не были всесторонними²⁵. Более того, есть причины ожидать, что вероятностные оценки риска (PRA) недооценивают риск аварий, поскольку они неизбежно пропускают некоторые причины аварий²⁶; они неспособны также всесторонне рассмотреть все возможные человеческие ошибки и недоброжелательные действия.

На резервуарах для высокоактивных отходов обычно предусмотрены несколько уровней безопасно-

сти, включая змеевики охлаждения для отвода тепла при распаде, методы удаления водорода²⁷, и оборудование для перемешивания жидкости для уменьшения накопления ила на дне резервуара²⁸. На заводе KARP резервуары для высокоактивных отходов размещаются в подземных камерах с толстыми стенами и перекрытиями²⁹.

Несмотря на эти мероприятия, аварии происходили на нескольких перерабатывающих заводах и связанных с ними установках. Из-за большого количества радиоактивных материалов, присутствующих на перерабатывающих заводах и резервуарах для высокоактивных отходов, при отказе механизмов безопасности последствия могут быть исключительно серьезными. Цель данной статьи состоит в том, чтобы проанализировать и исследовать последствия химических взрывов, которые приводят к выбросу радиоактивного материала, а не определять вероятность такой аварии.

ХИМИЧЕСКИЕ ВЗРЫВЫ

Взрыв – это быстрое высвобождение большого количества энергии. На перерабатывающих заводах и связанных с ними установках взрыв может привести, прямо или косвенно, к распространению радиоактивного материала как на территории предприятия, так и вне ее, из-за нарушения герметичности³⁰. Взрывы могут возникать из-за накопления горючих веществ, или выхода экзотермических химических реакций из под контроля. Обычными причинами химических взрывов являются водород, различные соли, и органические материалы³¹.

На перерабатывающих заводах и связанных с ними предприятиях по всему миру происходило много взрывов. Ниже мы представим примеры для каждого типа химических взрывов и то, что мы знаем о каждом типе. Вероятность и последствия каждого типа взрывов зависят, среди прочего, от характеристик раствора высокоактивных отходов.

ВЗРЫВЫ СОЛИ

Самым известным примером взрыва соли стал взрыв на предприятии «Маяк» в Советском Союзе в сентябре 1957 года. Оценки мощности взрыва в этой аварии лежат в интервале от 25-29 тонн тротилового эквивалента³² до 70-100 тонн тротилового эквивалента³³. Задним числом авария получила шестой (предпоследний) уровень по Международной шкале ядерных событий (INES). В атмосферу было выброшено около 70-80 тонн высокоактивных отходов с общим содержанием радиоактивности в 740 ПБк³⁴. Согласно последующим оценкам, около 90% выброшенной радиоактивности выпало на расстоянии до 5 км от площадки³⁵.

Было выброшено около 4 ПБк стронция-90 и иттрия-90 и около 18 ПБк циркония-95 и ниобия-95³⁶. Определенный заранее предел плотности заражения стронцием-90 в 74 кБк/м² привел к эвакуации двадцати двух деревень с общим населением около 10 тысяч человек³⁷. Площадь радиоактивного загрязнения с порогом 3,7 кБк/м², или выше, составила около 20 000 км².³⁸

Взрыв произошел в резервуаре из нержавеющей стали для хранения радиоактивных отходов, полученных при выделении плутония. Внешний диаметр резервуара равнялся 8 м, авысота – 6 м³⁹. Он был помещен в каньон из железобетона и был покрыт цилиндрической железобетонной пластиной толщиной около 0,8 м и слоем земли толщиной 1-1,5 м. Мощность взрыва была достаточно большой, чтобы прорвать эти барьеры.

В резервуаре находились жидкие радиоактивные отходы, от которых требовалось отводить теплоту распада мощностью 79 кВт (тепл.), и соли (в основном нитрат и ацетат натрия). Когда система охлаждения вышла из строя, температура в резервуаре поднялась до 350 °С, вода испарилась и произошел тепловой взрыв сухого солевого остатка, который разрушил толстые защитные структуры⁴⁰.

ВЗРЫВЫ КРАСНОГО МАСЛА

Взрывы красного масла давно рассматривались как потенциальная опасность на перерабатывающих заводах⁴¹. Красное масло «определяется как субстанция переменного состава, образующаяся при реакции органических составляющих с азотной кислотой»⁴². К упоминаемым здесь органическим материалам относятся трибутилфосфатТВР и различные органические соединения, такие, как дибутилфосфат и монобутилфосфат, образующиеся при воздействии радиации на ТВР.

Основное опасение в связи с красным маслом – это его быстрое разложение, которое является высо-

коэнергетической экзотермической реакцией, и «связанное с ним избыточное давление через самоподдерживающуюся неконтролируемую реакцию, известную как выброс красного масла (Red Oil Excursion – ROE)»⁴³. Скорость реакции разложения, k , обычно описывается соотношением типа Аррениуса:

$$k = A \exp\left(-\frac{E}{RT}\right)$$

где E – энергия активации, T – температура, при которой происходит реакция, R – универсальная газовая постоянная, и A – так называемый частотный коэффициент, который устанавливает масштаб реакций. Другими словами, скорость реакции быстро возрастает при увеличении температуры выше определенного порога. Поскольку реакция экзотермическая, тепло ускоряет скорость реакции и, если только тепло не будет отводиться, оно приведет к неконтролируемой реакции. Начальная температура, которая инициирует неконтролируемую реакцию, и энергия активации зависят от нескольких факторов, включая концентрацию азотной кислоты и является ли система открытой или закрытой.

Первоначальная оценка этих величин при закрытых условиях привела к начальной температуре 120 °С и определила значение энергии активации в 112 кДж/моль⁴⁴. Частотный коэффициент A зависит от количества азотной кислоты; было оценено, что он равен $4,3 \times 10^{10}$ 1/сек для 6–11 молей азотной кислоты в водной фазе.

В других исследованиях сообщались иные значения, включая существенно меньшие начальные температуры. В одном исследовании была найдена очень низкая начальная температура для экзотермической активности, равная 75 °С, хотя только при высоких концентрациях кислоты⁴⁵. Количество высвобожденной экзотермической энергии представляется зависящим от того, происходило ли нагревание в открытом или в закрытом резервуаре⁴⁶. Нагревание в закрытых резервуарах с большей вероятностью приведет к взрыву.

В дополнение к быстрому выделению теплоты, реакции в красном масле могут производить большое количество горючих газов⁴⁷. Если тепло не будет отведено и газы не будут отведены достаточно быстро, то резервуар может разорваться от высокого давления газа.

Аварии с красным маслом происходили во многих странах. В Соединенных Штатах аварии с красным маслом происходили на площадке в Хэнфорде в 1953 году и на площадке в Саванна Ривер в 1953 и 1975 годах⁴⁸. В обеих взрывах на Саванна Ривер были нагреты растворы фуранилнитрата, в которых, о чем не было известно операторам, содержался трибутилфосфат и его органический растворитель; эти растворы нагрелись, что и привело к разрушительным взрывам⁴⁹.

Томск-7, Северск, Россия

Пожалуй, наиболее серьезный взрыв красного масла произошел в 1993 году на площадке Томск-7 в Северске, Россия. Получившая третий уровень по шкале INES⁵⁰, авария произошла в резервуаре из нержавеющей стали с объемом 34 м³, использовавшимся для подготовки раствора до переработки⁵¹; резервуар был расположен в подземной камере с бетонными стенами толщиной 3 м и бетонной крышей⁵². Сообщалось, что во время аварии в резервуаре «находилось всего 449 г плутония и 8757 кг урана, которые, в предположении удельных активностей 2,3 ТБк/кг и 12,4 МБк/кг для двух элементов, соответствовали полной активности 1,0 ТБк и 0,11 Тбк»⁵³.

Авария началась с добавления 1,5 м³ азотной кислоты к органической смеси (объемом 23,5 м³) в 22:30 6 апреля 1993 года⁵⁴. Было оценено, что в смеси содержалось около 0,5 м³ трибутилфосфата ТВР⁵⁵. Из-за неисправности оборудования, или из-за ошибки оператора, сжатый воздух, который обычно подавался в резервуар для «обеспечения однородной температуры и концентрации азотной кислоты», не был добавлен к раствору⁵⁶. Это привело к тому, что слой органического растворителя (плотность 1400 кг/м³) оказался между нижним горячим слоем раствора уранилнитрата (с плотностью между 1480 и 1590 кг/м³) и верхним слоем азотной кислоты (плотность 1390 кг/м³). Слой растворителя нагрелся и началась экзотермическая реакция, ведущая к образованию и разложению красного масла⁵⁷. Есть свидетельства того, что реакция началась, когда температура органических соединений составляла всего лишь 90 °С⁵⁸.

Около полуночи контрольные приборы указали на подъем давления. Несмотря на попытки сброса давления в резервуаре давление продолжало расти и в 12:55 7 апреля оно достигло 5,0 атм (0,51 МПа). Давление продолжало быстро расти и через несколько минут резервуар разорвался и еще через несколь-

ко секунд последовал взрыв. Здание, в котором находился резервуар и соседние промышленные конструкции были частично разрушены. Ударная волна распространилась по коридору соседнего здания и разрушила стенку из стеклянных блоков⁵⁹.

Мощность взрыва грубо оценивалась в 100 кг тротилового эквивалента, или в 418,4 МДж. Максимальное давление, которое вызвало разрыв резервуара, оценивалось в 3,03 Мпа⁶⁰. Считалось, что повреждение здания стало результатом быстрого сгорания горючих газов, вероятнее всего, бутена (C₄H₈) и окиси углерода CO, выброшенных при начальном взрыве⁶¹. Радиоактивный материал был выброшен в окружающую среду через большие отверстия в боковых стенах и крыше здания.

Доля продуктов деления, которые были выброшены во время аварии, неопределенна, но существенна. Согласно одной из оценок, могло быть выброшено 4,3 ТБк долгоживущих продуктов деления и активированных нуклидов из общего количества в 20,7 ТБк⁶².

Комплекс ядерного топлива в Хайдарабаде

Томск не был последней площадкой, на которой произошел взрыв красного масла. Ранним утром 17 ноября 2002 года раздался взрыв в секции испарителя по установке экстракции растворителя на заводе нового уранового оксидного топлива (NUJFP) на комплексе ядерного топлива в Хайдарабаде, Индия⁶³. Процесс, используемый на комплексе, включает растворение «желтого кека», образующегося при переработке урановой руды, в азотной кислоте, и применение экстракции растворителем для получения уранилнитрита, при последующей обработке которого производится диоксид урана⁶⁴. В этом процессе, так же, как и в процессе ПЬЮРЕКС, применяется трибутилфосфат ТВР⁶⁵. После аварии Регулятивный совет по атомной энергии (AERB) назначил специальный комитет по расследованию, который рассмотрел условия, которые могли привести к взрыву красного масла, включая присутствие нитратов, органических жидкостей и высоких температур в течение аварии⁶⁶. По мнению AERB, «перенос органического вещества в испаритель вместе с использованием пара с давлением выше установленного привело к подъему температуры комплекса органических нитратов выше 130 °С, что сопровождалось переходом реакции в неконтролируемый режим, и, таким образом, вызвало взрыв красного масла»⁶⁷.

Авария инициировала исследования красного масла, проводившиеся в многих институтах, связанных с индийским ядерным сообществом и академией, предположительно финансируемыми Департаментом атомной энергии⁶⁸. Один комплекс исследований проводился в Центре атомных исследований имени Индиры Ганди, и в их результате было синтезировано красное масло и было установлено, что «присутствие нитратов металлов не существенно для формирования красного масла, как считалось ранее, и что формирование красного масла происходит при концентрации кислоты, существенно меньшей, чем предполагалось ранее»⁶⁹. Другое исследование «настоятельно» рекомендует «пересмотреть требования к безопасности, установленные на заводах переработки топлива для предотвращения образования красного масла», поскольку оно показало, что начальная температура неконтролируемого перехода к разложению красного масла может быть такой низкой, как 75 °С, что намного меньше, чем предполагалось ранее⁷⁰. И, наконец, в одном обзоре выбросов красного масла предупреждают, что «радиолиз органической фазы и накопление продуктов радиолитического разрушения в водной фазе может оказать ускоряющее воздействие на образование красного масла, а также на поведение его разложения»⁷¹.

ВЗРЫВЫ ВОДОРОДА

Важный риск взрыва появляется при накоплении водорода. Водород может образовываться в результате разнообразных химических реакций, или при разложении химических соединений, в том числе и воды, под действием высоких уровней радиации, то есть, при радиолизе. Водород воспламеняется, если он присутствует в воздухе при концентрации от 4 до 74% по объему, и он взрывоопасен при концентрации более 13% по объему⁷². Водород образуется в результате радиолиза в переработке по процессу ПЬЮРЕКС в устройствах для растворения, корректировки подаваемого материала и экстракции растворителем, а также в резервуарах для хранения высокоактивных отходов⁷⁴. Особые опасения вызывает накопление радиолитического водорода в резервуарах для отходов перерабатывающих заводов⁷⁴.

Резервуары для высокоактивных отходов непрерывно производят водород в результате радиолиза воды и других химических соединений в отходах. Скорость образования водорода характеризуется коэффициентом g , или количеством молекул H₂, образующихся при поглощении в отходах 100 эВ радиолитической энергии. Коэффициент g , для образования H₂, обычно полагается равным 0,45 для бета и гамма-

излучения, и 1,30 для альфа-излучения⁷⁵.

Большинство перерабатывающих заводов проектируются так, чтобы уменьшить риск опасности образования водорода⁷⁶. Тем не менее, существует риск достижения концентрацией водорода опасных уровней, например, при неисправности вентиляционной системы⁷⁷. На предприятии в Хэнфорде в Соединенных Штатах наблюдался феномен захвата водорода под поверхностью отходов. Это привело к увеличению давления с последующим внезапным выбросом, во время которого концентрация водорода могла достигнуть опасного уровня⁷⁸.

Одна авария, возникшая из-за накопления водорода, произведенного химическими реакциями, произошла в Даунри в мае 1977 года. В этом случае водород образовался в вертикальной шахте, затопленной в 1950-х годах, и взорвался от искры в водяном насосе⁷⁹. Мнения о том, сопровождался ли этот взрыв локальным радиоактивным загрязнением, или нет, расходятся⁸⁰. Сообщалось, что в январе 1970 года взрыв водорода произошел на предприятии в Ла Хаге во Франции, но это сообщение не получило независимого подтверждения⁸¹.

Хотя взрывов водорода на перерабатывающих заводах или в резервуарах для отходов было немного, Национальная лаборатория в Оук-Ридже рассматривает взрыв водорода как свою «максимальную теоретическую аварию»⁸². В исследовании Оук-Риджа были сделаны «иллюстративные (но не наилучшие возможные)» предположения; наиболее важные из этих предположений состояли в том, что резервуар был изготовлен из нержавеющей стали (толщиной 0,5 дюйма или 1,27 см), и что в нем находились высокоактивные отходы, генерирующие тепло с мощностью 11 кВт/м³. Предполагалось, что резервуар «помещен в бетонную камеру со стенами толщиной в 3 фута (91 см), с земляным покрытием толщиной 10 футов (3 м)». С учетом этой конфигурации, в Оук-Риджском сценарии аварии предполагалось, что резервуар был герметичным («потеря очищающего воздуха в резервуаре»), и что концентрация водорода возросла до 30% по объему в течение 24 часов до воспламенения. Для этого сценария расчеты Оук-Риджа показали, что получившийся взрыв высвободит примерно 1,2 ГДж (251 кг тротилового эквивалента) и разовьет давление, достаточное для «подъема бетонной крышки и земляного покрытия на несколько футов (порядка одного метра), ... и резервуар станет непосредственно открытым в атмосферу»⁸³.

НЕОБХОДИМЫЕ УСЛОВИЯ

Для того, чтобы произошел взрыв красного масла, соли или водорода, должно быть выполнено одно, или более, из трех предварительных условий. Первым предварительным условием является перекрытие вентиляционных каналов. Открытый канал позволяет уходить водороду и обеспечивает охлаждение испарением. В отсутствие вентиляции увеличение температуры приводит к увеличению давления по мере накопления пара. Для того, чтобы температура достигла 130 °С, или более, уровня, при котором можно надежно предположить, что реакция красного масла выйдет из-под контроля, давление должно будет превышать 275 кПа⁸⁴. По сравнению, давление, необходимое для разрыва различных технологических резервуаров в Саванна Ривер, Соединенные Штаты, как сообщают, будет больше 1 379 кПа⁸⁵. В случае взрывов красного масла и солей, для которых требуются более высокие температуры, вторым предварительным условием будет потеря охлаждения. Для взрывов красного масла третьим предварительным условием является прекращение внутреннего перемешивания. Если перемешивания не будет, то ил сможет осесть на дно, что позволит сформироваться отдельным слоям органической и водной фаз.

Для того, чтобы началась неконтролируемая реакция, не обязательно, чтобы все эти условия были одновременно выполнены. Например, в не перемешиваемом закрытом резервуаре доступные механизмы теплопередачи ограничены. Если реакция красного масла производит химическую теплоту, то это будет происходить в плавающей органической фазе. Принимая во внимание типичные количества органического материала в резервуаре для отходов и размеры самого резервуара, эта фаза будет находиться в форме диска, радиус которого будет намного больше его толщины. Поскольку органические растворы плохо проводят тепло, то даже при наилучших обстоятельствах охлаждением у стенок резервуара будет охвачена только малая область органической фазы. Поэтому геометрия может помешать крупномасштабные процессы конвекции внутри органической фазы⁸⁶.

Выполнение предварительных условий может также быть вызвано одной причиной. Например, землетрясение может вывести из строя системы вентиляции, охлаждения и перемешивания. Другой причиной могут быть физические и химические явления, которые возникают в связи с образованием красного масла и его неконтролируемыми реакциями. Например, когда ускоряется саморазогрев, органическая фаза станет предрасположенной к формированию пены из-за образования газов⁸⁷. Пенообразование предоставля-

ет механизм закупорки вентиляционных каналов и, фактически, для ограничения события, как это происходило в прошлых авариях⁸⁸. Кроме того, пена может быть термически изолирована от остальной части системы из-за ее хороших изоляционных свойств.

Поскольку конструктивные особенности недоступны в открытой печати, способа надежной оценки вероятности аварии с взрывом не существует. Тем не менее, учитывая многочисленные возможности появления неисправностей на сложных перерабатывающих заводах, присутствующие на этих заводах большие объемы радиоактивных отходов, и тот факт, что аварии происходили в прошлом, сценарии аварий заслуживают того, чтобы их исследовали.

ПЕРЕРАБАТЫВАЮЩИЙ ЗАВОД В КАЛПАККАМЕ

Департамент по атомной энергии Индии производит переработку отработавшего топлива из энергетических реакторов на двух площадках: в Тарапуре на западном берегу и в Калпаккаме на южном берегу. На площадке Тарапур размещено два завода (вступившие в строй в 1977 и 2011 годах), а на площадке в Калпаккаме – один завод (вступивший в строй в 1988 году), производительность каждого из которых равна 100 тонн отработавшего топлива в год. Все заводы перерабатывают только отработавшее топливо с реакторов с тяжелой водой под давлением (PHWRs). Существующие мощности по переработке отработавшего топлива энергетических реакторов на заводе KARP увеличиваются⁸⁹. Однако, согласно сообщениям, старый перерабатывающий завод в Тарапуре используется для «проведения работ по очистке старого плутония», что предположительно означает, что он больше не используется для переработки, а только в целях отделения накапливающегося в плутонии америция-241⁹⁰. На заводе KARP имеется также установка меньших размеров (иногда называемая горячей камерой или ячейкой Лед Мини) для переработки отработавшего топлива от испытательного реактора-размножителя на быстрых нейтронах. Отработавшее топливо от строящегося прототипа реактора-размножителя на быстрых нейтронах будет перерабатываться на установке топливного цикла реактора на быстрых нейтронах, которая также строится на комплексе в Калпаккаме.

Эксплуатацию завода KARP первоначально планировалось начать в 1991 году⁹¹, но она была отложена из-за проблем с контролем качества на трубопроводах и на другом оборудовании⁹², и завод окончательно вступил в строй в 1998 году⁹³. Отходы промежуточного уровня (ILW) и высокоактивные отходы хранятся на подземном предприятии в Калпаккаме, называемом Хозяйством резервуаров для отходов (WTF). В состав хозяйства WTF входят пять резервуаров из нержавеющей стали (марки 304L) для высокоактивных отходов и девяти резервуаров из углеродистой стали для отходов промежуточного уровня (ILW). Емкость каждого из резервуаров для высокоактивных отходов равна 300 кубометров⁹⁴.

Как и в других местах, высокоактивные отходы на заводе KARP должны были посылаться на прилегающий завод иммобилизации отходов (WIP) для обработки на установке витрификации. Хотя предполагалось, что операции по витрификации должны были начаться одновременно с переработкой⁹⁵, на заводе KARP этого не произошло, и завод WIP окончательно вступил в строй только в ноябре 2013 года, через 15 лет после начала работы завода KARP⁹⁶.

Из-за того, что в течение многих лет завод KARP работал без действующего предприятия витрификации, в его резервуарах должно было накопиться значительное количество высокоактивных отходов в жидкой форме, которое можно оценить.

Количество высокоактивных отходов зависит от количества отработавшего топлива, переработанного на заводе KARP. Отчеты по эксплуатации завода KARP публично недоступны. Однако, имеются некоторые свидетельства того, что завод работал не очень эффективно⁹⁷. Для данной оценки мы предположим, что завод KARP в среднем работал на уровне в 30 % от своей полной производительности все время своего существования, которое в момент написания статьи равнялось примерно 18 годам. Следовательно, при принятом коэффициенте загрузки на заводе было переработано примерно 640 тонн отработавшего топлива.

Сообщается, что объем высокоактивных отходов, вырабатываемых при переработке одной тонны отработавшего топлива, равен 0,6 кубометра⁹⁸. Следовательно, если на заводе KARP было предположительно переработано 540 тонн отработавшего топлива, в резервуарах должно было накопиться 324 м³ высокоактивных отходов. Хотя объем каждого резервуара равен 300 м³, мы предположим, что резервуары первоначально заполнялись на 90% своего полного объема, или примерно 270 кубометров⁹⁹. Поэтому для хранения высокоактивных отходов потребуются два резервуара, один из которых будет заполнен до максимально разрешенного объема в 270 м³ (содержащего высокоактивные отходы, образованные при пере-

работке 450 тонн отработавшего топлива). Даже если предположить, что некоторая часть высокоактивных отходов была остеклована на заводе WIP, мало вероятно, что накопившийся объем высокоактивных отходов поместится в одном резервуаре.

Следует принимать в расчет и другие процессы. Из-за температуры внешней среды в регионе, так же, как и из-за тепла, выделяющегося при радиоактивном распаде, высокоактивные отходы в резервуарах будут испаряться, и в течение прошедшего периода времени объем высокоактивных отходов, хранящихся в каждом из этих резервуаров, будет постепенно уменьшаться. Поэтому мы предположим, что объем понизится до 240 м^3 , или около 80% от полного объема резервуара, что приведет к соответствующему увеличению концентрации радиоактивности¹⁰⁰.

Сообщают, что содержание радиоактивности в высокоактивных отходах индийских перерабатывающих заводов составляет $7,4 \text{ ПБк/м}^3$.¹⁰¹ Большой интерес представляет количество цезия-137 в каждом резервуаре, поскольку ожидается, что этот радионуклид в случае аварии будет вносить основной вклад в радиационную дозу, частично из-за того, что период его полураспада равен 30 годам¹⁰². При степени выгорания отработавшего топлива с ядерных реакторов с тяжеловодным замедлителем в $6\ 600 \text{ Мвт-день/тУ}$ количество цезия-137, образовавшегося в каждой тонне отработавшего топлива будет равно $0,74 \text{ ПБк}$ после периода охлаждения в три года и $0,71 \text{ ПБк}$ после периода охлаждения в 5 лет¹⁰³. В предположении, что высокоактивные отходы в среднем охлаждаются 7,5 лет, концентрация будет примерно равна $0,67 \text{ ПБк}$ на тонну переработанного отработавшего топлива. Поэтому в каждом резервуаре для отходов будет содержаться 300 ПБк цезия-137; поскольку мы предположили, что высокоактивные отходы в конечном счете займут только 240 м^3 , концентрация цезия-137 будет примерно равна $1,3 \text{ ПБк/м}^3$.

В другом месте¹⁰⁴ сообщалось, что концентрация цезия в «эквивалентных» высокоактивных отходах (используемых для экспериментов) равна 543 г/м^3 , что преобразуется в $1,7 \text{ ПБк/м}^3$. Даже после учета поправки на включение цезия-134 это значение будет больше предполагаемого нами, и поэтому наши вычисления уровней радиоактивного загрязнения и количества пострадавших от рака, вероятно, будут недооценивать реальные значения.

Имеются некоторые основания опасаться того, что все рассмотренные ранее три типа химических взрывов могут произойти на заводе KARP и на других индийских перерабатывающих заводах. Департамент атомной энергии заявил в годовом отчете за 2011 год, что: «Образование красного масла в неконтролируемой реакции азотной кислоты и трибутилфосфата ТВР представляет собой угрозу безопасности для [любого] перерабатывающего завода, использующего процесс ПЬЮРЕКС»¹⁰⁵. Такая реакция может разрушить резервуар для отходов и здание, в котором он находится.

Одна количественная оценка была проведена корпорацией «Вестингауз» для предприятия Саванна-Ривер в Соединенных Штатах; было обнаружено, что «для того, чтобы произошла неконтролируемая реакция красного масла величиной, достаточной для нарушения герметичности каньона F, она должна включать по крайней мере 3 000 фунтов (1,35 тонны) трибутилфосфата ТВР»¹⁰⁶. При комнатной температуре плотность ТВР примерно равна $0,97 \text{ г/мл}$ ¹⁰⁷. Следовательно, объем ТВР, необходимый для того, чтобы произошла неконтролируемая реакция красного масла, достаточная для нарушения герметичности каньона F на предприятии Саванна-Ривер, будет примерно равен $1,4 \text{ м}^3$. Если предположить, что прочность герметичной оболочки резервуаров на заводе KARP такая же, как у каньона F, то количество ТВР, необходимое для взрыва, разрушающего герметичную оболочку, будет меньше 1% от объема резервуара для высокоактивных отходов на заводе KARP. В высокоактивных отходах естественно будут оставаться небольшие количества органических соединений от процесса переработки, и нельзя исключить, что их доля будет составлять около 1%¹⁰⁸.

Эта количественная оценка позволяет предположить, что вполне возможно, хотя и маловероятно, что может развиваться выброс красного масла, способный разрушить резервуар для отходов¹⁰⁹. Хотя взрыв красного масла может быть достаточно мощным, чтобы вызывать разрушение резервуара, такое событие может не стать достаточно мощным, чтобы испарить значительную часть высокоактивных отходов, и его радиологическое значение будет только локальным.

Перейдем теперь к возможности взрыва водорода. По оценкам Департамента атомной энергии, скорость образования водорода в резервуаре высокоактивных отходов составляет $0,149 \text{ л/сек}$ или $0,536 \text{ м}^3/\text{час}$ (при стандартных температуре и давлении)¹¹⁰. При обычных обстоятельствах водород будет выходить наружу. Однако, если вентиляционные каналы будут заблокированы, то водород начнет накапливаться в резервуаре. Если мы предположим, что после испарения резервуар будет заполнен на 80%, то оставшийся объем, в котором может удерживаться выделяющийся водород, будет равен 60 м^3 . Минимальная концентрация, необходимая для взрыва, равна 13% по объему. Отсюда следует, что объем во-

дорода, необходимый для взрыва, составит $7,8 \text{ м}^3$, и для накопления такого количества потребуется 14,6 часа. Для того, чтобы концентрация водорода достигла 30%, предполагавшихся в исследовании Оук-Риджа, понадобится примерно 34 часа. Вполне возможно, что блокировка вентиляционных каналов не будет обнаружена в течение такого периода времени.

При концентрации в 30% масса водорода составит около 24 кг. Очень грубую оценку действия такого взрыва водорода можно получить, рассчитав эквивалентную массу тротила, которая может обеспечить такую же мощность взрыва, с помощью формулы:

$$m_{TNT} = \frac{f_H C_H m_H}{C_{TNT}}$$

где m_H – масса взрывающегося водорода, C_H и C_{TNT} – теплота сгорания газообразного водорода и тротила соответственно, и f_H – коэффициент, учитывающий, что не все тепло, выделяющееся при сгорании, переходит в ударную волну¹¹¹. Предположив, что f_H равно $0,1^{112}$, C_H равно $4,8 \text{ МДж/кг}$ и C_{TNT} равно 120 МДж/кг , получаем, что тротиловый эквивалент 24 кг водорода будет равен 60 кг^{113} . На рисунке 2 показана зависимость избыточного давления, соответствующее взрыву с таким тротиловым эквивалентом, в зависимости от расстояния до точки взрыва.

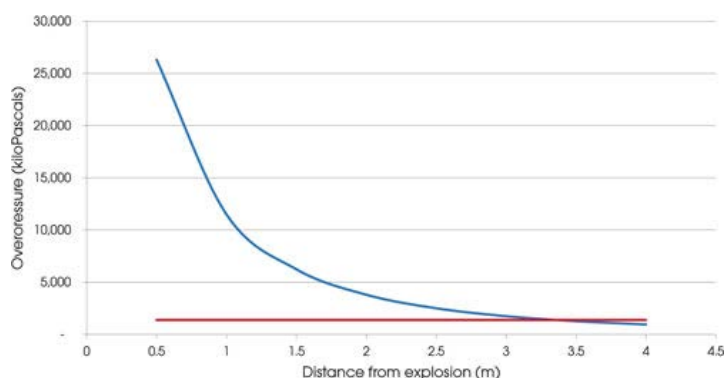


Рисунок 2. На верхней кривой показано избыточное давление (в килопаскалях) от взрыва 24 кг водорода в зависимости от расстояния (в метрах). Для сравнения показано давление разрыва стальных резервуаров (нижняя прямая линия), оцениваемое в 1 379 килопаскалей.

Давление разрыва стальных резервуаров в Саванна Ривер оценивается примерно в $1\,379 \text{ кПа}^{114}$. Оно может быть легко превышено в рассматриваемом нами сценарии, поскольку высота резервуаров завода KARP составляет примерно 4 м; поэтому, если 20% высоты будет заполнены водородом, то центр взрыва не может быть удален от верхней точки резервуара более, чем на 0,8 м. Сравнение избыточного давления взрыва от расстояния, показанного на рисунке 2, показывает, что избыточное давление от взрыва водорода, вероятно, разорвет резервуар. Как и в случае взрывов красного масла, даже взрыв водорода, достаточно мощный, чтобы разорвать резервуар, вряд ли будет достаточно энергичным, чтобы испарить значительную часть высокоактивных отходов. Радионуклиды, выброшенные из резервуара таким взрывом, смогут оказать только локальное радиологическое воздействие.

Имеется также возможность взрыва солей, поскольку, как сообщают, в резервуарах высокоактивных отходов наблюдаются вариации состава (смотрите рисунок 3)¹¹⁵, и в некоторых слоях могут находиться большие количества взрывоопасных солей, которые могут, при отсутствии охлаждения, нагреваться до довольно высоких температур и инициировать неконтролируемую химическую реакцию. Нам не известны никакие количественные оценки образования солей, но, как обсуждалось ранее, образование солей и их высушивание привело к сильному взрыву на комбинате «Маяк». Открытой информации недостаточно для того, чтобы позволить нам узнать, накапливаются ли в резервуарах отходов на заводе KARP аналогичные слои ила и солей.

Тем не менее, может появиться возможность возникновения взрыва с участием солей в результате накопления предыдущих неисправностей и каскадирования событий¹¹⁶. Могут отказать система охлаждения и датчики мониторинга, что приведет к увеличению температуры, испарению жидкостей и высушива-

нию высокоактивных отходов. Температура твердого осадка радиоактивного материала будет продолжать расти, и он может взорваться аналогично рассмотренному ранее взрыву на комбинате «Маяк». Взрыв водорода или красного масла может привести к разрушению резервуара, так же как к появлению радиационного барьера, который препятствует персоналу завода проводить ремонт или выполнять иные действия. При таких условиях продолжающееся испарение и высушивание жидкостей может вызвать энергичный взрыв содержимого резервуара высокоактивных отходов.

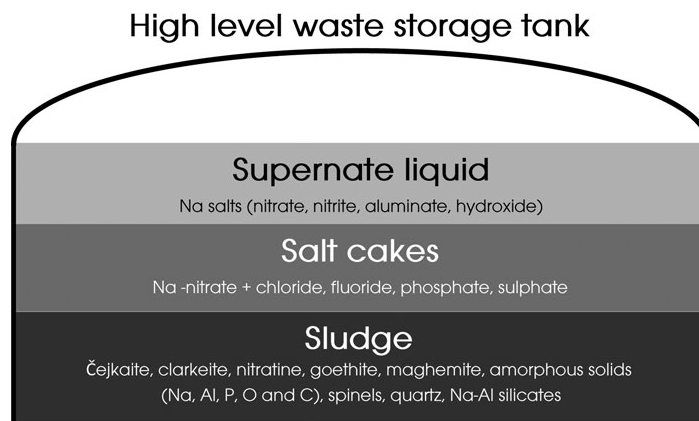


Рисунок 3. Схематическое представление формирования слоев в резервуаре для хранения высокоактивных отходов. Некоторые слои с различным составом в резервуарах высокоактивных отходов могут содержать большие количества солей, которые могут взорваться при отсутствии охлаждения (адаптировано из рисунка в: Sengupta, Pranesh. "A Review on Immobilization of Phosphate Containing High Level Nuclear Wastes Within Glass Matrix – Present Status and Future Challenges" *Journal of Hazardous Materials*, 235-236 [2012]: 17-28.). Надписи на рисунке (сверху вниз): 1 – надосадочная жидкость; соли натрия (нитрат, нитрит, алюминат, гидроксид); 2 – соляной кек (нитрат натрия + хлорид, фторид, фосфат, сульфат); 3 – осадок: сейкаит, кларкеит, нитратин, гоэтит, магхемит, аморфные твердые образования (Na, Al, P, OиC), шпинели, кварц, силикаты натрия и алюминия.

В заключение, исторические прецеденты и техническое правдоподобие ведут нас к озабоченности в отношении химических взрывов в резервуарах высокоактивных отходов. Хотя вероятность каскада событий по рассмотренным ранее направлениям предположительно мала, возможно, что один взрыв, или более, смогут разрушить резервуар и другие физические барьеры, и рассеять значительную часть продуктов деления в высокоактивных отходах в атмосфере. В последующей части статьи рассматривается, как эти продукты деления будут рассеиваться над южной Индией.

РАССЕЯНИЕ И ОСАЖДЕНИЕ

Для расчета рассеяния в атмосфере радиоактивности от взрыва резервуара с отходами от переработки применяется гибридная одночастичная лагранжева интегрированная модель траектории (версия HYSPLIT4), разработанная в Лаборатории исследования воздуха (ARL) Национальной администрации по океану и атмосфере США (NOAA)¹¹⁷. Программа находится в открытом доступе¹¹⁸.

Программа моделирует траектории, рассеяние и осаждение атмосферных выбросов от источника на базе метеорологических данных. Для последующих расчетов мы используем метеорологические данные из Глобальной системы представления данных (Global Data Assimilation System – GDAS), предоставленными Национальным центром предсказаний состояния окружающей среды (National Center for Environmental Prediction – NCEP). Модель отслеживает перемещение и диффузию виртуальных частиц через ячейки сетки, где концентрации рассчитываются как суммы частиц. Результаты расчетов рассеяния и осаждения представляются в виде контуров равной концентрации на карте.

В расчетах предполагается, что взрыв происходит в резервуаре хранения высокоактивных отходов от переработки на заводе KARP, и что 10% содержания радиоактивности в баке выбрасывается в виде аэрозолей микронного размера на высоту 100 м. Для отражения взрывной природы выброса мы предполагаем вертикальный линейный источник от 10 до 100 м над уровнем земли, из которого в атмосферу равномерно

выбрасываются виртуальные частицы. Предполагается, что выброс включает в себя примерно 30 ПБк цезия-137, на основании оцениваемого содержания 300 ПБк цезия-137 в резервуаре.

Выброс принимает форму султана, частицы которого диффундируют в атмосфере, и перемещаются согласно господствующим ветровым условиям. Для оценки подходящего времени моделирования султана, за которое выпадет большая часть цезия-137, мы принимаем стандартное предположение о том, что все частицы перемешиваются по вертикали до высоты 1 000 м (так называемый слой перемешивания). Поскольку в отсутствие атмосферных осадков частица микронного размера приобретает направленную вниз конечную скорость в $0,002 \text{ м/с}^{119}$, то всем частицам, выброшенным на верхний край слоя перемешивания, потребуется в среднем около 140 часов для того, чтобы достичь земной поверхности. Поэтому мониторинг султана в течение этого периода времени (140 часов) позволит наблюдать осаждение большей части выброшенной радиоактивности на землю¹²⁰.

Модель HYSPLIT позволяет рассчитать сухое и влажное осаждение на основании метеорологических данных для указанного времени и местоположения. При моделировании рассчитывается суммарное выпадение на землю для каждой точки сетки выходных данных. Результаты расчетов приводятся в кБк/м² накопившегося осаждения цезия-137.

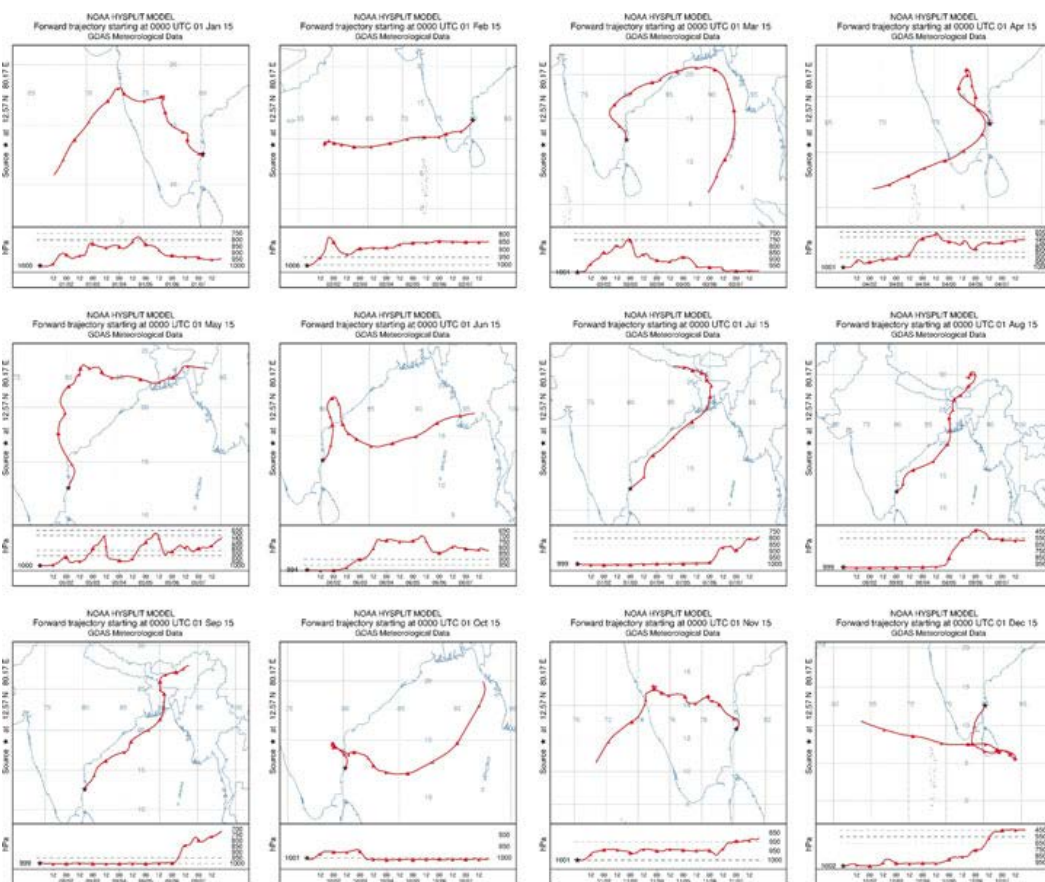


Рисунок 4. Набор модельных траекторий для выбросов из Калпакамма. Была рассчитана основная траектория для первой недели каждого месяца 2015 года. Более, чем в половине случаев значительная часть траектории проходит над сушей. Графики в нижней части каждой карты показывают вертикальное перемещение в зависимости от времени.

Завод KARP находится на берегу океана, где метеорологические условия сильно меняются, что приводит к вариациям таких величин, как направление и скорость ветра, вертикальное перемещение и осаждение. Эта переменность очевидно проявляется на рисунке 4, где показаны траектории выбросов с завода KARP в первый день каждого месяца 2015 года. Из рисунка видно, что около половины траекторий проходят над сушей, где радиоактивные осадки могут повлиять на населенные людьми районы¹²¹.

Для нашего подробного анализа воздействия выброса на население мы выбрали дату выброса 1 ноября 2015 года. Полная площадь выпадения всех радионуклидов и область выпадения на суше соответ-

венно показаны на рисунках 5 и 6. В результате моделирования показано, что на сушу выпало всего лишь около 5% выброшенной радиоактивности (рисунок 6). Это важно, поскольку попытку такого типа можно истолковать как анализ наихудшего случая, несмотря на то, что наш выбор даты был относительно произвольным, и привел к тому, что подавляющее большинство радионуклидов выпало над Бенгальским заливом. В самом деле, наши расчеты для других дат (например, 1 апреля 2013 года) показали, что в некоторых случаях султан движется в основном в сторону суши, и с более печальными последствиями.

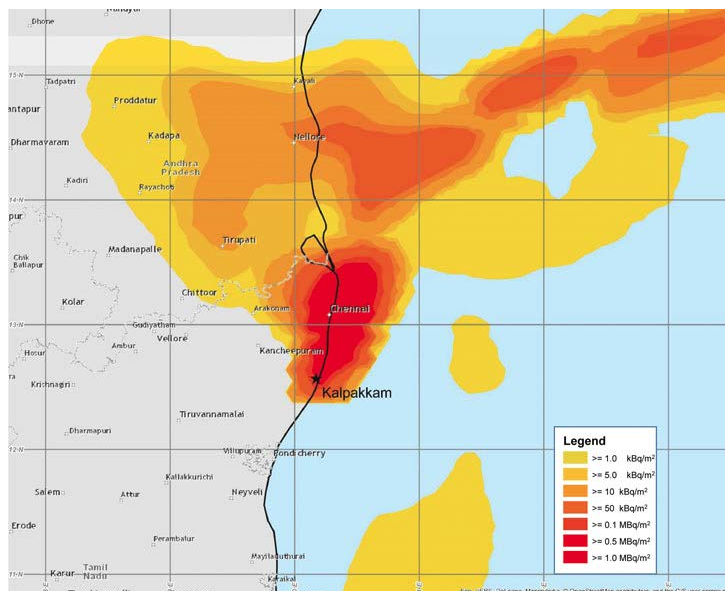


Рисунок 5. Осаждение радиоактивного выброса 30ПБк цезия-137 из резервуара высокоактивных отходов в Калпаккаме.

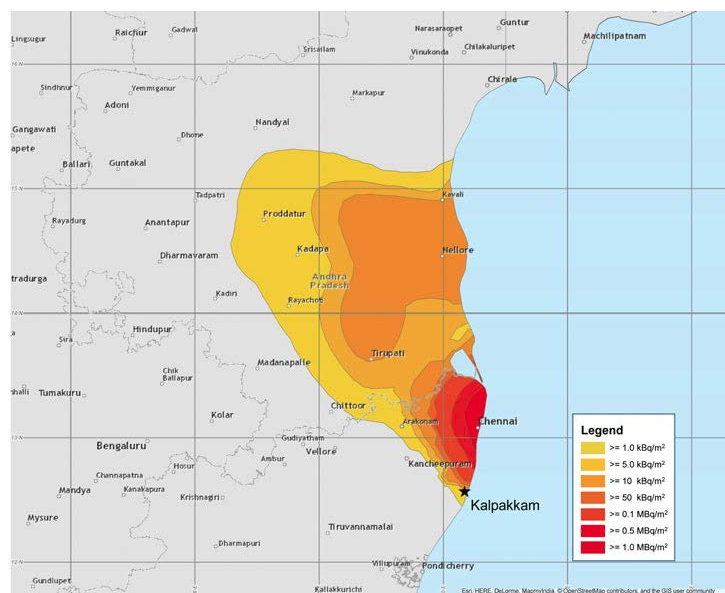


Рисунок 6. Карта выпадения радиоактивного выброса 30ПБк цезия-137 из резервуара высокоактивных отходов в Калпаккаме.

Хотя картина осаждения чувствительна к сделанным предположениям и конкретно используемой модели рассеяния в атмосфере, общая доза для населения и последующее влияние на здоровье популяции должны быть относительно устойчивыми предсказаниями. Влияние на здоровье определяется многими отдельными лицами, получившими относительно малые дозы облучения. Отсюда следует, что если одно и то же количество радионуклидов распространится над областями с аналогичной плотностью населения,

то общая доза для популяции не будет чувствительна к переменным параметрам распространения в атмосфере. Конечно, влияние на здоровье любого отдельного лица или резидентов отдельного города или деревни будет зависеть от деталей распространения, но целью нашего моделирования является расчет общей экспозиции популяции, а не расчет доз для отдельных лиц или местоположений. Поэтому здесь достаточно использовать средние значения плотности населения.

Доза радиации рассчитывалась из уровня радиоактивности, выпавшей на земную поверхность (свечение земли), проинтегрированной за следующие 50 лет. Эта доза в свою очередь использовалась для оценки избытка риска ракового заболевания. Поскольку свечение облака и дозы при вдыхании очень малы по сравнению с долгосрочной дозой от загрязнения земли, мы будем игнорировать их вклад в наши вычисления.

ДОЗА ОБЛУЧЕНИЯ ВСЕГО ТЕЛА ОТ СВЕЧЕНИЯ ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ

Доза для отдельного лица, проживающего в загрязненной области, определяется коэффициентом дозы для цезия-137, уменьшенного из-за влияния защиты жильем и другими строениями, и постепенного выветривания и погружения радионуклидов в почву. Последний фактор эмпирически аппроксимируется двойной экспонентой, описывающей быстрое и затем относительно медленное погружение, а также радиоактивный распад цезия-137¹²²:

$$r(t) = 0.57 \exp\left(-\left(\frac{\ln 2}{2.4} + \frac{\ln 2}{30}\right)t\right) + 0.58 \exp\left(-\left(\frac{\ln 2}{37} + \frac{\ln 2}{30}\right)t\right)$$

которая интегрируется по 50 годам, после округления до 14 лет. В формуле числа 2,4 и 37 являются эмпирически определенными временами уменьшения в два раза для выветривания, а 30 представляет период полураспада цезия-137. Все эти числа измеряются в годах. Коэффициент дозы для цезия-137 равен 17,36 (мЗв/год)/(МБк/м²)¹²³. Защита существенно изменяет эту величину. Значения поправки на защиту сильно зависят от окружающей среды (сельской или городской), а оценки в литературе изменяются в широких пределах¹²⁴. Мы выбираем факторы поправки на защиту, указанные в литературе, специфической для Индии. В ней предлагаются факторы защиты в 0,3 для кирпично-бетонных зданий, 0,5 для кирпично-черепичных зданий, 0,8 для глиняно-тростниковых зданий и 1,0 для тростниковых зданий¹²⁵. Опубликованных сведений о защите в городских районах Индии нет, но ожидается, что дозы в городе будут ниже. Поэтому мы предположим, что средний фактор защиты в сельской местности (которую мы определим, как районы, в которых плотность населения меньше 500 человек на квадратный километр) будет равен 0,7, а средний фактор защиты в городских районах с плотностью населения больше 500 человек на квадратный километр примем равным 0,4. Отметим, что это средние значения, предназначенные для учета вариаций в типах домов и рабочих мест, занимаемых людьми с различным стилем жизни и родом занятий. С такими предполагаемыми факторами защиты дозы за пятьдесят лет на единицу загрязнения цезием-137 для людей в сельских и городских районах соответственно будут равны 170 (мЗв/год)/(МБк/м²) и 97 (мЗв/год)/(МБк/м²).

В выбранном для уточнения сценарии самые большие уровни загрязнения будут наблюдаться в районе города Ченнай (Мадраса), который весьма густо населен (9 миллионов человек вместе с пригородами). После выброса в 30 ПБк 1 ноября 2015 года в районах с высоким уровнем загрязнения более 1 МБк/м², что примерно совпадает с критерием эвакуации, принятым японским правительством для постоянного перемещения после аварии в Фукусиме, окажется почти 4,2 миллиона человек. Близость Ченная к заводу KARP делает его вероятной зоной радиоактивных осадков, если ветер дует на север. Поскольку завод KARP находится всего лишь в 70 км от Ченная, выброшенному облаку понадобится всего лишь 3 – 5 часов при средней скорости ветра в 4–6 м/с¹²⁷, чтобы достичь города; это время вряд ли достаточно для того, чтобы эвакуировать значительную часть населения. Даже для того, чтобы эвакуировать некоторую часть населения, потребуются большие социальные и экономические издержки. Для целей данного анализа, мы предположим, что такая крупномасштабная эвакуация не проводилась, и рассчитаем общую радиационную дозу для популяции и соответствующие значения смертельных исходов от раковых заболеваний.

На основании перечисленных выше факторов и результатов расчетов по программе HYSPLIT количества цезия-137, рассеянного над южной Индией, мы оценили, что выброс 30 ПБк на заводе KARP 1 ноября

2015 года приведет к полной радиационной дозе для популяции в 920 000 человеко-Зв. Основной вклад в эту величину внесет доза популяции в городских районах Ченная с 900 000 человеко-Зв. Принимая во внимание траектории, показанные на рисунке 4, можно представить себе другие сценарии, в которых основная часть дозы популяции возникнет от населения сельских районов.

Общая доза примерно в двадцать раз превышает оценку Научного комитета ООН по действию атомной радиации (UNSCEAR) в 48 000 человеко-Зв для коллективной дозы населения Японии от множественных аварий на ядерных реакторах Фукусима Дай-ичи¹²⁸.

В таблице 2 перечислены оценки количества возникших раковых заболеваний и их смертельных исходов от экспозиции в 10^4 человеко-Зв в соответствии с исследованием биологических эффектов ионизирующего излучения (BEIR)VII, проведенного Национальной академией наук США¹²⁹. Количество смертельных исходов, которые могут произойти от раковых заболеваний, конечно, зависит от качества здравоохранения, и может считаться менее определенным по сравнению с оценкой количества раковых заболеваний. В намеченном здесь сценарии аварии радиоактивный выброс в 30 ПБк цезия-137 из резервуара высокоактивных отходов на заводе KARP при предполагаемых метеорологических условиях может привести к коллективной дозе популяции в 920 000 человеко-Зв, и это может привести к примерно 97 000 избыточных раковых заболеваний, которые могут развиться за десятки лет в затронутой популяции. Около 47 000 из этих случаев могут оказаться смертельными. Доза популяции будет линейно зависеть от предполагаемого выброса.

Как показано в таблице 2, имеются существенные неопределенности в оценках возникновения раковых заболеваний и смертности от радиационной экспозиции. Эти неопределенности добавляются к ранее упомянутым неопределенностям в картинах выпадения и защите. Вследствие этого возникнут значительные неопределенности в количестве людей, заболевших раком, и умерших от него. Тем не менее, в общем и целом, мы старались при выборе параметров склоняться к таким значениям, которые скорее уменьшают количество смертных случаев, чем преувеличивают его.

В течение последнего десятилетия появлялись новые свидетельства прочего воздействия на здоровье, отличающегося от раковых заболеваний, во многих случаях смертельного, которое возникает в результате экспозиции даже к малым уровням радиации. В частности, последние обзоры позволяют предположить, что многие нарушения кровообращения связаны с экспозицией к малым и умеренным дозам радиации, могут быть такими же частыми по порядку величины, как и раковые заболевания¹³⁰.

Таблица 2. Оценки Комитета по биологическим эффектам ионизирующего излучения (BEIR) количества раковых заболеваний и смертельных случаев от них, ожидаемых у 100 000 персон (с распределением по возрасту, аналогичным населению Соединенных Штатов), получившим дозу в 100 мЗв. Оценки сопровождаются показанными в скобках 95% субъективными доверительными интервалами, которые отражают наиболее важные источники неопределенности для населения Соединенных Штатов.

	Солидные злокачественные образования		Лейкемия	
	Мужчины	Женщины	Мужчины	Женщины
Избыток раковых заболеваний	800 (400–1600)	1300 (690–2500)	100 (30–300)	70 (20–250)
Избыток смертельных исходов	410 (200–830)	610 (300–1200)	70 (20–220)	50 (10–190)

ВЫВОДЫ

Перерабатывающие заводы и связанные с ними установки хранят большие и концентрированные запасы радиоактивности, которые могут быть случайно выброшены в атмосферу. Данная статья обращает особое внимание на резервуары хранения высокоактивных отходов, которые подвержены воздействию различных химических взрывов, которые могут привести к возможному разрыву резервуара и выбросу радиоактивного материала. Даже если резервуары высокоактивных отходов защищены разнообразными системами обеспечения безопасности, то вполне возможно, что все системы безопасности могут отказать при определенных обстоятельствах. Более того, резервуары, в отличие от реакторов, обычно не располагаются внутри герметизирующих конструкций, что делает вероятным, что любая утечка радиоактивности приведет к ее распространению. Исследование последствий такой аварии можно будет рассматривать как сценарий малой вероятности и наихудшего случая¹³¹. Но, как утверждает социолог Ли Кларк, важно участвовать в построении таких сценариев, поскольку катастрофы, даже наихудшие, являются частью нашей

жизни¹³².

Мы рассчитали сценарий аварии на заводе KARP, расположенном в 65 км к югу от города Ченнай (Мадрас). Вероятно, что в резервуарах для хранения высокоактивных отходов на заводе KARP накопилось значительное количество отходов из-за пятнадцатилетней задержки ввода в строй связанного с ними завода витрификации. Завод KARP также вызывал опасения из-за управленческих проблем. В 2003 году на этом заводе произошел отказ клапана, который привел, как заявило руководство завода, к «наихудшей аварии радиационного облучения» в истории ядерной энергетики Индии¹³³. Более подробный анализ этой аварии показал, что Департамент атомной энергии нарушил многие рекомендации, предлагавшиеся большинством теоретиков безопасности, включая отсутствие резервирования, относительно низкий уровень важности безопасности, и отсутствие нормальных отношений между руководством и рабочими¹³⁴.

Моделирование распространения радиоактивного выброса в атмосфере предполагаемых 10% запасов в одном резервуаре высокоактивных отходов на заводе KARP показало, что такая авария может оказать серьезное влияние на общественное здравоохранение, с почти 47 000 смертельных исходов от рака и заражением больших площадей на десятилетия. Почти столько же человек пострадает от не смертельных раковых заболеваний.

Эти оценки радиационной экспозиции и загрязнения возникли только от экспозиции к цезию-137 от долговременного заражения земной поверхности. В реальном выбросе произойдет дополнительная экспозиция от выпавших на землю других радионуклидов, от вдыхания при прохождении радиоактивного облака над населением, и от экспозиции гамма-излучению от радиоактивного облака. Хотя ожидается, что доза от загрязнения земли цезием-137 будет играть ведущую роль, дозы от других радионуклидов также могут быть значительными. Мы игнорировали эти экспозиции, чтобы получить консервативные (близкие к нижнему пределу) оценки количества раковых заболеваний и их смертельных исходов.

После аварии в Чернобыле площадь земель, обозначенных как зараженные и непригодные для использования в сельском хозяйстве из-за содержания более 37 кБк/м² цезия-137, превышала 146 000 км² только в Белоруссии, Украине и Российской Федерации¹³⁵. Соответствующая площадь в рассмотренном выше сценарии составляла около 3 500 км². Большая разница, вероятно, связана с большим выбросом в Чернобыле (85 Пбк) по сравнению с 30 Пбк в предполагаемом нами сценарии, и в природе дисперсии в день, выбранный в нашем сценарии. Последний выбор привел к тому, что большая часть цезия-137 выпала в Бенгальском заливе, и выпадение осадков было относительно сконцентрировано в сравнительно небольшой области. Однако, эта область была центром финансовой активности и это выпадение могло привести к существенным экономическим потерям. Другие даты выброса могли привести, например, к более низкой общей дозе для популяции, но к большим загрязненным площадям.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают признательность Лаборатории исследований воздуха (ARL) Национальной администрации по океану и атмосфере США (NOAA) за предоставление использованной в данной публикации модели переноса и рассеивания HYSPLIT и Национальному центру предсказаний состояния окружающей среды (NCEP) за предоставление метеорологических данных, и Фрэнку фон Хиппелю и Яну Бейеа за полезные обсуждения. Мы благодарим рецензентов журнала за подробную и критическую обратную связь.

ПРИМЕЧАНИЯ И ССЫЛКИ

1. W.C. Perkins, W.S. Durant, and A.H. Dexter, "Potential Safety-Related Incidents with Possible Applicability to a Nuclear Fuel Reprocessing Plant," Savannah River Laboratory, 1980; Gordon R. Thompson, "Radiological Risk at Nuclear Fuel Reprocessing Plants," Institute for Resource and Security Studies, 7 July 2014; IPFM, "Plutonium Separation in Nuclear Power Programs: Status, Problems, and Prospects of Civilian Reprocessing Around the World," International Panel on Fissile Materials, 2015.
2. John Deutch et al., "The Future of Nuclear Power: An Interdisciplinary MIT Study," Massachusetts Institute of Technology, 2003, 51.
3. Сюда включены заводы Саванна-Ривер, Маяк, Ок-Ридж, ЛаХаг, Уиндскейл, Томск, Токаи, Карлсруэ, Хэнфорд и Селлафилд. Можно также включить аварии на заводе триоксида урана в Онтарио в 1980 году и аварию в сентябре 1999 года в Токаи-Мура, поскольку такой тип аварий может происходить на перерабатывающем заводе.
4. NRC, "Background, Status, and Issues Related to the Regulation of Advanced Spent Nuclear Fuel Recycle

- Facilities,” Advisory Committee on Nuclear Waste and Materials White Paper Nuclear Regulatory Commission, June 2008, 35, <http://pbadupws.nrc.gov/docs/ML0815/ML081550505.pdf>.
5. Также имеется возможность пожара в бассейне отработавшего топлива, которая рассматривалась в других работах. Смотрите, например, Robert Alvarez et al., “Reducing the Hazards from Stored Spent Power-Reactor Fuel in the United States” *Science and Global Security*, 11 (2003): 1-51; and Committee on Lessons Learned from the Fukushima Nuclear Accident for Improving Safety and Security of U.S. Nuclear Plants. *Lessons Learned from the Fukushima Nuclear Accident for Improving Safety and Security of U.S. Nuclear Plants: Phase 2* (Washington, D.C.: National Academies Press, 2016), <http://www.nap.edu/catalog/21874>.
 6. Свой вклад в дозу будут вносить и другие радионуклиды, но благодаря комбинации их различных времен жизни и их концентраций в высокоактивных отходах они менее важны, чем цезий-137.
 7. UNSCEAR, “Sources and Effects of Ionizing Radiation: UNSCEAR 2000 Report to the General Assembly, with Scientific Annexes,” United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, United Nations, 2000, 457.
 8. Pascal Achim et al., “Analysis of Radionuclide Releases from the Fukushima Dai-Ichi Nuclear Power Plant Accident Part II,” *Pure and Applied Geophysics*, 171 (2014): 645-67, doi:10.1007/s00024-012-0578-1.
 9. Victor Winiarek et al., “Estimation of the Cesium-137 Source Term from the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant Using a Consistent Joint Assimilation of Air Concentration and Deposition Observations,” *Atmospheric Environment*, 82 (2014): 268-79. doi:10.1016/j.atmosenv.2013.10.017.
 10. WHO, “Preliminary Dose Estimation from the Nuclear Accident after the 2011 Great East Japan Earthquake and Tsunami,” World Health Organization, 2012, 88.
 11. Во время витрификации высокоактивные отходы смешиваются с расплавленной стекловидной субстанцией при высоких температурах, разливаются в контейнеры и охлаждаются.
 12. Накопление больших запасов высокоактивных отходов происходит не только в Калпакамме. Большие запасы имеются также на крупных перерабатывающих заводах в Великобритании и Франции, объем которых, как сообщают, превосходит 1000 м³. M. A. Ytre-Eide et al., “Consequences in Norway of a Hypothetical Accident at Sellafield: Potential Release –Transport and Fallout,” Norway: Norwegian Radiation Protection Authority, 2009, http://inis.iaea.org/Search/search.aspx?orig_q=RN:43107390; Gordon R. Thompson, “Radiological Risk at Nuclear Fuel Reprocessing Plants,” Institute for Resource and Security Studies, July 7, 2014.
 13. D.D. Sood, A.V.R. Reddy, and N. Ramamoorthy, *Fundamentals of Radiochemistry* (Indian Association of Nuclear Chemists and Allied Scientists, 2004), 378.
 14. Трибутилфосфат (ТБФ) слишком плотен и вязок для использования в чистом виде, и для улучшения физических характеристик его смешивают с керосином или каким-либо другим углеводородным растворителем. Смотрите Terry Todd, “Spent Nuclear Fuel Reprocessing,” Nuclear Regulatory Commission Seminar, Rockville, MD, March 25, 2008.
 15. Placid Rodriguez, “Chemical Engineering and Fast Breeder Reactor Technology,” in *Advances in Chemical Engineering*, ed. Y. B. G. Varma et al. (Delhi: AlliedPublishers, 1996), 45-58.
 16. Kanwar Raj, “Commissioning and Operation of High Level Radioactive Waste Vitrification and Storage Facilities: The Indian Experience,” *International Journal of Nuclear Energy Science and Technology*, 1 (2005):148-63.
 17. Neetika Rawat et al., “Evaluation of a Supported Liquid Membrane Containing a Macrocyclic Ionophore for Selective Removal of Strontium from Nuclear Waste Solution,” *Journal of Membrane Science*, 275 (2006): 82. doi:10.1016/j.memsci.2005.09.006.
 18. Manson Benedict, Thomas H. Pigford, and Hans Wolfgang Levi, *Nuclear Chemical Engineering* (New York, NY: McGraw-Hill, 1981), 568.
 19. Manson Benedict, Thomas H. Pigford, and Hans Wolfgang Levi, *Nuclear Chemical Engineering* (New York, NY: McGraw-Hill, 1981); Andrew Blowers and Chris Belshaw, “Power in the Land: Conflicts over Energy and the Environment,” in *Contested Environments*, ed. Nick Bingham, Andrew Blowers, and Chris Belshaw (Chichester, UK: John Wiley & Sons, 2003), 109. Термин «Тяжелый металл» указывает, что масса топлива измеряется своим первоначальным содержанием урана, или урана и плутония, без включения массы конструкционных материалов или кислорода в оксидах урана и плутония.
 20. Как указал официальный представитель индийского департамента по атомной энергии (DAE), «Хранение жидкости в резервуарах из нержавеющей стали в лучшем случае может быть только промежуточным этапом». Raj, “Commissioning and Operation of High Level Radioactive Waste Vitrification and Sto-

- rage Facilities,” 149 (ссылка 16).
21. Benedict, Pigford, and Levi, *Nuclear Chemical Engineering*, 580 (ссылка 18).
 22. Howard Hu et al., *Plutonium: Deadly Gold of the Nuclear Age* (Cambridge, MA: International Physicians Press, 1992), 117-120.
 23. Thompson, “Radiological Risk at Nuclear Fuel Reprocessing Plants,” 48 (ссылка 1).
 24. IAEA, “Use of Probabilistic Safety Assessment for Nuclear Installations with Large Inventory of Radioactive Material,” Report of a Technical Committee Meeting held in Vienna 7-11 September 1992, International Atomic Energy Agency, 1993.
 25. Не имеется ни одной публично доступной вероятностной оценки безопасности (PSA) любого перерабатывающего предприятия или хранилища отходов в Южной Азии, и мы не можем представить никакого исследования вероятности такого взрыва на любом таком предприятии. Нельзя провести такую оценку без доступа к большому объему подробной информации как конструкции установок, так и по наблюдаемым частотам появления различных типов неисправностей или ошибок; такая информация просто публично недоступна.
 26. M. V. Ramana, “Beyond Our Imagination: Fukushima and the Problem of Assessing Risk,” *Bulletin of the Atomic Scientists*, 19 April 2011; Suvrat Raju, “Estimating the Frequency of Nuclear Accidents,” *Science & Global Security*, 24 (2011): 37-62; Thompson, “Radiological Risk at Nuclear Fuel Reprocessing Plants.” (ссылка 1)
 27. При радиоллизе высокоактивных отходов образуется водород, который может стать взрывоопасным, когда его концентрация в воздухе превзойдет определенный предел. Применяемые меры обеспечения безопасности направлены на поддержание концентрации водорода ниже опасных пределов. V.Venkat Raj, K.A. Pendharkar, and R.S. Soni, “Back End Nuclear Fuel Cycle Facilities: Safety and Radiological Protection Aspects,” in *Nuclear Fuel Cycle Technologies: Closing the Fuel Cycle (INSAC-2003)* (Kalpakam: Indian Nuclear Society, 2003), IT-21/7.
 28. Chitra Subramanian, V.K. Sharma, and Vijay Zade, “A Review of the Safety Aspects of Waste Tank Farm-P3A, Kalpakam,” *Radiation Protection and Environment*, 33 (2010): 140-42.
 29. Там же.
 30. NEA, “The Safety of the Nuclear Fuel Cycle” (Paris: OECD Nuclear Energy Agency, 2005), 166.
 31. Perkins, Durant, and Dexter, “Potential Safety-Related Incidents with Possible Applicability to a Nuclear Fuel Reprocessing Plant,” 186. (ссылка 1)
 32. M.I. Avramenko et al., “Radiation Accident of 1957 and Eastern-Urals Radioactive Trace: Analysis of Measurement Data and Laboratory Experiments,” *Atmospheric Environment*, 34 (2000): 1215-23, doi:10.1016/S1352-2310(99)00303-9.
 33. Asker Aarkrog, “Inventory of Nuclear Releases in the World,” in *Radioecology and the Restoration of Radioactive-Contaminated Sites*, ed. Felix F. Luykx and Martin J. Frissel, NATO ASI Series 13 (Dordrecht: Springer Netherlands, 1996), 31-43, http://link.springer.com/chapter/10.1007/978-94-009-0301-2_3.
 34. Thomas B. Cochran, Robert S. Norris, and Oleg A. Bukharin, *Making the Russian Bomb: From Stalin to Yeltsin* (Boulder: Westview Press, 1995).
 35. M.I. Avramenko et al., “Radiation Accident of 1957 and Eastern-Urals Radioactive Trace: Analysis of Measurement Data and Laboratory Experiments,” *Atmospheric Environment*, 34 (2000): 1220, doi:10.1016/S1352-2310(99)00303-9.
 36. NRPA, “The Kyshtym Accident, 29th September 1957,” Norwegian Radiation Protection Authority, September 2007.
 37. V.A. Kostyuchenko and L.Yu. Krestinina, “Long-Term Irradiation Effects in the Population Evacuated from the East-Urals Radioactive Trace Area,” *Science of The Total Environment*, 142 (1994): 119-25, doi:10.1016/0048-9697(94)90080-9.
 38. Avramenko et al., “Radiation Accident of 1957 and Eastern-Urals Radioactive Trace.” (ссылка 32)
 39. Там же.
 40. Там же; Todd, “Spent Nuclear Fuel Reprocessing.” (ссылка 14)
 41. G.T. Sheppard and J.B. Taylor, “The Safety Case for the Thermal Oxide Reprocessing Plant at Sellafield,” in “Use of Probabilistic Safety Assessment for Nuclear Installations with Large Inventory of Radioactive Material: Report of a Technical Committee Meeting Held in Vienna 7-11 September 1992,” International Atomic Energy Agency, 1993, 59-78.
 42. Vinod Mubayi et al., “Risk Assessment of Red Oil Excursions in the MOX Facility,” Brookhaven National Laboratory, May 2009, 3-1.

43. T. G. Srinivasan and P. R. Vasudeva Rao, "Red Oil Excursions: A Review," *Separation Science and Technology*, 49 (2014): 2315, doi:[10.1080/01496395.2014.928321](https://doi.org/10.1080/01496395.2014.928321).
44. G.S. Nichols, "Decomposition of the Tri Butyl Phosphate-Nitrate Complexes," E.I. du Pont de Nemours & Co., Savannah River Laboratory, 1960, 4.
45. Velayuthan Sreekantan Smitha et al., "Reactive Thermal Hazards of Tributyl Phosphate with Nitric Acid," *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 51 (2012): 7205-10, doi:[10.1021/ie300595e](https://doi.org/10.1021/ie300595e).
46. Pamela L. Gordon, Charles O'Dell, and John G. Watkin, "Synthesis and Energetic Content of Red Oil," *Journal of Hazardous Materials*, 39 (1994): 87-105.
47. Biplab Das, P. Mondal, and Shekhar Kumar, "Evaluation of Fire and Explosion Hazards in Typical Nuclear Recycling Plants," *Journal of Chemical Health and Safety*, 20 (2013):10-16, doi:[10.1016/j.jchas.2013.04.001](https://doi.org/10.1016/j.jchas.2013.04.001).
48. Randall N. Robinson, David M. Gutowski, and William Yeniscavich, "Control of Red Oil Explosions in Defense Nuclear Facilities," Defense Nuclear Facilities Safety Board, 2003, 2-1.
49. W.S. Durant, "Red Oil Explosions at the Savannah River Plant," Savannah River Laboratory, 1983.
50. NEI, "Explosion at Tomsk 7," *Nuclear Engineering International*, June 1993.
51. Резервуар снабжен паровым устройством нагрева и охлаждения и оборудован несколькими датчиками для контроля процесса.
52. IAEA, "The Radiological Accident in the Reprocessing Plant at Tomsk," International Atomic Energy Agency, 1998, 5, <http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PubDetails.asp?pubId=5726>.
53. Там же, 19-20.
54. Там же, 20-21.
55. D.F. Paddleford and H.K. Fauske, "Safe Venting of Red Oil Runaway Reactions," Westinghouse Savannah River Company, 1994, 3.
56. IAEA, "The Radiological Accident in the Reprocessing Plant at Tomsk," 19, 22 (ссылка 52).
57. V. N. Usachev and G. S. Markov, "Incidents Caused by Red Oil Phenomena at Semi-Scale and Industrial Radiochemical Units," *Radiochemistry*, 45 (2003): 3-4, doi:[10.1023/A:1022353014980](https://doi.org/10.1023/A:1022353014980).
58. M.L. Hyder, "Safe Conditions for Contacting Nitric Acid or Nitrates with Tri-NButyl Phosphate (TBP)," Westinghouse Savannah River Company, 1994, 7.
59. V.N. Mineev and A. V. Mineev, "Accident at Siberian Chemical Complex in Tomsk-7 on 6 April 1993," in WM '97 Conference, Tucson, AZ, 6 March, 1997, <http://www.wmsym.org/archives/1997/sess36/36-09.htm>.
60. E. A. Rodriguez and R. F. Davidson, "Tomsk-7 Radiochemical Facility Explosion: Chemical Vessel Burst Failure Analysis," Los Alamos National Laboratory, 1995, http://www.gnallc.com/pdfs_r/FM%2003%20PV%2004%20LA-UR-95-1756.pdf
61. Paddleford and Fauske, "Safe Venting of Red Oil Runaway Reactions." (ссылка 55)
62. Dieter Berg, "Radionuclides in the Environment," in *Man-Made and Natural Radioactivity in Environmental Pollution and Radiochronology*, ed. Richard Tykva and Dieter Berg, Environmental Pollution 7 (Dordrecht: Springer Netherlands, 2004), 89, http://link.springer.com/chapter/10.1007/978-94-017-0496-0_2.
63. A. R Sundararajan, K. S Parthasarathy, and S. Sinha, eds., *Atomic Energy Regulatory Board: 25 Years of Safety Regulation* (Mumbai: Atomic Energy Regulatory Board, 2008), 122.
64. T. S Subramanian, "Fuelling Power," *Frontline*, 29 March 2002.
65. B. Narasimha Murty et al., "Determination of Percentage Saturation of Uranium in TBP Samples from Uranium Extraction Plant," *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 247 (2001): 329-34, doi:[10.1023/A:1006753618076](https://doi.org/10.1023/A:1006753618076).
66. AERB, "Annual Report 2003-2004" (Mumbai: Atomic Energy Regulatory Board, 2004), 60.
67. Sundararajan, Parthasarathy, and Sinha, *Atomic Energy Regulatory Board: 25 Years of Safety Regulation*, 122 (ссылка 63).
68. Pranay Kumar Sinha et al., "Thermal Decomposition of Reversed TALSPEAK Solvent," *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 290 (2011): 667-74, doi:[10.1007/s10967-011-1346-x](https://doi.org/10.1007/s10967-011-1346-x); Shekhar Kumar et al., "Thermal Decomposition of Red-Oil/nitric Acid Mixtures in Adiabatic Conditions," *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 289 (2011): 545-49, doi:[10.1007/s10967-011-1106-y](https://doi.org/10.1007/s10967-011-1106-y); Velayuthan Sreekantan Smitha et al., "Thermal Behavior Pattern of Tributyl Phosphate under Adiabatic Conditions," *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 111 (2013): 84956, doi:[10.1007/s10973-012-2197-6](https://doi.org/10.1007/s10973-012-2197-6); Smitha et al., "Reactive Thermal Hazards of Tributyl Phosphate with Nitric Acid" (ссылка 45); Biplab Das et al., "Synthesis and Characterization of Red-Oil from Tri Iso-Amyl Phosphate/n-Dodecane/nitric Acid Mixtures at Elevated Temperature," *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 292 (2012): 1161-71, doi:[10.1007/s10967-012-1671-8](https://doi.org/10.1007/s10967-012-1671-8); Das, Mondal, and Kumar, "Evaluation of Fire and Explosion Hazards in Typical Nuclear Recycling Plants"

- (ссылка47); Lalit K. Patil et al., "Thermal Decomposition of Nitrated Tri-N-Butyl Phosphate in a Flow Reactor," *ISRN Chemical Engineering*, 2012 (2012): 1-9.
69. IGCAR, "Synthesis of Red-Oil and Related Studies," *Indira Gandhi Centre for Atomic Research*, 2010, <http://www.igcar.ernet.in/benchmark/science/52-sci.pdf>.
 70. Smitha et al., "Reactive Thermal Hazards of Tributyl Phosphate with Nitric Acid," 7205 (ссылка 45).
 71. Srinivasan and Rao, "Red Oil Excursions," 2327 (ссылка 43).
 72. David R. Lide, ed., *CRC Handbook Chemistry and Physics, 85th Edition* (CRC Press, 2004); David Anthony James Rand and Ronald Dell, *Hydrogen Energy: Challenges and Prospects* (Royal Society of Chemistry, 2007).
 73. Bert-G. Brodda, Siegfried Dix, and Erich R. Merz, "Radiolytic Gas Formation in High-Level Liquid Waste Solutions," *The Analyst*, 114 (1989): 335.
 74. F. Depisch and A. Korinny, "Safety of Nuclear Fuel Cycle Facilities" (TC training course on developing long range NE strategies, Argonne, IL, 14 August 2011), http://www.iaea.org/INPRO/activities/TC_on_Long-range_planning/presentations/NEW_SAFETY_OF_NF_CF_AD_rev_FD.pdf; IAEA, "Safety of and Regulations for Nuclear Fuel Cycle Facilities," International Atomic Energy Agency, 2001, 9. Предполагалось, что присутствие ионов палладия в растворе может катализировать реакции, поглощающие водород. Смотрите Takashi Kodama et al., "Study on the Behavior of Radiolytically Produced Hydrogen in a High-Level Liquid Waste Tank of a Reprocessing Plant: Hydrogen Consumption Reaction Catalyzed by Pd Ions in the Simulated Solution," *Nuclear Technology*, 172 (2010): 77-87, doi:10.13182/NT09-90. Однако, продолжают опасаться потенциального накопления водорода в резервуарах для отходов переработки, в том числе и в Калпаккаме. Смотрите Chitra Subramanian, V.K. Sharma, and Vijay Zade, "A Review of the Safety Aspects of Waste Tank Farm-P3A, Kalpakkam," *Radiation Protection and Environment*, 33 (2010): 140-42.
 75. Dan G. Cacuci, ed., *Handbook of Nuclear Engineering* (New York, NY: Springer Science & Business Media, 2010), 584.
 76. Benedict, Pigford, and Levi, *Nuclear Chemical Engineering*, 577 (ссылка 18).
 77. Brodda, Dix, and Merz, "Radiolytic Gas Formation in High-Level Liquid Waste Solutions." (ссылка 73)
 78. AP, "New Explosion Threat Seen at Nuclear Plant," *The New York Times*, 25 March 1990, sec. U.S., <http://www.nytimes.com/1990/03/25/us/new-explosion-threat-seen-at-nuclear-plant.html>; Huetal., *Plutonium: Deadly Gold of the Nuclear Age*, 102-103 (ссылка 22).
 79. Nuclear Decommissioning Authority, "Shaft Explosion," <http://www.dounreay.com/UserFiles/File/Project%20profiles/DSRL%20PR%20PP-081a%20shaft%20explosion.pdf>
 80. Auslan Cramb, *Fragile Land: Scotland's Environment* (Edinburgh University Press, 1998); Malcolm Grimston, "Leukemia and Nuclear Establishments: Fifteen Years of Research," in *Advances in Nuclear Science and Technology*, ed. Jeffery Lewins and Martin Becker (Springer, 1999), 1-20.
 81. WISE, "Possible Toxic Effects from the Nuclear Reprocessing Plants at Sellafield and Cap de La Hague," Scientific and Technological Options Assessment, European Parliament, November 2001, 112.
 82. Staff, "Siting of Fuel Reprocessing Plants and Waste Management Facilities," Oak Ridge National Laboratory, 1970, 8-92.
 83. Там же.
 84. "Pressure and Boiling Points of Water," The Engineering ToolBox, http://www.engineeringtoolbox.com/boiling-point-water-d_926.html.
 85. Paddleford and Fauske, "Safe Venting of Red Oil Runaway Reactions," 8 (ссылка 55).
 86. M.L. Hyder, "Safe Handling of TBP and Nitrates in the Nuclear Process Industry (U)," Westinghouse Savannah River Company, 1994, 10.
 87. H.D. Harmon et al., "Behavior of Tributyl Phosphate in A-Line Processes," E. I. Du Pont De Nemours & Co., 1976, <http://www.osti.gov/bridge/servlets/purl/7340364-bNDsCB/7340364.pdf>.
 88. Usachev and Markov, "Incidents Caused by Red Oil Phenomena at Semi-Scale and Industrial Radiochemical Units." (ссылка 57)
 89. Kalyan Ray, "First N-Fuel Recycling Plant Soon in Tarapur," *Deccan Herald*, 25 November 2012, www.deccanherald.com/content/294272/first-n-fuel-recycling-plant.html; DAE, "Annual Report 2012-2013," Department of Atomic Energy, 2013, 63; DAE, "Annual Report 2013-2014," Department of Atomic Energy, 2014, 60.
 90. DAE, "Annual Report 2012-2013," 63; DAE, "Annual Report 2013-2014," 60.
 91. DAE, "Performance Budget 1985-86," Department of Atomic Energy, 1986, 39.
 92. Mark Hibbs, "DAE Reprocessing Program Remains Modest in Scope," *Nuclear Fuel*, 28 (2003): 9.

93. DAE, "Performance Budget 1999-2000," Department of Atomic Energy, 2000, 25.
94. DAE, "Kalpakam Reprocessing Plant: Information Capsule," Department of Atomic Energy, BARC Facilities, 1996. В других публикациях DAE приводятся несколько иные цифры, но мы используем значения, приведенные в информационном бюллетене, опубликованном DAE незадолго до ввода перерабатывающего завода в Калпаккаме (KARP) в строй.
95. A. N. Prasad, "Spent Fuel Reprocessing-A Technology at Cross Roads," in *Seminar on Indian Reprocessing – 1996* (Kalpakam: Project KARP, BARC Facilities, 1996), 18.
96. Divya Chandrababu, "President Opens Nuclear Waste Immobilization Plant at Kalpakam," *The Times of India*, 16 November 2013, http://articles.timesofindia.indiatimes.com/2013-11-16/india/44137874_1_nuclear-waste-radioactive-waste-fission-products.
97. Например, в октябре 2014 года директор Атомного исследовательского центра Баба (BARC) объявил, что Центр Баба «сможет производить все стержни, необходимые для критичности Прототипа реактора-размножителя на быстрых нейтронах PFBR». SekharBasu, "Founder's Day Address 2014," Bhabha Atomic Research Centre, 30 October 2014, <http://www.barc.gov.in/presentations/fdir14.pdf>. Ввод реактора PFBR в строй сильно запаздывал, и неофициально предполагалась возможность того, что эта задержка была связана с отсутствием плутония; данное объявление предлагает официальное подтверждение такой возможности. Если это верно, и нужное количество плутония, необходимое для производства первой плутониевой активной зоны стало доступным только в 2013 или 2014 годах, то тогда перерабатывающие заводы в Тарапуре и Калпаккаме должны были работать довольно неэффективно.
98. P. K Dey and N. K Bansal, "Spent Fuel Reprocessing: A Vital Link in Indian Nuclear Power Program," *Nuclear Engineering and Design*, 236 (2006): 727.
99. В проекте завода ядерного топлива в Барнуэлле, Соединенные Штаты, резервуары высокоактивных отходов проектировались с запасом 10% по высоте заполнения. Смотрите Benedict, Pigford, and Levi, *Nuclear Chemical Engineering*, 577 (ссылка 18).
100. В проекте завода в Барнуэлле отходы от отработавшего топлива, охлаждаемые от 150 суток до одного года, согласно оценкам, уменьшались в объеме до 50% из-за испарения внутри резервуара. Смотрите Benedict, Pigford, and Levi, *Nuclear Chemical Engineering*, 577 (ссылка 18). Поскольку отработавшее топливо, перерабатываемое на заводе KARP, имеет меньшую степень выгорания по сравнению с отработавшим топливом на реакторах с легкой водой и охлаждалось перед переработкой в течение более длительного периода времени, мы предполагаем меньшую скорость испарения. Мы также предполагаем, что в действительности к смеси не добавлялось никакой воды для поддержания постоянного объема. Отметим, что это предположение также приводит к увеличению концентрации азотной кислоты.
101. ArtiMhatre, V.K. Sharma, and Umadevi, "Radiological Consequence of Rupture of a High Level Waste Storage Tank at Additional Waste Tank Farm-Tarapur," *Radiation Protection and Environment*, 33 (2010): 116.
102. Поглощенная воздушная доза в Чернобыле «была получена от гамма-излучения цезия-134 и цезия-137» во времена, большие одного года после аварии. Смотрите UNSCEAR, "Sources and Effects of Ionizing Radiation: UNSCEAR 2000 Report to the General Assembly, with Scientific Annexes," United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, United Nations, 2000, Annex J, 477. Для рассматриваемого нами сценария резервуара с отходами все короткоживущие радионуклиды, которые вносили вклад в случае Чернобыля в радиационную дозу в течение первого года, уже распадутся.
103. Dey and Bansal, "Spent Fuel Reprocessing: A Vital Link in Indian Nuclear Power Program," 725 (ссылка 98).
104. Rawat et al., "Evaluation of a Supported Liquid Membrane Containing a Macrocyclic Ionophore for Selective Removal of Strontium from Nuclear Waste Solution," 83 (ссылка 17).
105. DAE, "Annual Report 2010-2011," Department of Atomic Energy, 2011, 90.
106. Westinghouse, "Overview of 'Red Oil' Frequency Analyses for F-Canyon," Westinghouse Savannah River Company, 1995, A-6, C-7.
107. Robinson, Gutowski, and Yeniscavich, "Control of Red Oil Explosions in Defense Nuclear Facilities," 1-1 (ссылка 48).
108. C.P. Kaushik et al., "Barium Borosilicate Glass—a Potential Matrix for Immobilization of Sulfate Bearing High-Level Radioactive Liquid Waste," *Journal of Nuclear Materials*, 358 (2006): 131, doi:10.1016/j.jnucmat.2006.07.004.
109. Из-за ожидания того, что любой сценарий аварии будет включать в себя неоднородность температуры, мы не пытались оценить время, необходимое для нагрева красного нейтрального масла до 130 °C или выше.

110. Subramanian, Sharma, and Zade, "A Review of the Safety Aspects of Waste Tank Farm- P3A, Kalpakam." (ссылка 28). Этот результат легко воспроизвести, если известна концентрация различных продуктов деления в высокоактивных отходах. Скорость радиолитической генерации водорода в растворе задается произведением эмпирически определенного множителя, называемого коэффициентом g , который представляет собой количество молекул водорода, образующегося при поглощении энергии излучения в 100 электронвольт, и энергии, полученной при распадах различных радиоактивных продуктов деления в высокоактивных отходах. N. E. Bibler et al., "Measurement and Prediction of Radiolytic Hydrogen Production in Defense Waste Processing Slurries at Savannah River Site," in WM '07 Conference, Tucson, AZ, 25 February 2007.
111. Хотя существуют намного более сложные и эмпирически более надежные методы для исследования взрывов водорода, они далеко выходят за границы данной статьи. Смотрите, например, C. J. Lea and H. S. Ledin, "A Review of the State-of-the-Art in Gas Explosion Modelling," Harpur Hill, Buxton, United Kingdom: Health and Safety Laboratory, 2002.
112. A.R. Soman and G. Sundararaj, "Consequence Assessment of Vapour Cloud Explosion Involving Hydrogen Release," *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*, 2 (2012).
113. Отметим, что эта оценка частично зависит от предположения о том, что испаряется всего лишь около 10% объема высокоактивных отходов. В действительности, если только резервуары не будут регулярно доливать, испарение будет непрерывно уменьшать объем высокоактивных отходов в резервуаре, освобождая больший объем для накопления водорода. Чем больше будет количество накопленного водорода, тем больше будет энергия взрыва.
114. Paddleford and Fauske, "Safe Venting of Red Oil Runaway Reactions," 8 (ссылка 55).
115. Pranesh Sengupta, "A Review on Immobilization of Phosphate Containing High Level Nuclear Wastes within Glass Matrix—Present Status and Future Challenges," *Journal of Hazardous Materials*, 235-236 (2012): 17-28, doi:10.1016/j.jhazmat.2012.07.039.
116. Thompson, "Radiological Risk at Nuclear Fuel Reprocessing Plants," 48 (ссылка 1).
117. R.R. Draxler and G.D. Rolph, "HYSPLIT (HYbrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory) Model," NOAA ARL READY Website, 2013, <http://www.arl.noaa.gov/HYSPLIT.php>.
118. Полное описание программного обеспечения и руководство пользователя доступно по адресу <https://ready.arl.noaa.gov/HYSPLIT.php>
119. Это скорость осаждения и ее значение согласуется с другими оценками. Смотрите, например, Masanori Takeyasu and Shuichi Sumiya, "Estimation of Dry Deposition Velocities of Radionuclides Released by the Accident at the Fukushima Dai-Ichi Nuclear Power Plant," *Progress in Nuclear Science and Technology*, 4 (2014): 64-67.
120. Конечно, некоторая доля выброшенных радионуклидов останется в воздухе и после 140 часов, но, поскольку нам прежде всего интересно оценить региональные уровни загрязнения, слежение за фон-таном в течение 140 часов адекватно нашим целям.
121. В качестве заключения мы отметим, что статистическую значимость конкретного образца выпадения не так то легко рассчитать. Розы ветров в этой области сильно меняются год от года, и никакой образец нельзя считать типичным. Смотрите Sardar Maran and R. Ponnusamy, "Wind Power Density Estimation Using Meteorological Tower Data," *International Journal of Renewable and Sustainable Energy*, 2 (2013): 110, doi:10.11648/j.ijrse.20130203.15.
122. Golikov, V., M. Balonov, and P. Jacob, "External Exposure of the Population Living in Areas of Russia Contaminated due to the Chernobyl Accident," *Radiation and Environmental Biophysics*, 41 (September 2002): 185-93. doi:10.1007/s00411-002-0167-2. Отметим, что в других статьях предлагаются другие несколько отличающиеся формы и коэффициенты.
123. Yu, C., J.-J. Cheng, S. Kamboj, S. Domotor, and A. Wallo, "Preliminary Report on Operational Guidelines Developed for Use in Emergency Preparedness and Response to a Radiological Dispersal Device Incident," Argonne National Laboratory, 15 December 2006. http://www.evs.anl.gov/resrad/documents/oqt_manual_doe_hs_0001_2_24_2009c.pdf. Отметим, что эта кривая включает коэффициент 0,82 для учета неровности земной поверхности.
124. Смотрите, например, Golikov, V., M. Balonov, and P. Jacob, "External Exposure of the Population Living in Areas of Russia Contaminated due to the Chernobyl Accident"; UNSCEAR, "Sources and Effects of Ionizing Radiation": UNSCEAR 2000 Report to the General Assembly, with Scientific Annexes," United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation 2000, 28.
125. Paul, A. C., T. Velayudhan, P. M. B. Pillai, C. G. Maniyan, and K. C. Pillai, "Radiation Exposure at the High

- Background Area at Manavalakurichi – The Changing Trends,” *Journal of Environmental Radioactivity*, 22 (1994): 243-50. doi:10.1016/0265-931X(94)90084-1.
126. Von Hippel, Frank, and Michael Schoeppner, “Reducing the Danger of Spent Fuel Pool Fires.” *Science & Global Security*, 24 (2016): 141-172.
127. Synergy Enviro Engineers, “Wind Speed in Chennai, Tamil Nadu, India,” 2011. http://www.synergyenviro.com/tools/wind_data.asp?loc=Chennai%2CTamil+Nadu%2CIndia.
128. UNSCEAR, “Sources, Effects, and Risks of Ionizing Radiation: UNSCEAR 2013 Report to the General Assembly with Scientific Annexes.” United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation 2014, 198.
129. National Research Council, *Health Risks from Exposure to Low Levels of Ionizing Radiation”: BEIR VII, Phase 2* (Washington, D.C.: National Academies Press, 2006), 15, <http://www.loc.gov/catdir/toc/ecip066/2006000279.html>.
130. Mark P. Little et al., “Systematic Review and Meta-Analysis of Circulatory Disease from Exposure to Low-Level Ionizing Radiation and Estimates of Potential Population Mortality Risks,” *Environmental Health Perspectives*, 120 (2012): 1503-11, doi:10.1289/ehp.1204982.
131. Использование термина наилучшего случая не означает, что невозможно представить себе сценарии еще более худших случаев.
132. Lee Ben Clarke, *Worst Cases: Terror and Catastrophe in the Popular Imagination* (Chicago: University of Chicago Press, 2006).
133. Swati Das, “BARC Admits Radiation over-Exposure in Kalpakkam,” *Times of India*, 7 August 2003.
134. Ashwin Kumar and M. V. Ramana, “Nuclear Safety in India: Theoretical Perspectives and Empirical Evidence,” *OUCIP Journal of International Studies*, 1 (December 2013): 49-72.
135. UNSCEAR, “Sources and Effects of Ionizing Radiation”: UNSCEAR 2000 Report to the General Assembly, with Scientific Annexes,” 462.