

СОКРАЩЕНИЕ ОПАСНОСТИ ПОЖАРОВ В БАСЕЙНАХ ОТРАБОТАВШЕГО ТОПЛИВА

Фрэнк Н. фонХиппель и Майкл Шеппнер

АННОТАЦИЯ

В данной статье рассматривается сценарий пожара отработавшего топлива, который чуть было не произошел на Фукусиме в марте 2011 года; показано, что если бы ветер перенес выброшенную радиоактивность в направлении Токио, то могло бы потребоваться перемещение 35 миллионов человек. В ней также рассматриваются результаты исследования Комиссии по ядерному регулированию США 2013 года, показавшие, что последствия события с потерей воды могут быть значительно сокращены, если переместить отработавшее топливо в сухое хранилище после пяти лет охлаждения в бассейне, но что вероятность пожара в бассейне с отработавшим топливом слишком мала, чтобы сделать такую операцию обязательной. Наши расчеты рассеяния в атмосфере и выпадения, использовавшие программу HYSPLIT для гипотетических выбросов на электростанции Пич Боттом в Пенсильвании, показали, что средние запрещенные области и популяции, требующие перемещения, превышают оценки Комиссии по ядерному регулированию США, представленные Национальной академией наук США (NAS) и поддерживают обнаружение NAS ошибок и пропусков в расчетах расходов и выгоды Комиссией по ядерному регулированию. Политическое давление промышленности на Комиссию по ядерному регулированию может смещать результаты ее анализов в сторону регулятивного бездействия.

Фрэнк Н. фон Хиппель и Майкл Шеппнер работают в Программе по науке и всеобщей безопасности, Принстонский университет, Принстон, штат Нью Джерси, США

Почтовый адрес для корреспонденции: Frank N. von Hippel, Program on Science and Global Security, Princeton University, 221 Nassau Street, Princeton, NJ 08542, USA.

Адрес электронной почты: fvhippel@princeton.edu

Статья получена 12 июня 2016 года и принята к публикации 16 августа 2016 года.

ВВЕДЕНИЕ

Давно известно, что потеря воды из бассейна для отработавшего топлива атомной электростанции может привести к катастрофическим результатам. Плотная упаковка топлива в бассейнах Соединенных Штатов также вызывает долговременные опасения, поскольку в таких бассейнах содержится в несколько раз больше отработавшего топлива, чем было первоначально предусмотрено проектом. Это повышает вероятность того, что в случае потери охладителя отработавшее топливо нагреется, загорится и выбросит в атмосферу огромные количества цезия-137¹. Цезий-137 – это продукт деления с 30-летним периодом полураспада, испускающим при распаде гамма-лучи высокой энергии,² и основная составляющая радиоактивного загрязнения, заставлявшая проводить долгосрочную эвакуацию населения из больших площадей вокруг атомных электростанций в Чернобыле и Фукусиме Дай-ичи.

С начала 1980-х годов, Комиссия по ядерному регулированию США (NRC) неоднократно возвращалась к вопросу о том, нужно ли требовать от американских атомных электростанций перемещения старого и охлажденного отработавшего топлива в бассейнах в более безопасные сухие хранилища с воздушным охлаждением, или нет. Каждый раз Комиссия приходила к выводу, что авария с потерей воды настолько маловероятна, что нет необходимости требовать от владельцев атомных электростанций покупать дополнительные контейнеры.

Дискуссия, ставшая более интенсивной после нападений 11 сентября 2001 года (9/11), подняла воз-

возможность того, что атака террористов на атомную электростанцию может привести к повреждению бассейна отработавшего топлива. Внимание к этой проблеме снова усилилось после того, как во время аварии на Фукусиме оказалось, что возник пожар отработавшего топлива. После 11 сентября Конгресс дважды обращался к Национальной Академии наук (NAS) с просьбой рассмотреть эту проблему. Самый последний обзор, в котором участвовал один из авторов этой статьи (Фрэнк фон Хиппель), был опубликован в мае 2016 года. Данная статья базируется на этом обзоре³.

Когда персонал Комиссии по ядерному регулированию вернулся к теме пожара отработавшего топлива после аварии в Фукусиме в 2011 году, он обнаружил новый драматический аргумент для уменьшения количества отработавшего топлива в бассейнах. При аварии с потерей охладителя, в которой бассейн осушается сравнительно медленно, в бассейне с плотной упаковкой имеется вероятность взрыва водорода, а в бассейне с низкой плотностью упаковки она отсутствует. Поскольку взрыв водорода снесет стены и крышу, покрывающую бассейн, персонал обнаружил, что выброс цезия-137 в атмосферу от пожара в бассейне с плотной упаковкой будет почти полным, и примерно в сто раз большим, чем утечка от пожара в бассейне с упаковкой низкой плотности внутри нетронутого здания реактора. Выброс от пожара в бассейне с высокой плотностью будет настолько большим, что в среднем он потребует перемещения населения из района с площадью, большей, чем у штата Нью-Джерси (22 600 км²). Тем не менее, персонал еще раз пришел к выводу, что вероятность потери охладителя в бассейне для отработавшего топлива слишком мала для того, чтобы оправдать требование отхода от плотной упаковки. Однако, этот анализ не включал возможность терроризма и недооценил на порядок величины экономию расходов за счет уменьшения последствий аварии, к которому может привести упаковка с низкой плотностью.

Этот асимметричный подход может быть частично связан с тем фактом, что в последние десятилетия американские атомные электростанции оказывали на Комиссию по ядерному регулированию интенсивное политическое давление, как прямо, так и косвенно, через Конгресс. В то время как регулятивные органы, как во Франции, так и в Японии, заставили свои атомные электростанции реализовать улучшения безопасности после аварии в Фукусиме, стоившие сотни миллионов долларов на один реактор⁴, американские атомные электростанции сделали намного меньшие инвестиции. Они опасались, что более высокие затраты заставят их остановить многие из их электростанций, которые жестко конкурируют с ветровыми электростанциями и электростанциями на природном газе.

Ниже рассматривается сценарий пожара отработавшего топлива, который чуть было не произошел на Фукусиме. Затем обсуждается анализ персонала Комиссии по ядерному регулированию по затратам и выгодам от перехода на хранение в бассейнах с низкой плотностью, и политика ядерного регулирования в Соединенных Штатах.

ПОЖАР В БАСЕЙНЕ ДЛЯ ОТРАБОТАВШЕГО ТОПЛИВА, ЧУТЬ БЫЛО НЕ СЛУЧИВШИЙСЯ НА ФУКУСИМЕ

Великое землетрясение в Восточной Японии у северо-восточного побережья Японии произошло 11 марта 2011 года в 14:46 по японскому стандартному времени. Через пятьдесят минут цунами 13-метровой высоты обрушилось на атомную электростанцию Фукусима Дай-ичи и затопило фундаменты блоков 1-4, выведя из строя все их электрические распределительные щиты и почти все их системы охлаждения и аварийные системы. Поскольку системы охлаждения активной зоны блоков 1, 2 и 3 вышли из строя, вода в их реакторах выкипела и пар вступил в реакцию с горячим циркониевым сплавом (циркаллоем) оболочки их топливных элементов с образованием водорода. Давление в первичной герметичной железобетонной оболочке реакторов в блоках 1 и 3 поднялось до уровня, при котором болты, удерживающие верхнюю часть оболочек, растянулись и позволили водороду проникать в окружающие здания реактора. Через сутки после цунами взрыв водорода снес стены и крышу верхнего этажа здания реактора 1. Через двое суток аналогичный взрыв произошел в здании реактора 3. Активная зона реактора 2 также расплавилась, и его первичная герметичная оболочка протекла, но, возможно, в другом месте, и взрыва водорода не произошло.

К счастью, несмотря на утечку и взрывы, первичные герметичные оболочки и окружающие реактор здания блоков 1-3 перехватили около 98% их суммарных запасов радиоактивного цезия в активных зонах⁵.

Опасения возможности пожара в бассейне отработавшего топлива

Когда произошло землетрясение, блок реактора 4 был выключен на обслуживание в течение 102 су-

ток и все топливо из реактора было выгружено в его бассейн отработавшего топлива. Однако, через четверо суток после землетрясения произошел взрыв водорода на верхнем этаже здания реактора, где располагался бассейн отработавшего топлива⁶.

Поначалу эксперты по ядерной безопасности со всего мира предположили, что большая часть воды в бассейне для отработавшего топлива была потеряна, и, так же, как в активных зонах блоков 1 и 3, пар вступил в реакцию с горячей циркалоевой оболочкой экспонированного топлива с образованием водорода, образующего взрывоопасную смесь с воздухом над бассейном. Однако, через день после взрыва водорода, Токийская электроэнергетическая компания (TEPCO), японская компания, владеющая этой электростанцией, послала вертолет для проведения видеосъемки состояния бассейна, и убедилась после анализа видео, что вода все еще покрывает топливо в бассейне 4.⁷ Позднее компания TEPCO пришла к выводу, что водород проник в здание реактора 4 через систему сброса, объединенную с системой блока 3.⁸ Однако, еще более недели в операционном центре Комиссии ядерного регулирования США в пригороде Вашингтона имелись сомнения в том, что отработавшее топливо в бассейне 4 все еще было покрыто водой⁹.

В Японии премьер-министр Наото Кан спросил Сунсукэ Кондо, председателя японской Комиссии по атомной энергии, о возможных сценариях дальнейшего развития событий на Фукусиме. 25 марта Кондо ответил, что одним из возможных последствий может стать пожар отработавшего топлива¹⁰. Бассейны отработавшего топлива располагаются за пределами герметичных оболочек реактора, а взрывы водорода разрушили стены и крыши, окружающие бассейны блоков 1, 3 и 4. Поэтому пожары отработавшего топлива в любом из этих блоков выбросят радиоактивность непосредственно в атмосферу. Если пожар в бассейне 4 выбросит эквивалент цезия-137 в одной, или двух активных зонах реактора в атмосферу (в бассейне содержится эквивалент 2,4 активных зон), то может потребоваться обязательное переселение в радиусе 110–170 км и добровольное переселение в радиусе 200–250 км. Для своего заявления Кондо использовал уровни загрязнения цезием-137 в 1,5 МБк/м² (40 Ки/км²) и 1,5 МБк/м² (40 Ки/км²), которые использовались после аварии в Чернобыле для определения соответствующих границ областей обязательно отселения и строгого радиационного контроля¹¹. Через десятилетие после аварии в Чернобыле около половины резидентов последней области уехали из нее добровольно¹². Расстояние от атомной электростанции Фукусима Дай-ичи до центра Токио составляет примерно 225 км.

Катастрофа чуть-чуть не произошла

Хотя на атомной электростанции Фукусима Дай-ичи не произошло никакого пожара в бассейне с отработавшим топливом, через шесть месяцев после землетрясения компания TEPCO поняла, как близко была катастрофа.

Что почти не произошло в бассейне 4, можно понять из реконструкции событий компанией TEPCO и анализа сценария, опубликованного группой из Сандийской национальной лаборатории через год после аварии¹³.

Когда произошло землетрясение 11 марта 2011 года, в бассейне 4 для отработавшего топлива находилось 240 тонн урана (1 331 топливная сборка), в том числе полная активная зона (548 сборок), которая была извлечена из реактора после его выключения 30 ноября 2010 года. Запас цезия-137 в бассейне составлял примерно 900 ПБк (24 МКи)¹⁴.

Группа из Сандии рассчитала, что могло произойти, если бы воде в бассейне просто было бы позволено выкипеть в отсутствие стен и крыш над горячим бассейном, так, чтобы водяной пар мог быть унесен ветром, как из чайника с открытой крышкой. Это хорошее приближение к реальной ситуации, поскольку, как отмечалось ранее, через четыре дня после землетрясения взрыв водорода создал обстановку, почти приближающуюся к открытому воздуху над бассейном 4.

Глубина бассейна 4 для отработавшего топлива равнялась примерно 12 м, и до землетрясения она была заполнена водой на 11,5 метра, примерно на 7 м выше верхнего края рамы с отработавшим топливом. В сценарии Сандии теплота распада отработавшего топлива, примерно 2 МВт(тепл.), повысила бы температуру приблизительно 1 400 м³ воды в бассейне до точки кипения примерно за трое суток¹⁶. Когда температура воды будет приближаться к точке кипения, скорость его испарения будет возрастать до тех пор, пока охлаждение от испарения приблизительно не сбалансирует нагрев при температуре около 90 °С¹⁷. После этого средняя скорость понижения уровня воды из-за испарения составит примерно 0,67 м за сутки. Объем в бассейне над рамой с топливом составляет примерно 120 м³ на метр глубины. Скорость потери воды поэтому будет соответствовать испарению примерно 80 тонн воды в сутки, и уровень воды

понижится до 2 м от дна бассейна, открыв верхнюю половину хранящегося отработанного топлива 27 марта 2011 года, через 16 суток после землетрясения¹⁸. На этой стадии неконтролируемая экзотермическая реакция с горячей экспонированной циркалоевой оболочкой инициирует пожар отработавшего топлива.

Картина того, что произошло в действительности, была более сложной:

1. В своей реконструкции истории уровня воды в бассейне компания ТЕРСО оценила, что бассейн потерял около 1,5 метра глубины воды в результате пролива от действия землетрясения на бассейн и позднее из-за неравномерного избыточного давления от взрыва водорода. Это привело к сдвигу даты понижения уровня воды из-за кипения воды в бассейне до 2 м на двое суток ранее, до 25 марта.
2. Начиная с 22 марта, вода добавлялась в бассейн с помощью стрелы цементного насоса («жирафа»). По лучшим оценкам компании ТЕРСО, до 10 апреля было добавлено около 1 000 тонн воды (смотрите рисунок 1), что эквивалентно 12,5 суток испарения. Около 2 суток должно быть добавлено из-за того, что для нагрева добавленной воды до близкой к точке кипения температуры, требовалась энергия¹⁹. Это сместило дату достижения уровня 2 м примерно до 8 апреля.

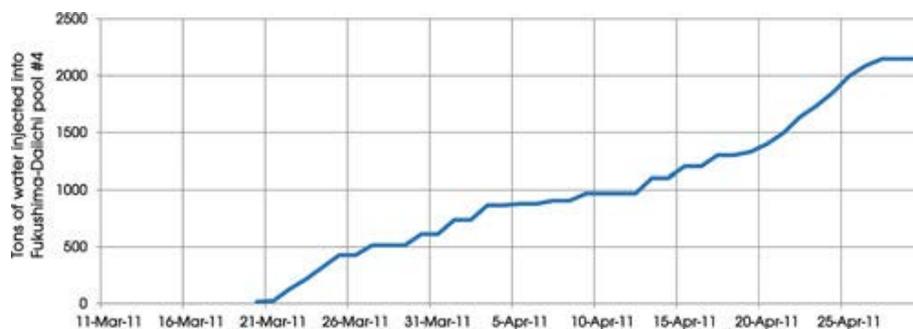


Рисунок 1. Оценка совокупного количества воды, поданной в бассейн 4, компанией ТЕРСО¹⁵. По горизонтальной оси отложена дата, по вертикальной – количество воды, поданной в бассейн 4 Фукусимы Дай-ичи (в тоннах).

Но почему, если, начиная с 22 марта, компания ТЕРСО могла эффективно доставлять воду в бассейн, она не смогла накачать достаточное количество, чтобы бассейн был полон? По-видимому, ответ состоит в том, что до 12 апреля, когда компания ТЕРСО подвесила измерительный инструмент и видеокамеру на стреле «жирафа», она не могла непосредственно измерять уровень воды в бассейне. Напротив, она ложно интерпретировала косвенные свидетельства для того, чтобы заключить, что она заполнила бассейн. Косвенное свидетельство состояло в том, что вода втекала в защищающий от переполнения бассейна резервуар²⁰. Однако, по всей видимости, некоторое количество воды, доставленной «жирафом», попадало непосредственно в защитный резервуар.

К счастью, был другой источник воды, который помогал покрыть отработавшее топливо. В результате 8 апреля вода в бассейне все еще была на 2,5 м выше верхнего края топлива (смотрите рисунок 2). Следовательно, в бассейне находилось на 5 метров больше воды, чем было рассчитано выше.

Источником дополнительной воды в бассейне с отработавшим топливом была утечка из колодца прилегающего реактора, который был заполнен водой для защиты рабочих от радиации, приходящей от открытого корпуса реактора под давлением, и он радиоактивных стальных компонентов реактора, хранящихся в ямы осушителя-сепаратора, которая является частью колодца реактора²³. Колодец реактора отделен от бассейна отработавшего топлива воротами. По-видимому, по мере того, как испарение понижало уровень воды в бассейне отработавшего топлива, утечка через ворота поддерживала воду в колодце реактора приблизительно на том же уровне, что и в бассейне²⁴. Компания ТЕРСО оценила, что на 12 апреля около 600 м³ воды вытекло из колодца реактора в бассейн с отработавшим топливом²⁵. Это подняло уровень воды в бассейне приблизительно до того уровня, который был измерен со стрелы «жирафа» 12 апреля.

Последствия пожара, который мог бы произойти

На рисунке 3 показаны предсказания сценария Сандия для температур на верхней и нижней сторонах

отработавшего топлива в отсутствие добавленной воды. Температура подводной части топлива должна быть равна примерно 90 °С. Однако, после того, как отработавшее топливо выйдет из-под воды, оно начнет нагреваться. В расчетах группы из Сандии температура верхней части топлива резко поднимется на семнадцатый день, после того, как она достигнет примерно 1 200 °С и начнется неконтролируемая реакция пара и циркаллоя, образующая тепло и водород. Было предсказано такое быстрое сгорание циркаллоевой оболочки, что группа из Сандии прекратила отслеживание температуры на верхнем крае топлива. Несколькими днями позже то же самое должно было произойти на нижнем крае топлива, но циркаллоой будет сгорать более медленно, возможно потому, что бассейн станет почти пустым и образование пара будет происходить с меньшей скоростью, что приведет к меньшей скорости реакции с горячим топливом.

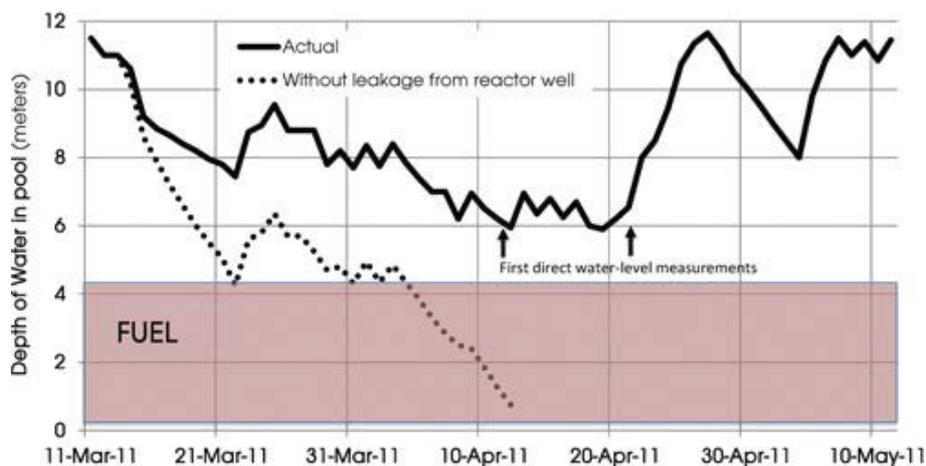


Рисунок 2. Сплошная линия: реконструкция компании ТЕРСО истории изменения уровня воды в бассейне 4 в течение двух месяцев после землетрясения²¹. Стрелки показывают первые реальные измерения, первое из которых было сделано 12 апреля, а второе – 22 апреля. Нижняя пунктирная кривая показывает оценку количества воды, которая находилась бы в бассейне в отсутствие притока воды в бассейн из колодца соседнего реактора, представленную в отчете Национальной академии наук²². По горизонтальной оси отложена дата, по вертикальной – глубина воды в бассейне в метрах.

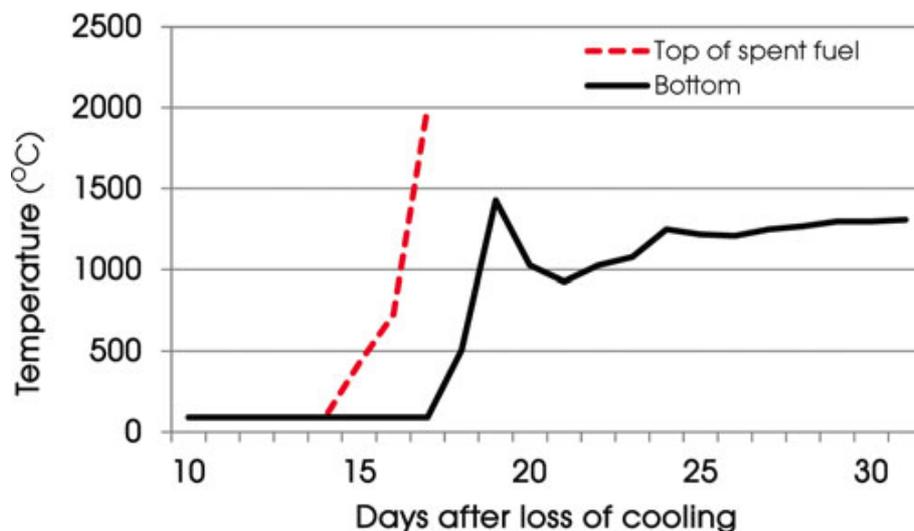


Рисунок 3. Температура отработавшего топлива в сценарии кипения воды в бассейне 4 группы из Сандии. После того, как секция топлива обнажится, локальная температура топлива будет подниматься, сначала из-за тепла от радиоактивного распада содержащихся продуктов деления, а затем, выше примерно 1200 °С, из-за окисления циркаллоевой оболочки паром с выделением водорода. Моделирование заканчивается через 32 суток, из-за того, что окисленное топливо и конструкция разрушатся на мелкие фрагменты²⁶. По горизонтальной оси отложены дни после потери охладителя, по вертикальной – температура в °С.

На рисунке 4 показана оценка долей суточных выбросов от запаса цезия-137 в бассейне 4 для отработавшего топлива в сценарии группы Сандии, с первым днем пожара, задержанного до 9 апреля добавлением 1 000 тонн воды компанией ТЕРСО. Расчеты группы Сандии предсказывают, что практически весь запас цезия-137 в бассейне был бы выброшен в атмосферу, в основном в течение первых четырех суток после открытия верхней половины топлива.

Для оценки последствий реализации такого сценария в бассейне 4 электростанции Фукусима Дай-ичи для Японии была рассчитано рассеяние выброса цезия-137 для исторических атмосферных условий весны 2011 года. Порог для эвакуации предполагался приблизительно равным уровню, принятому в Японии для аварии в Фукусиме, около 1 МБк/м² (27 Ки/км²)²⁷.

Перенос в атмосфере и выпадение цезия-137 от гипотетического пожара в бассейне для отработавшего топлива было рассчитано с помощью модели HYSPLIT Национальной администрации по океану и атмосфере США (NOAA)²⁸, в которой использовались метеорологические данные, архивированные в Системе ассимиляции глобальных данных NOAA²⁹.

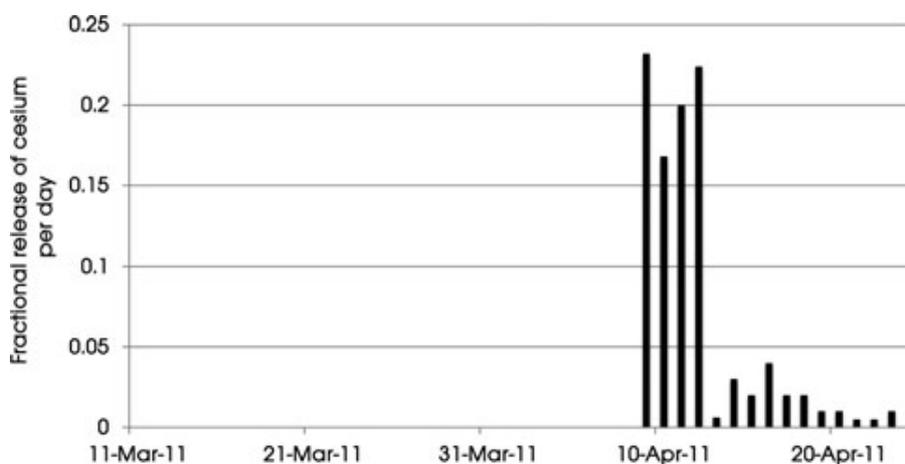


Рисунок 4. Доли суточных выбросов радиоактивного цезия-137 в атмосферу в сценарии кипения, задержанного добавлением 1 000 тонн воды компанией ТЕРСО³⁰. По горизонтальной оси отложены даты, по вертикальной – доли суточных выбросов цезия-137.

Были рассчитаны траектории султана для выбросов каждого дня в марте и апреле 2011 года. В течение большей части этого периода ветер дул в восточном направлении к Тихому океану, и над островной территорией Японии выпадала сравнительно малая часть цезия-137, хотя в абсолютном значении эта часть потенциально превышала сумму радиоактивных осадков от реальных расплавлений активных зон реакторов. Рисунок 4 показывает, что если бы не было утечки воды в бассейн для отработавшего топлива из колодца реактора, 9 апреля стало бы датой, в которую пожар отработавшего топлива начал выбрасывать цезий-137 в атмосферу. В этот день и в последующие дни ветры дули в основном на восток, и только 5% выброшенной активности выпало бы на японской земле, тогда как основная часть осадков выпала бы над Тихим океаном. Однако, если бы выброс начался 19 марта, ветер перенес бы большую часть цезия-137 в направлении Токио. На рисунке 5 слева направо показаны районы Японии, зараженные более, чем на 1 МБк/м² в результате реальной аварии, в которой было выброшено от 6 до 20 ПБк³¹, и гипотетическими 4-суточными выбросами 890 ПБк в пропорциях, показанных на рисунке 4, начиная с 9 апреля и 19 марта соответственно. Следует подчеркнуть, что сценарий 19 марта включен как близкий к максимуму правдоподобный сценарий для последствий пожара отработавшего топлива на Фукусиме. Учитывая, что цунами произошло 11 марта, пожар мог бы начаться 19 марта, только если бы землетрясение привело к утечке из бассейна 4³².

Даже выброс с доминирующими ветрами в восточном направлении привели бы к обязательной эвакуации 1,6 миллиона человек с площади в 4 300 км². Зона обязательной эвакуации показана в правой части рисунка 5, с ветрами, переносщими большие количества радиоактивности в направлении Токио; эта зона протянулась вниз вдоль восточного побережья острова Хонсю к Токио. Ее площадь в 31 000 км² занимает 8% японской суши. В этой зоне проживает двадцать семь процентов населения Японии, или тридцать пять миллионов человек.

Основными параметрами, определяющими уровень загрязнения земли, являются ветры во время выброса и после него, и предполагаемые скорости сухого и влажного выпадения. Скорость сухого выпадения аэрозолей зависит от его плотности и размера частиц. Для гипотетического пожара отработавшего топлива с выбросом около 1090 ПБк, Комиссия по ядерному регулированию рассчитала двухпиковое распределение частиц по размерам, в котором 74% активности группируется около средней скорости осаждения в 0,2 см/с, а остаток – около средней скорости осаждения в 2,8 см/с³⁴. Исследования чувствительности для скоростей сухого осаждения между 0,2 и 2,8 см/с и с влажным осаждением, или без него, показывают, что районы сильного загрязнения в данном сценарии в основном определяются влажным осаждением. Это согласуется с тем фактом, что для реальной аварии район высокого загрязнения к северо-западу от атомной электростанции Фукусима Дай-ичи, вероятно, был связан с дождем³⁵.

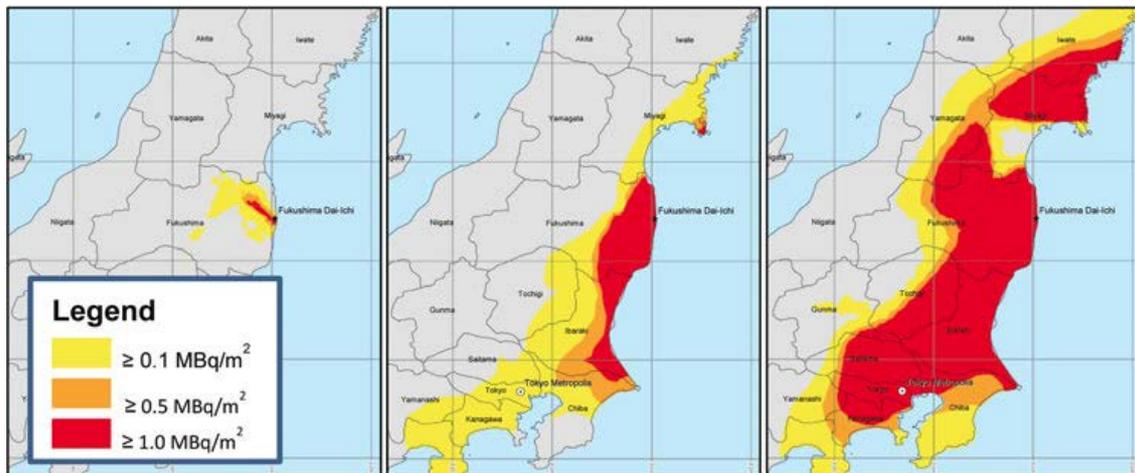


Рисунок 5. Слева: реальные уровни загрязнения после аварии Фукусима Дай-ичи³³. В середине: Уровни загрязнения после гипотетического пожара отработавшего топлива в бассейне 4, начиная, как по сценарию на рисунке 4, с 9 апреля 2011 года, когда ветер в основном дул в сторону моря. Справа: Уровни загрязнения после гипотетического пожара отработавшего топлива в бассейне 4, начиная с 19 марта 2011 года, когда ветер дул в сторону Токио. Этот сценарий мог физически реализоваться только при утечке в бассейне 4. Карты показывают уровни загрязнения цезием-137 с красными участками, загрязненными выше 1 МБк/м², что приводит к обязательной эвакуации в случае реальной аварии. Оранжевые участки загрязнены от 0,5 МБк/м² до 1 МБк/м², а желтые – от 0,1 МБк/м² до 0,5 МБк/м². Огромная разница между площадью участков, загрязненных более 1 МБк/м² на левом и правом рисунках объясняется тем, что разрушение крыши и окружающих бассейн 4 стен взрывом водорода позволило бы цезию-137 из бассейна непосредственно попасть в атмосферу. Напротив, из первичных герметичных оболочек реакторов 1–3 Фукусима Дай-ичи в среднем было выброшено около 2% цезия-137, содержащегося в их активных зонах.

Сухое и влажное осаждение со скоростью сухого осаждения в 0,2 см/с было рассчитано для интервала в семь суток после начала выброса. В соответствии с нашими расчетами к этому времени в сценарии для правой стороны рисунка 5 23% цезия-137 выпало на Японию, а большая часть остатка оказалась в Тихом океане.

СООБРАЖЕНИЯ КОМИССИИ ЯДЕРНОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ США ПО ПОВОДУ ОПАСНОСТИ ПЛОТНОЙ УПАКОВКИ В БАССЕЙНАХ ДЛЯ ОТРАБОТАВШЕГО ТОПЛИВА

Конгресс организовал Комиссию по ядерному регулированию в качестве независимого агентства в 1974 году, когда он распустил Комиссию по атомной энергии США, которая была ослаблена в политических аспектах многими противоречивыми действиями, пренебрегающими обоснованной обеспокоенностью общественности в отношении безопасности ее проектов.

Комиссия по атомной энергии надеялась доказать, что последствия аварии ядерного реактора не так плохи. Результаты ее первой попытки, «Теоретические возможности и последствия крупных аварий на больших ядерных электростанциях» (WASH-740) были опубликованы в 1957 году³⁶. Однако, критики обращали особое внимание на рассматриваемую в этом отчете аварию с наихудшим сценарием, а именно,

нереалистичный выброс в атмосферу 50% продуктов деления из активной зоны реактора мощностью в 500 МВт(эл.). Было оценено, что эта авария потребует долговременного переселения популяции из района площадью 700 квадратных миль (1 800 км²). Обновление WASH-740 было закончено в 1964 году, но ее сценарий наихудшего случая аварии был еще хуже, и обновление было представлено общественности только через десять лет, когда Комиссия по атомной энергии разваливалась³⁷. Комиссия по ядерному регулированию унаследовала рукопись третьей попытки отчета Комиссии по атомной энергии, WASH-1400, под простым названием «Исследование безопасности реакторов», RSS, в котором была сделана попытка систематически рассчитать вероятности аварий на ядерных реакторах в зависимости от серьезности их последствий.

Комиссия по ядерному регулированию опубликовала отчет «Исследование безопасности реакторов» в 1975 году. В основных положениях отчета в графической форме показано, что для ожидаемого парка в примерно 100 ядерных энергетических реакторов США вероятность того, что при аварии на реакторе атомной электростанции погибнет одна тысяча человек, на два порядка величины меньше, вероятность того, что при падении самолета или выбросе хлора будет убито то же самое количество людей, или на четыре порядка величины меньше, чем одна тысяча человек погибнет в США от землетрясения или торнадо. В отношении потери имущества в отчете указывается, что вероятность аварии с ущербом более 15 миллиардов долларов (60 миллиардов долларов в 2015 году) будет меньше, чем одна десятиллионная часть за год. В этом отчете пожары отработавшего топлива детально не рассматривались, но было заявлено, что «потенциальные выбросы малы по сравнению с выбросами, связанными с расплавом активной зоны»³⁸.

Тем не менее, критики считали, что отчет страдает серьезными недостатками, начиная с представления его результатов. В отчете основные сравнения с другими рисками производятся на базе ранних «мгновенных» смертельных исходов от высоких доз радиации. Но большая часть смертей от аварии ректора будет вызвано задержанными смертельными исходами раковых заболеваний. В самом деле, ни в аварии в Чернобыле, ни в аварии в Фукусиме не было ни одного мгновенного смертельного исхода от высоких доз радиации, в то время как ожидаемое количество смертельных исходов от рака в Чернобыле может измеряться десятками тысяч³⁹, а в Фукусиме – тысячами⁴⁰.

В отношении вероятностей аварий неопределенности предсказаний аварий с серьезными последствиями, согласно отчету, были порядка пяти. Однако, независимый анализ быстро выявил ключевые последовательности аварий, в которых неопределенности вероятностей были произвольно уменьшены на порядки величины⁴¹.

Вероятно, наибольший удар по доверию к отчету нанесла критика группы, организованной профессиональным сообществом американских физиков, Американским физическим обществом (APS)⁴².

Новый комитет Палаты представителей по наблюдению за Комиссией по ядерному регулированию обязал Комиссию по ядерному регулированию провести внешний анализ отчета, и Комиссия назначила комитет из семи человек, включая трех членов группы исследования Американского физического общества, среди которых был один из авторов данной статьи (Фрэнк фон Хиппель).

После анализа группа подтвердила критику отчета⁴³, и члены Комиссии по ядерному регулированию выпустили политическое заявление, а котором, с одной стороны, заявляется, что «Комиссия не рассматривает как надежные, численные оценки общего риска аварий реакторов в отчете «Исследование безопасности реакторов»», в то время как, с другой стороны, утверждает, что «Комиссия поддерживает расширенное применение вероятностных оценок риска в принятии регулятивных решений»⁴⁴.

Решение по американским бассейнам для отработавшего топлива с плотной упаковкой

В 1981 году ядерные электроэнергетические компании США отказались от своих планов по переработке отработавшего топлива для извлечения плутония. Экономика переработки основывалась на предположении, что плутоний, извлеченный из отработавшего топлива, будет продаваться по высокой цене для использования в пусковом топливе для плутониевых реакторов-размножителей с охлаждением жидким натрием, которые продвигались Комиссией по атомной энергии. Однако, администрация Картера пришла к выводу, что реакторы-размножители не смогут экономически конкурировать с существующими энергетическими реакторами с водяным охлаждением⁴⁵. Ядерные электроэнергетические компании США пришли к такому же выводу несколькими годами позже.

В результате, до тех пор, пока не найдется альтернативное расположение для отработавшего ядерного топлива энергетических реакторов, ядерные электроэнергетические компании США будут большей ча-

стью хранить свои накапливающиеся запасы на площадках своих реакторов.

Ядерные электроэнергетические компании нашли более дешевый способ предоставления дополнительного места для хранения отработавшего топлива: плотную упаковку своих бассейнов для вертикального хранения топливных сборок с очень небольшим пространством между ними в стойках индивидуальных стальных боксов. Для предотвращения возникновения критичности в плотно упакованном топливе стенки боксов покрываются листами содержащего материала, содержащего поглощающий нейтроны бор. Закрытые стойки заменили стойки с открытыми сторонами решетки, через которые свободно циркулировал воздух при потере воды из бассейна.

Плотная упаковка позволила ядерным электроэнергетическим компаниям примерно на 20 лет отложить время полного заполнения своих бассейнов. Кроме того, когда станет необходимо переместить топливо в сухие контейнеры для того, чтобы найти свободное место для вновь разгруженного горячего топлива, самое старое топливо в бассейне будет охлаждаться в течение дополнительных 20 лет, и в каждый сухой контейнер можно будет поместить больше топлива без превышения их предельной температуры⁴⁶.

Однако, в последующих десятилетиях безопасность бассейнов для отработавшего топлива с плотной упаковкой стала хроническим опасением для Комиссии по ядерному регулированию и исследовательских групп в национальных лабораториях Департамента энергетики, финансируемых ею⁴⁷:

- В 1984 году исследование в Сандии показало, что в осушенном бассейне может начаться пожар отработавшего топлива⁴⁸.
- В 1987 году исследование в Брукхейвенской национальной лаборатории показало, что такой пожар может привести к большому выбросу радиоактивности, и предложило несколько мероприятий по уменьшению риска, включая возвращение к упаковкам низкой плотности⁴⁹.
- Однако, в 1989 году исследование Комиссии по ядерному регулированию пришло к выводу, что, учитывая низкую вероятность пожара в бассейне с отработавшим топливом, стоимость каждого из предложенных мероприятий по уменьшению риска превысит его взвешенную по вероятности выгоду⁵⁰.
- В 2001 году исследование Комиссии по ядерному регулированию по вопросам безопасности на выведенных из строя ядерных реакторах пришло к выводу, что «возможность пожара циркония, приводящего к большому выбросу продуктов деления, не может быть исключена даже через много лет после окончательного выключения», но снова отметило, что «риск [определенный как произведение вероятности и последствий] мал из-за очень малой вероятности пожара циркония»⁵¹.

В 2003 году, вслед за атаками террористов 11 сентября 2001 года, группа внешних исследователей (Альварец и др.) рассмотрела вышеуказанные и другие отчеты и указала, что с учетом риска атак террористов и огромных потенциальных последствиях пожара в бассейне с отработавшим топливом, Комиссия по ядерному регулированию должна потребовать, чтобы американские бассейны для отработавшего топлива возвратились к упаковке малой плотности. Чтобы реализовать эту возможность, они предложили, чтобы отработавшее топливо перемещалось на хранение в сухих контейнерах после пяти лет охлаждения в бассейне⁵². Статья привлекла значительное внимание⁵³, и Конгресс потребовал от Комиссии по ядерному регулированию провести исследование. Исследование, проведенное Комиссией, рекомендовало провести больше исследований этого вопроса, но Комиссия даже это посчитала слишком критическим и задержала разрешение для открытой публикации отчета по исследованию Комиссии по ядерному регулированию на два года, поставив себя в противоречие между своей позицией, что риск пожара отработавшего топлива не существенен, и своей позицией в том, что отчет Комиссии по ядерному регулированию содержит информацию, которая может оказаться полезной для террористов⁵⁴.

В 2011 году после аварии в Фукусиме Комиссия по ядерному регулированию организовала оперативную группу «Накопленный опыт». Одним из появившихся исследований было изучение возможного требования того, чтобы американские ядерные электроэнергетические компании удаляли отработавшее топливо из бассейнов после пяти лет охлаждения. Идея отличалась от предложения Альвареца и др. в том, что Комиссия по ядерному регулированию не требовала замены закрытых стоек высокой плотности, но только удаления приблизительно 80% топлива, которое содержалось в них. Поэтому конвективное воздушное охлаждение отработавшего топлива в стойках не могло появиться до тех пор, пока бассейн не осушится настолько, чтобы открылись отверстия на дне стоек. Персонал Комиссии по ядерному регулированию назвал эту идею «срочным переносом» и в 2013 году представил членам Комиссии ее регулятивный ана-

лиз⁵⁵.

Этот анализ построен на базе исследования персоналом Комиссии по ядерному регулированию (NUREG-2161) последствий аварий с потерей воды из бассейнов с отработавшим топливом типа аварии в Фукусиме. Специфическим сценарием, рассматриваемым в NUREG-2161, была потеря воды в одном из бассейнов двух реакторов с кипящей водой на атомной электростанции ПичБоттом в Пенсильвании⁵⁶. Несмотря на опыт Фукусимы, в исследовании не рассматривалась возможность одновременной аварии реактора, перекрывающей доступ к бассейну. Поэтому в нем исключалась возможность сценария испарения, такого, какое произошло в бассейне 4 на Фукусима Дай-ичи, потому что для того, чтобы уровень воды понизился до верхнего края топлива, потребовалось более 72 часов, и персонал посчитал невыносимым, чтобы ситуация могла оставаться неконтролируемой в течение более трех суток. Поэтому персонал рассматривал ситуации, в которых землетрясение приводило к утечке через дно бассейна, осушающей его быстрее, чем вода могла пополняться. Было обнаружено, что если верхняя половина отработавшего топлива была открыта и осушение бассейна происходило не слишком быстро, то в реакции пара с цирконием могло образоваться значительное количество водорода. В случае плотно упакованного бассейна количество образовавшегося водорода могло оказаться достаточным для создания взрывоопасной концентрации в большом пространстве над бассейном. Взрыв водорода мог снести верхнюю часть стен и крышу здания реактора, как это произошло в Фукусиме, и обеспечить доступ воздуха, несущего неограниченное количество кислорода. Результирующий пожар отработавшего топлива привел бы к выбросу существенной части цезия-137 из топлива в атмосферу, достигающего 900 ПБк (24 МКи) в рассмотренных в исследовании сценариях, примерно такого же, как запас радиоактивности в бассейне 4 Фукусима Дай-ичи⁵⁷.

Однако, для хранения с низкой плотностью в исследовании NUREG-2161 было обнаружено, что из-за меньшего количества топлива, соприкасающегося с паром⁵⁸, концентрация образовавшегося водорода над бассейном будет ниже пороговой концентрации, требующейся для взрыва, и из нетронутого здания реактора может выйти лишь небольшая часть запасов цезия-137⁵⁹, до 11 ПБк (0,3 МКи) или около 1% от того, что было получено для пожара и взрыва водорода в бассейне с высокой плотностью⁶⁰. Одиннадцать ПБк находится в интервале 6–20 ПБк (0,16–0,54 МКи) оцениваемого выброса цезия-137 при аварии в Фукусиме, и на порядок величины меньше, чем 85 ПБк (2,3 МКи), выброшенных при аварии в Чернобыле⁶¹.

Когда персонал Комиссии по ядерному регулированию сравнивал средние последствия выбросов примерно 7 ПБк (0,2 МКи) цезия-137 из бассейна с низкой плотностью и 330 ПБк (8,8 МКи) из бассейна с высокой плотностью на атомной электростанции Пич Боттом, он обнаружил, что меньший выброс приведет к переселению на один год, или около того, примерно 120 000 человек с площади примерно в 600 км², того же порядка, как и площадь, ставшая необитаемой после аварии в Фукусиме. Большой выброс приведет к перемещению примерно 4,1 миллиона человек с площади в 24 000 км², что превышает площадь штата Нью-Джерси. Рассчитанные популяционные дозы радиации привели к оцениваемым количествам смертельных случаев от рака в 3 000 и 24 000 соответственно⁶⁴.

Регулятивный анализ затрат и выгоды 2013 года Комиссией по ядерному регулированию

В своем анализе 2013 года возможных регулятивных требований к ядерным энергоэнергетическим компаниям для перехода на хранение с меньшей плотностью, персонал Комиссии по ядерному регулированию оценил средний выброс цезия-137 от пожаров для четырех классов американских бассейнов с плотной упаковкой отработавшего топлива, включающих все действующие и четыре строящиеся американские реакторы атомных электростанций (смотрите таблицу 1). Средний взвешенный по бассейнам оцениваемый выброс равен 1 600 ПБк (43 МКи), почти вдвое превышающий запас цезия-137 в бассейне 4 для отработавшего топлива на Фукусима Дай-ичи, из-за того, что в американских бассейнах для отработавшего содержится намного больше отработавшего топлива, чем в японских.

Как и в Японии, величина результирующих экономических потерь, переселяемой популяции и доз радиации будет зависеть от перекрытия картины переноса радиоактивности ветрами, распределения населения и инфраструктуры, и наличия «влажного» выпадения радиоактивности из воздуха вместе с дождем или снегом. Персонал Комиссии по ядерному регулированию рассчитал последствия различных погодных условий для получения средних значений и диапазонов изменения⁶⁵.

В своей регулятивной оценке персонал Комиссии по ядерному регулированию представил уменьшение последствий аварии в результате перехода на упаковку низкой плотности после умножения последствий на свои оценки вероятности возникновения пожаров отработавшего топлива в бассейнах каждого типа электростанций. Таким способом взвешенные по вероятности выгоды персонал сравнивал с расходами на

рассматриваемые регулятивные действия⁶⁶. Однако, такой способ представления делает регулятивный анализ Комиссии по ядерному регулированию почти неподдающимся проверке.

Таблица 1. Принятые Комиссией по ядерному регулированию для базового сценария оценки выбросов цезия-137 и соответствующие диапазоны неопределенности для четырех классов американских бассейнов для отработавшего топлива с плотной упаковкой⁶².

Тип реактора ⁶³	Бассейны	Средние запасы (ПБк)	Выброс (%)	Выброс (ПБк)
BWR I и II	31	1950 (1500 – 2340)	40 (3 – 90)	781 (44,4–2110)
BWR III и PWR	49	2510 (2120 – 2890)	75 (10 – 90)	1900 (211–2600)
AP-1000	4	1640 (1250 – 2010)	75 (10 – 90)	1230 (126–1810)
Блоки с общим бассейном	10	3740 (2350 – 5260)	75 (10 – 90)	2800 (237–4740)
Взвешенные средние		2420 (1910 – 2930)	63 (8 – 90)	1600 (165–2630)

Примечания: BWR – реактор с кипящей водой; PWR – реактор с водой под давлением; AP-1000 – модернизированный реактор с водой под давлением.

Комитет Национальной академии наук по накопленному опыту от ядерной аварии в Фукусиме посчитал, что важно знать абсолютные величины последствий, в особенности для событий малой вероятности с большими последствиями, таких, как пожары отработавшего топлива, где оценки вероятности по необходимости будут неопределенными и неполными. Поэтому комитет потребовал, чтобы персонал Комиссии по ядерному регулированию предоставил свои оценки последствий аварии без вероятностного множителя.

Таблица 2. Взвешенные по бассейнам средние значения запрещенных областей и перемещенных популяций для пожаров в американских бассейнах для отработавшего топлива с плотной упаковкой, предоставленные персоналом Комиссии по ядерному регулированию Комитету Национальной академии наук по сравнению с Чернобылем и Фукусимой. Оценки «запрещенных» популяций Комиссии по ядерному регулированию включают только население районов, подлежащих обязательному переселению. Для Чернобыли и Фукусимы добровольное переселение из менее загрязненных районов приблизительно удвоили показанные цифры.

	Среднее (диапазон)
«Запрещенная» площадь (км²)	
Расчет Комиссии по ядерному регулированию (пожар в бассейне с высокой плотностью упаковки) ⁶⁷	31 000 (14 000–48 000)
Чернобыль ⁶⁸	3 100
Фукусима ⁶⁹	1 100
«Запрещенное» население (миллионы человек)	
Расчет Комиссии по ядерному регулированию (пожар в бассейне с высокой плотностью упаковки) ⁷⁰	3,5 (1,3–8,8)
Чернобыль ⁷¹	0,116
Фукусима ⁷²	0,088

Взвешенные по бассейнам средние значения площадей запрещенных районов и перемещенных популяций (и диапазонов их неопределенности) для пожаров в бассейнах для отработавшего топлива (по оценкам персонала Комиссии) приведены в таблице 2.

Персонал Комиссии по ядерному регулированию для получения своих оценок использовал программу моделирования рассеяния MACCS2. В данной статье программа HYSPLIT использовалась для проведения вычислений площади запрещенных районов и переселяемых популяций для выброса 1 600 ПБк цезия-137 с атомной электростанции Пич Боттом в течение 32 часов. Выброс в зависимости от времени сравнивался с профилем выброса 1090 ПБк цезия-137 с атомной электростанции Пич Боттом на компьютерной распечатке MACCS2, представленной Комиссией по ядерному регулированию по запросу штата Нью-Йорк⁷³. Как и в случае Японии, частицы, переносимые цезий-137, высвобождались из вертикального линейного источника на высоте от 75 до 125 над уровнем земли; использовалась скорость сухого осаждения в 0,2 см/с.

Трактовка рассеяния и осаждения в программе HYSPLIT намного более реалистична, чем в програм-

ме MACCS2. Хотя MACCS2 может моделировать различные погодные условия, она базируется на прямолинейной модели гауссова султана, и она предполагает, что погода везде такая же, как в точке источника⁷⁴. Она была разработана для описания рассеяния и осаднения в окрестностях точки источника. Программа HYSPLIT, использующая реальные исторические метеорологические данные, принимает во внимание явления переноса в атмосфере на средних и больших расстояниях, а также топографию региона, которые важны для расчета уровней загрязнения на огромных площадях, которые будут затронуты при крупном выбросе цезия-137 при пожаре в бассейне для отработавшего топлива с плотной упаковкой. Например, даже если в точке выброса не будет выпадения, то проходящие мимо нее воздушные массы будут стремиться выносить цезий-137 в области низкого давления, которые на восточном берегу США будут совпадать с районами выпадения атмосферных осадков.

Критерии перемещения («запрещения»), рекомендованные Управлением по защите окружающей среды США, соответствуют дозе в 2 бэр за первый год, и в 0,5 бэр/год за каждый из последующих четырех лет, в предположении отсутствия защиты зданиями и т.п.⁷⁵. Уровень загрязнения цезием-137 в 1 МБк/м² будет соответствовать начальной мощности дозы без защиты примерно в 1,74 бэр/год⁷⁶. Принимая во внимание время жизни цезия-137 и используя формулу Комиссии по ядерному регулированию для ослабления гамма-лучей по мере проникновения цезия-137 в почву⁷⁷, уровень загрязнения в 1,5 МБк/м² будет соответствовать дозе за первый год в 2 бэр, а уровень загрязнения в 0,53 МБк/м² будет давать дозу в 0,5 бэр за второй год, что охватывает уровень загрязненностей в 1 МБк/м², определявший зону обязательной эвакуации в Японии.

Та же самая временная зависимость выброса, что применялась в расчетах Комиссии по ядерному регулированию для аварии на атомной электростанции Пич Боттом по программе MACCS2, была использована с реальными метеорологическими данными в первый день каждого месяца 2015 года. Результаты были усреднены по этим двенадцати прогонам программы HYSPLIT для первого дня каждого месяца 2015 года, чтобы принять во внимание сезонные вариации погоды. На рисунке 6 показаны примеры областей загрязнения. Размеры и расположение затронутых областей сильно зависят от погодных условий. Примеры, показанные на рисунке 6, представляют случаи с минимальным общим воздействием (1 января), сильными эффектами на большом расстоянии (1 апреля), максимальным количеством перемещаемых жителей (1 июля) и максимальной площадью запрещенных районов (1 октября).

Через неделю после начала выброса в среднем 44% выброшенного в этих сценариях цезия-137 осело на суше в пределах 15 градусов широты и долготы от Пич Боттом. Также, в среднем около половины области, показанных как загрязненные выше уровня 1 МБк/м², не были бы загрязнены выше этого уровня в отсутствие дождя⁷⁹.

В таблице 3 приводится сравнение результатов расчетов Комиссии по ядерному регулированию по программе MACCS2, представленных Комитету Национальной академии наук, с расчетами по программе HYSPLIT для нескольких различных порогов запрещающего загрязнения.

Таблица 3. Средние рассчитанные запрещенные площади и перемещаемое население для гипотетического выброса 1 600 ПБк на атомной электростанции Пич Боттом. Расчеты по программе HYSPLIT были усреднены по результатам, полученным с использованием метеорологических данных для первых чисел каждого месяца 2015 года.

	Оценка NRC для NAS	Средние результаты расчетов для первых чисел каждого месяца 2015 года по программе HYSPLIT для выброса 1 600 ПБк на ПичБоттом для пяти различных порогов запрещения (в МБк/м ²)				
		5	2,5	1,5	1	0,5
Запрещенная площадь (тысячи км ²)	31 (14 – 48)	25 (3 – 61)	50 (6 – 103)	77 (8 – 187)	101 (11 – 274)	156 (16 – 403)
Перемещенное население (миллионы)	3,5 (1,3 – 8,8)	6,3 (0,6–9)	11,1 (1 – 28)	15,3 (2,5 – 36,5)	18,1 (6,8 – 40,8)	26,3 (10,7–47,9)

Результаты в таблице 3 показывают, что для уровня запретительного загрязнения в 1,5 МБк/м² (уровень первого года для дозы без защиты в 2 бэр) средние результаты программы HYSPLIT для запрещенных площадей и перемещения населения соответственно в 2,5 и 4,5 раза больше, чем числа, представ-

ленные персоналом Компании по ядерному урегулированию в Комитет Национальной Академии Наук. В случае перемещаемого населения расхождение может быть частично объяснено тем, что площадка Пич Боттом находится в 90-м процентиле в отношении к плотности населения в радиусе 50 миль (80 км)⁸⁰. Если наши результаты для перемещаемого населения сравнить с верхней границей диапазона, указанной Комиссией по ядерному регулированию, то расхождение в отношении перемещаемого населения уменьшается до фактора 1,7 для запретительного уровня загрязнения в 1,5 Мбк/м².

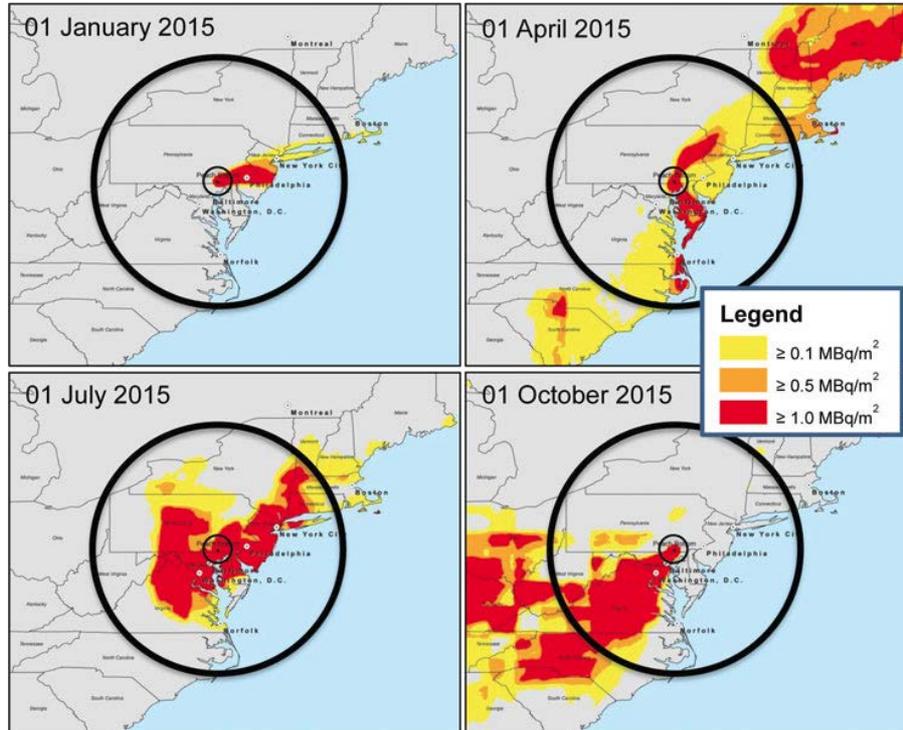


Рисунок 6. Районы загрязнения от гипотетического пожара в бассейне для отработавшего топлива с плотной упаковкой на атомной электростанции Пич Боттом в Пенсильвании, выбросившем 1090 ПБк цезия-137 в четыре даты 2015 года. Анализ затрат и выгоды Комиссии по ядерному регулированию не включает выгоду от уменьшенной переселяемой популяции и доз радиации на расстоянии более 50 миль (80 км), показанных малыми кружками. Большие круги радиусом 540 км, или 335 миль, показывают среднее максимальное расстояние, на котором персонал Комиссии по ядерному регулированию определил, что будут необходимы долгосрочные перемещения для выброса 1090 ПБк (29 МКи) цезия-137. Комиссия по ядерному регулированию не выдавала такой подробной информации по выбросу 1 600 ПБк. Ветер в этом регионе предпочтительно дует в сторону Атлантического океана, но площадка находится внутри страны, а вдоль побережья расположены крупные городские поселения. Поэтому густонаселенные районы будут довольно часто находиться по направлению ветра от Пич Боттом⁷⁸. Квадратные углы в некоторых картинах выпадения – это артефакты, связанные с тем, что метеорологические данные предоставляются на сетке с шагом 0,5 градуса.

В отношении расхождений по площади в дату передачи данной статьи в печать от Комиссии по ядерному регулированию не было получено никаких ответов на вопросы о предположениях о запрещении, которые были приняты ими в их регулятивном анализе (COMSECY-13-030),⁸¹ но наиболее вероятное объяснение связано с фактором защиты, использованном ими в их вычислениях. «Руководство по защитным действиям» Управления по защите окружающей среды США рекомендует перемещение населения тогда, когда «в отсутствие защиты от строений или применения методов уменьшения дозы», прогнозируемая доза превысит 2 бэр в первый год или 0,5 бэр во второй год [курсив авторов]⁸². В выходные данные программы MACCS2 из исследования NUREG-2161 для атомной электростанции Пич Боттом, на котором был построен регулятивный анализ Комиссии по ядерному регулированию, персонал включил средний фактор защиты в 0,18, что привело к запрещению только для доз без защиты выше 11,1 бэр в первый год и ежегодно 2,8 бэр после него, вместо 2 бэр и 0,5 бэр соответственно⁸³. В других анализах персонал использо-

вал факторы защиты до 0,33⁸⁴. В регулятивном анализе персонал мог использовать различные факторы защиты для различных классов электростанций. Кроме того, из-за ограничений программы MACCS2, персонал комбинировал требования первого и последующих годов в единое требование того, чтобы доза была меньше 4 бэр в течение 5 лет⁸⁵.

С фактором защиты в 0,18 или 0,33 и предположениями Комиссии по ядерному регулированию в отношении выветривания, это будет соответствовать уровням загрязнения соответственно 5 или 2,5 МБк/м². В этом диапазоне уровней загрязнения наши рассчитанные средняя запрещаемая площадь будет находиться в грубом согласии с той, которая была представлена Комиссией по ядерному регулированию комитету Национальной академии наук. Без фактора защиты запрещаемая площадь будет грубо соответствовать результатам наших расчетов по программе HYSPLIT, полученным для уровня загрязнения 1 МБк/м². Для этого уровня загрязнения наши расчеты по программе HYSPLIT без защиты дадут среднюю запрещаемую площадь примерно в три раза большую, чем значение, используемое Комиссией по ядерному регулированию в их анализе затрат и выгоды.

Расхождение будет еще больше, если принимать в расчет цезий-134 с периодом полураспада в 2 года. Персонал Комиссии по ядерному регулированию не говорит, какое отношение Cs-134/Cs-137 они использовали в документе COMSECY-13-0030. Однако, в документе NUREG-2161 они предполагали, что это отношение равно 0,36⁸⁶. Для этого отношения в загрязнении первоначальное отношение мощностей доз равно 0,93, отношение доз за первый год равно 0,83 и отношение доз за 5 лет равно 0,43⁸⁷. Для уровня загрязнения цезием-137 в 1 МБк/м² доза первого года с цезием-134 будет равна 2,4 бэр и 1,3 без него, а доза за 5 лет будет равна 6,6 бэр с цезием-134 и 4,6 бэр без него.

В таблице 4 показаны взвешенные по бассейнам средние значения оценок персонала Комиссии по ядерному регулированию, в тесте чувствительности, уменьшенного ущерба от пожара в бассейне для отработавшего топлива для населения США в дозах радиации (по 4 000 долларов за 1 бэр или по 400 000 за 1 Зиверт) и потери имущества, если бассейны для отработавшего топлива будут переведены с плотной упаковки на упаковку с малой плотностью. В этих расчетах ущерб учитывался до расстояния в 1 000 миль (1600 км). Поскольку персонал оценил, что выбросы цезия-137 в атмосферу от пожаров в бассейнах с упаковкой низкой плотности будут составлять около 1 % от выбросов при пожарах в бассейнах с плотной упаковкой, числа, показанные в таблице 4, также являются, в хорошем приближении, оценками средних потерь от пожаров в бассейнах с плотной упаковкой.

Таблица 4. Оценки персонала Комиссии по ядерному регулированию среднего уменьшения последствий аварии (и диапазоны неопределенности) для пожаров отработавшего топлива в бассейнах, если отработавшее топливо в США будет переводиться на хранение в сухих контейнерах после пяти лет, а оставшееся в бассейнах топливо будет храниться в конфигурации с низкой плотностью. Эти числа также представляют, в хорошем приближении, оценки Комиссии по ядерному регулированию последствий пожара в бассейне с плотной упаковкой, поскольку, по сравнению с ними, последствия пожара в бассейне с низкой плотностью будут пренебрежительно малы. Они были рассчитаны как часть теста чувствительности для определения влияния последствий аварии до расстояния в 1 000 миль (1 600 км) и введения долларового эквивалента уменьшенных доз радиации для населения в размере 4 000 долларов/бэр⁸⁸. В оценке затрат и выгоды для своего регулятивного анализа Комиссия по ядерному регулированию учитывала последствия аварии до расстояния в 50 миль (80 км) и предполагала долларовый эквивалент в 2 000 долларов/бэр.

Тип реактора	Бассейны	Сокращенные дозы	Уменьшенные расходы	Общая выгода
		(в миллиардах долларов 2012 года)		
BWR I и II	31	389 (34–968)	140 (20–554)	529 (54–1524)
BWR III и PWR	49	443 (110–1153)	310 (119–661)	754 (229–1815)
AP-1000	4	350 (74–980)	202 (68–490)	552 (142–1471)
Блоки с общим бассейном	10	574 (118–1612)	463 (132–1123)	1037 (250–2736)
Взвешенные средние		435 (84–1133)	266 (86–668)	701 (170–1802)
Примечания: BWR – реактор с кипящей водой; PWR – реактор с водой под давлением; AP-1000 – модернизированный реактор с водой под давлением.				

В указанном тесте чувствительности было обнаружено, что в базовом сценарии среднее уменьшение ущерба для населения от пожара в бассейне для отработавшего топлива в США после перехода на хра-

нение в бассейнах с низкой плотностью упаковки составит примерно 700 миллиардов долларов. Однако, персонал оценил также, что средняя вероятность такого выброса будет равна всего лишь 1/200000 на реактор за год⁸⁹. В конце 2019 года, когда предполагалось, что передача отработавшего топлива с возрастом более 5 лет будет завершена, среднее оставшееся лицензированное время американских реакторов будет равно 21 году⁹⁰. Это приведет к тому, что средняя вероятность пожара отработавшего топлива в течение оставшегося лицензированного времени реакторов составит примерно 1/10000 на реактор или около 1% для всех 94 американских бассейнов (между 0,14 и 6% с учетом оценок персоналом неопределенностей в вероятностях). Эти вероятности могут быть удвоены, если, как обсуждает Комиссия по ядерному регулированию, лицензированные времена жизни атомных электростанций США будут увеличены с 60 до 80 лет⁹¹.

В любом случае, при использовании предположений Комиссии по ядерному регулированию, средняя взвешенная по вероятности выгода в расчете на бассейн от перехода на хранение с низкой плотностью упаковки будет примерно равна 700 миллиардам долларов, поделенным на 10 000, или примерно 70 миллиардам долларов на реактор. Это сравнимо с оценкой персонала для средних расходов в 50 миллионов долларов на реактор для ядерных электроэнергетических компаний для реализации хранения с низкой плотностью упаковки⁹².

Однако, как отмечалось выше, показанные в таблице 4 оценки выгоды взяты из «теста чувствительности», рассчитанного персоналом Комиссии по ядерному регулированию. Они не являются «выгодой», обычно используемой в их регулятивном анализе. Правила Комиссии по ядерному регулированию для анализа затрат и выгоды, действовавшие в 2013 году (и все еще действующие в 2016 году во время написания данной статьи) уменьшают показанную в таблице 4 выгоду примерно в десять раз. В частности, анализ затрат и выгоды Комиссии по ядерному регулированию:

1. Исключает последствия аварии за пределами 50 миль (80 км), несмотря на то факт, что для большого выброса в 1090 ПБк (29 Мки) цезия-137 из атомной электростанции Пич Боттом в Пенсильвании, персонал нашел, что в среднем 91% запрещенной области и 84% перемещаемого населения расположены более, чем за 50 миль от электростанции⁹³.
2. Использует долларовый эквивалент уменьшенных доз радиации в размере 2 000 долларов/бэр, который не обновлялся с 1995 года, Персонал Комиссии по ядерному регулированию оценил, что обновленное значение на 2015 год должно составлять 5 100 долларов/бэр⁹⁴. В показанных в таблице 4 результатах теста чувствительности использовалось значение 4000 долларов/бэр.
3. Ценность выгоды для населения от уменьшенных последствий аварии после 2019 года (когда, как предполагалось, будет завершен ускоренный перенос) понижалась на 7% в год. Эта уценка была введена для учета возможности того, что если бы электроэнергетические компании не заставили инвестировать в ускоренный перенос, они могли бы инвестировать эти средства на фондовой бирже с долгосрочной средней нормой прибыли в долларах базового периода около 7%⁹⁵.

Эти три предположения, первые два из которых, по мнению персонала Комиссии по ядерному регулированию неверны (что следует из теста чувствительности), понижают среднюю взвешенную по вероятности выгоду примерно в 10 раз до 6,6 миллиона долларов на бассейн – существенно меньше, чем оцениваемые затраты в 50 миллионов долларов на бассейн для реализации ускоренного переноса⁹⁶.

Кроме того, как отмечалось выше, в анализе затрат и выгод Комиссия по ядерному регулированию предположительно оценивала количество переселяемого населения на основании прогнозируемой дозы за защитой, а не дозы без защиты, рекомендуемой Агентством по защите окружающей среды в ее руководстве по защитным действиям от радиологических аварий. В соответствии с нашими расчетами, это приводит к недооценке площадей, из которых должно быть переселено население, примерно в три раза по сравнению с теми, которые были бы определены в соответствии с руководством Агентства по защите окружающей среды, или с японской практикой.

Подход Комиссии к анализу затрат и выгоды также недооценивает выгоду от ускоренного переноса в нескольких других важных аспектах. Ниже предположения Комиссии по ядерному регулированию, относящиеся к компенсационным платежам перемещаемому населению и коммерческим предприятиям, сравниваются с компенсациями, предоставленными перемещаемому населению в Японии, и упущения Комиссии по ядерному регулированию в ее анализе затрат и выгоды, относящиеся к косвенным убыткам, психологическому воздействию, и возможности ядерного терроризма.

Компенсационные выплаты перемещаемому населению и коммерческим предприятиям

Разделив средние оцениваемые экономические убытки в 266 миллиардов долларов, указанные в таблице 4, на среднее количество перемещаемого населения из таблицы 2 в 3,5 миллиона человек, мы получим средние экономические убытки на одного переселяемого человека, равные 76 000 долларов.

Для сравнения, утвержденная правительством Японии сумма в 57 миллиардов долларов (7,07 триллиона иен) для компенсации переселенцам из Фукусимы, на середину 2015 года⁹⁷ соответствовала средней сумме в 650 000 долларов на одного обязательно переселяемого лица. Однако, только 45% от этой суммы было непосредственно выплачено обязательно переселенцам. На 8 апреля 2016 года приблизительно 6% было выплачено добровольным переселенцам и 49% – коммерческим предприятиям⁹⁸.

Однако, компенсационные платежи, выплачиваемые Японией, оплачивают продолжающееся переселение, а не потерю собственности⁹⁹. Средний ежегодный платеж 88 000 обязательных переселенцев соответствует примерно 6,3 миллион иен (около 60 000 долларов) в год в течение пяти лет. По-видимому, коммерческие предприятия получают компенсацию таким же непрерывным способом.

Оценка персонала Комиссии меньше, частично из-за того, что она предполагала, что дезактивация с уменьшением дозы до 15 раз может быть проведена в течение года, и что поэтому практически вся перемещенная популяция может возвратиться домой в течение года¹⁰⁰. Реализация такой быстрой и эффективной дезактивации не согласуется с опытом Японии. Недавно штат Нью Йорк потребовал от Комиссии по ядерному регулированию представить основания для своих предположений по столь серьезному вопросу. Комиссия по ядерному регулированию не смогла сделать этого и согласилась с тем, что «реальные данные, полученные в аварии в Фукусиме, предоставят значительно более релевантные современные источники для оценки времени и затрат на дезактивацию в серьезной аварии на реакторе с последствиями за пределами площадки»¹⁰¹.

Методология затрат и выгоды Комиссии по ядерному урегулированию также не принимает в расчет косвенных убытков. Возможно, наиболее серьезными из таких убытков в Японии стало выключение почти всех реакторов на японских атомных электростанциях по крайней мере на пять лет. Через пять лет после аварии из 43 японских реакторов, все еще числящихся в информационной системе энергетических реакторов МАГАТЭ как «сданные в эксплуатацию», работают только три. Еще четыре реактора были лицензированы для эксплуатации по переработанным после Фукусимы правилам безопасности, но двум реакторам было запрещено начать работу по судебному постановлению. Требуемые по правилам безопасности усовершенствования двух других реакторов не будут завершены до 2019 года.

Электроэнергетические компании обратились за лицензиями для возобновления работы дополнительных 18 реакторов с требуемыми улучшениями безопасности, которые, как сообщают, в среднем обошлись примерно в 100 миллиардов иен (1 миллиард долларов) на реактор. В дополнение к четырем блокам на Фукусима Дай-ичи, которые были уничтожены при аварии, компании решили вывести из эксплуатации еще восемь других энергетических реакторов. И, наконец, они еще не приняли решения по обращениям за разрешениями на возобновление работы еще восемнадцати реакторов. Если они полагают, что разрешение может быть получено, они должны быть сильно заинтересованы в том, чтобы сделать это. В сумме компании в течение 2011–2015 годов заплатили около 14,4 триллиона иен (около 144 миллиардов долларов) за ископаемое топливо для предоставления замещающей мощности для выключенных реакторов¹⁰².

Сравните это косвенное влияние аварии Фукусима Дай-ичи с предположениями в анализе затрат и выгоды от ускоренного переноса персонала Комиссии по ядерному регулированию. Персонал предположил, что должна быть закрыта только та атомная электростанция, на которой произошла авария, и что затраты на потерю ее мощности в течение 7 лет составят только 16 миллионов долларов¹⁰³. Поскольку персонал рассчитал, что авария приведет к переселению населения в сорок раз большему, чем была переселено из-за аварии в Фукусиме (смотрите таблицы 2 и 3), то перманентное выключение всех атомных электростанций в Соединенных Штатах и большинстве других стран кажется более вероятным.

Статья косвенных убытков, полностью отсутствующая в анализе затрат и выгоды Комиссии по ядерному регулированию, – это потеря доходов от туризма и экспорта продовольствия в соседних не эвакуированных областях. Французский институт радиационной защиты и ядерной безопасности (IRSN) оценил, что после аварии масштаба Фукусимы во Франции¹⁰⁴ потеря доходов от туризма и экспорта пищевых продуктов из-за международных опасений радиоактивного загрязнения со временем может увеличиться до 166 миллиардов евро (или 200 миллиардов долларов)¹⁰⁵.

В анализе затрат и выгоды Комиссии по ядерному регулированию также не рассматривается психоло-

гическое воздействие крупных радиологических выбросов. Обзор психологического здоровья населения Украины через 20 лет после аварии в Чернобыле показал, что добавочная доза радиации, эквивалентная всего лишь годовой экспозиции к внешнему естественному фону коррелировал с пониженной удовлетворенностью жизнью, увеличению диагнозов психических расстройств и уменьшению субъективной продолжительности жизни. Авторы нашли, что дополнительные правительственные услуги, требующиеся для этой популяции, составляли примерно 0,5% ВВП Украины. Когда они сравнили отрицательное влияние аварии на удовлетворенность жизнью наиболее облученной части населения Украины, с положительным эффектом увеличения доходов, они обнаружили, что суммарная потеря благополучия будет эквивалентна 2 – 6% ВВП Украины, или 5 – 15 миллиардам долларов в год¹⁰⁶.

Япония, чей опыт со страхом радиации включает дозы от взрывов над Хиросимой и Нагасаки, предоставляет компенсацию за «ментальные страдания» тем, кто был переселен из-за аварии в Фукусиме. Для временно перемещенных лиц платежи составляют 100 000 иен (около 1 000 долларов) в месяц. Для людей из областей, где загрязнение настолько велико, что возвращение считается невероятным, производится разовый платеж в 6 миллионов иен (около 60 тысяч долларов)¹⁰⁷.

Следовательно, даже хотя оценка ущерба от пожара в бассейне для отработавшего топлива с плотной упаковкой в США в 700 миллиардов долларов персоналом Комиссии по ядерному регулированию в его тесте чувствительности намного больше оцененного в 150 миллиардов долларов 2015 года экономического ущерба от урагана Катрина (2005 год), природной катастрофы, принесшей максимальный ущерб в США после 1980 года, эта оценка все еще может быть значительно недооцененной. Ураган привел к перемещению 600 000 семей, и серьезно повредил или уничтожил около 126 000 жилых строений¹⁰⁸. Пожар в бассейне для отработавшего топлива с плотной упаковкой, который приведет к переселению десятка миллионов человек на годы, поэтому будет экстраординарной катастрофой мирного времени.

При расчете вероятности пожара в бассейне для отработавшего топлива в анализе затрат и выгоды Комиссии по ядерному регулированию явным образом исключалась возможность выброса, вызванного террористами, с такой аргументацией: «вопросы безопасности эффективно рассматриваются в существующей регулятивной программе»¹⁰⁹. Однако, нет никакого способа, с помощью которого персонал Комиссии по ядерному регулированию мог бы уверенно установить, что его требования по безопасности электростанции уменьшили вероятность успешного нападения террористов на бассейн для отработавшего топлива до уровня, значительно меньшего, чем его очень низкая оценка вероятности выброса в аварийной ситуации. С таким же успехом персонал мог бы заявить, что «вопросы безопасности эффективно рассматриваются в существующей регулятивной программе» и установить вероятность пожара в бассейне для отработавшего топлива в Соединенных Штатах равна нулю.

Количественные цели по охране здоровья

В своем регулятивном анализе ускоренного переноса отработавшего топлива персонал отметил, что безотносительно к результатам анализа затрат и выгоды, от Комиссии по ядерному регулированию не требуется выпускать новое предписание, если риск от атомной электростанции не нарушает любого из требований двух «Количественных целей по охране здоровья» Комиссии по ядерному регулированию¹¹⁰.

Количественные цели по охране здоровья (QHO), принятые Комиссией по ядерному регулированию в 1986 году, требуют, чтобы¹¹¹:

1. «Риск для среднего индивида поблизости от атомной электростанции внезапного смертельного исхода, который мог произойти от аварии реактора [т.е. смерти от высокой дозы радиации в течение нескольких недель], не должен превышать ... (0,1%) от суммы всех рисков быстрых смертельных исходов в результате других несчастных случаев, которые обычно могут происходить с населением Соединенных Штатов.»
2. «Риск для населения в районе вблизи атомной электростанции смертельных исходов раковых заболеваний, которые могут появиться в результате эксплуатации атомной электростанции [т.е. доз радиации от аварийного выброса радионуклидов] не должна превышать 0,1% от суммы рисков смертельных исходов от раковых заболеваний, вызванных всеми другими причинами.»

В отношении первого требования QHO риск смертельного исхода от дозы радиации в течение недель по существу равна нулю ниже кратковременной дозы в 100 бэр¹¹². Персонал Комиссии по ядерному регулированию предположил, что население должно быть перемещено из районов, где ожидаемая доза пре-

вышает 2 бэр в течение первого года и 0,5 бэр/год в течение последующих лет. Это предположение приводит к расчетной вероятности внезапного смертельного исхода, равной нулю¹¹³.

В отношении второго требования QHO, связанного с риском ракового заболевания, средний риск смертельного исхода от ракового заболевания на душу населения составляет примерно 0,2% в год¹¹⁴. Одна десятая процента от этого риска будет равна $2 \cdot 10^{-6}$ за год. Риск смертельного исхода при раке от ионизирующего излучения зависит от дозы. Персонал Комиссии по ядерному регулированию оценил¹¹⁵, что риск ракового заболевания на 1 бэр, включая взвешенные не смертельные раковые заболевания, как $7,3 \cdot 10^{-4}$. Он рассчитывал риск ракового заболевания для второго требования QHO на основании средней ожидаемой дозы для популяции в радиусе 10 миль (16 км) от атомной электростанции до и в течение эвакуации, и после его возвращения в течение 50 лет, если уровень радиации в районе сможет быть понижен в результате дезактивации до приемлемого уровня. На этом основании персонал оценил риск смерти от рака на протяжении жизни как $4,4 \cdot 10^{-4}$ для большого выброса, соответствующего средней оцениваемой дозе 0,6 бэр¹¹⁶. Этот риск следует умножить на оцениваемую вероятность события. Если оцениваемая вероятность массивного выброса радиации от атомной электростанции меньше одного события в 220 лет на площадку, то это второе требование QHO будет выполнено.

Таким образом, второе требование QHO Комиссии по ядерному регулированию будет выполнено, если оцениваемая вероятность крупного выброса радиации с атомной электростанции будет меньше, чем 0,45% за год. Учитывая, что в США имеется 61 действующая атомная электростанция – некоторые с несколькими реакторами¹¹⁷ – критерии проверки требований QHO будут выполнены, даже если крупные аварии на атомных электростанциях США будут происходить каждые четыре года. Это привело некоторых экспертов к предложению дополнить требования QHO требованием «общественного риска», устанавливает предел на вероятность того, что в результате крупного радиологического выброса на американской атомной электростанции большое количество людей пострадает от долгосрочного переселения¹¹⁸.

Весной 2014 года Комиссия по ядерному регулированию проголосовала (4 голоса за и 1 – против) за то, чтобы принять рекомендацию персонала о том, «что не будут проводиться дополнительные исследования и дальнейший регулятивный анализ этого вопроса, и что эта ... деятельность будет прекращена»¹¹⁹.

ПОЛИТИКА ЯДЕРНОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ

Принимая во внимание политическое давление на Комиссию по ядерному регулированию со стороны промышленной отрасли атомной энергетики и ее сторонников в Конгрессе для ограничения регулятивного давления на промышленность, не удивительно, что регулятивная система Комиссии по ядерному регулированию стала предубежденной против обновления требований по безопасности. Давление стало особенно интенсивным сегодня, когда компании стали закрывать свои атомные электростанции из-за их неспособности конкурировать с электростанциями на базе природного газа и ветровых установок, несмотря на то, что капитальные затраты на их строительство давно окупались¹²⁰.

Лоббисты ядерной промышленности оказывают давление на Комиссию через Конгресс двумя основными способами:

1. Они убеждают симпатизирующих членов Конгресса блокировать утверждение кандидатов в члены Комиссии по ядерному регулированию, которые, вероятно смогут поддерживать новые требования по безопасности, которые промышленность считает слишком дорогими¹²¹.
2. Они оказывают давление на Комиссию по ядерному регулированию через комитеты Конгресса, ответственные за финансирование Комиссии и надзор за ней.

Бывший сенатор Доминичи в 1998 году считался движущей силой второго подхода, когда он пытался обуздать, как ему казалось, слишком агрессивные предписания Комиссии по ядерному регулированию. В то время он был председателем подкомитета по энергии и воде комитета по ассигнованиям Сената, который, вместе с аналогичным органом Палаты представителей, устанавливал уровень финансирования Комиссии по ядерному регулированию.

В книге Доминичи «*Сверкающее завтра: исполнение обещаний ядерной энергии*» (2004 год) имеется глава «День страшного суда для Комиссии по ядерному регулированию». В ней Доминичи вспоминает что некоторые ядерные электроэнергетические компании жаловались ему на то, что Комиссия по ядерному регулированию «слишком сфокусировалась на создании большего количества предписаний» и «дра-

матически увеличила число повесток по незначительным нарушениям». По этой причине он в 1998 году пригласил председателя Комиссии по ядерному регулированию Ширли Джексон в свой офис и сказал ей о своем намерении сократить бюджет Комиссии на одну треть. Ему было приятно увидеть, что «В результате Комиссия по ядерному регулированию рационализировала свой судебный процесс, улучшила свой процесс инспекции, и перешла к предписаниям, основанным на риске.» Сотрудники Комиссии по ядерному регулированию до сих пор вспоминают это событие как «состояние клинической смерти»¹²².

Даже если анализ затрат и выгоды на основании вероятностей показывает, что выгода от предлагаемого предписания для населения превышает расходы на его реализацию ядерными энергетическими компаниями, Комиссия обладает полномочиями действовать, если, по ее суждению, это требуется «для обеспечения обоснованной уверенности в адекватной защите общественного здоровья или общей защиты и безопасности»¹²³.

В 2012 году в другом регулятивном анализе, вытекающем из аварии в Фукусиме, персонал Комиссии по ядерному регулированию предложил, чтобы Комиссия использовала свои полномочия для того, чтобы потребовать установку фильтрующих воздушных клапанов на первичных герметичных оболочках американских реакторов типа Фукусимы, т.е. реакторов с кипящей водой с оболочками малого объема. Если, во время аварии давление в удерживающей конструкции нарастает до точки разрушения, как это произошло во время аварии в Фукусиме, фильтрующий воздушный клапан даст операторам возможность сброса давления, одновременно удаляя радиоактивность из выбрасываемого газа. Персонал признавал, что из-за оцениваемой малой вероятности расплавления активной зоны реактора в Соединенных Штатах, что «Только сравнение выражаемых количественно затрат и выгоды от предполагаемых модификаций не может определить, само по себе, продемонстрировать, что выгода превышает ассоциируемые расходы». Он аргументировал «Тем не менее, если рассматривать качественные факторы, такие, как важность герметизирующих систем в рамках философии эшелонированной обороны Комиссии по ядерному регулированию ... решение потребовать установки систем фильтрующих воздушных клапанов оправдано»¹²⁴. Персонал отметил также, что на большей части европейских энергетических реакторов еще до аварии в Фукусиме потребовали установить фильтрующие воздушные фильтры, и что в нескольких других странах, включая Японию, после аварии было решено сделать это¹²⁵.

Рекомендация персонала спровоцировала яростное письмо от Института ядерной энергии, лоббирующей организации ядерных электроэнергетических компаний, «Промышленность озабочена тем, что использование качественных факторов, как оно предлагается, может создать серьезный отрицательный прецедент для агентства»¹²⁶. Республиканское большинство в комитете надзора над Комиссией по ядерному регулированию в Палате представителей также вмешалось в дискуссию, выразив опасения «по поводу отклонения агентства [Комиссии по ядерному регулированию] от строгого технического анализа затрат и выгоды»¹²⁷.

Комиссия отклонила рекомендацию персонала тремя голосами против двух. Объясняя свой голос, один из победившего большинства членов Комиссии заявил: «Это действие разрывает связь с прежними прецедентами Комиссии по ядерному регулированию. Использование качественных факторов так, как это было сделано в этом [регулятивном анализе] выходит далеко за пределы прежнего управления Комиссией и применение такого подхода сделает правило Backfit [требование превышения выгоды над расходами] существенно бессмысленным»¹²⁸.

ВЫВОДЫ

В соответствии с оценками Комиссии по ядерному регулированию США, пожар в американском бассейне для отработавшего топлива с плотной упаковкой может выбросить в атмосферу в 100 раз больше цезия-137, чем было выброшено при расплавлении трех активных зон реакторов, которые произошли в Фукусиме. Персонал Комиссии по ядерному регулированию рассчитал, что в среднем такая авария приведет к переселению 3,5 миллионов человек. Однако, при выполнении этих оценок персонал предположительно использовал рекомендации по переселению Агентства по охране окружающей среды для прогнозируемых доз радиации без защиты с добавленным коэффициентом защиты. Без включения коэффициента защиты площадь эвакуируемых районов будет примерно в три раза больше.

На основании «Количественных целей по охране здоровья» и анализа расходов и выгоды Комиссия по ядерному регулированию решила не требовать перехода к хранению с низкой плотностью в американских бассейнах для отработавшего топлива. Это решение может быть подвергнуто сомнению по ряду причин, включая следующие:

- Используемые Комиссией по ядерному регулированию «Количественные цели по охране здоровья» для отбора предложений для требующихся улучшений безопасности не включают в качестве цели ограничение риска обязательных перемещений миллионов людей из их жилых помещений и мест работы.
- Анализ затрат и выгоды Комиссией по ядерному регулированию недооценивает выгоду хранения с низкой плотностью в следующих аспектах: исключения терроризма как потенциальной причины пожаров отработавшего топлива; исключения из рассмотрения последствий за пределами 50 миль (80 км); отсутствии обновления значения, присвоенного уменьшенным дозам радиации для населения; недооценки экономических потерь для переселяемого населения предположением без всякого основания, что практически все они вернутся в свои дезактивированные дома и на места работы в течение одного года; использования прогнозируемой дозы с защитой, а не без защиты, для своих предположений по перемещению населения; исключения из рассмотрения вероятности того, что все американские ядерные электростанции будут навсегда закрыты после такой чудовищной аварии; исключения косвенных убытков из-за понижения стоимости имущества, доходов от туризма и продажи продовольствия из соседних районов, загрязненных меньше действующих порогов; и исключения из рассмотрения психологических страданий от воспринимаемой опасности произвольного получения даже небольшой дозы радиации.

Кроме того, оценка риска в терминах вероятности, умноженной на последствия, без систематического учета неопределенностей, является слишком упрощенным, поскольку неопределенности оценки риска событий с малой вероятностью и большими последствиями будут много больше, чем у событий с высокой вероятностью и относительно низкими последствиями, имеющими одно и то же значение произведения оцененных последствий и оцененной вероятности. Например, на базе статистических страховых данных можно надежно предсказать, что в следующем году в Соединенных Штатах от бытовых пожаров погибнет от двух до трех тысяч человек¹²⁹. Но никто не сможет предсказать с любой степенью уверенности, что произойдет одиночный террористический акт, от которого погибнет три тысячи человек, как это случилось в 2001 году. Кроме того, сложение отдельных убытков от событий с большими последствиями не принимает во внимание социальную напряженность, которую приносят с собой крупномасштабные катастрофы. Пожар в бассейне для отработавшего топлива с высокой плотностью вызовет большие социальные и глобальные последствия, особенно, если он произойдет в результате атаки террористов. Вспомните реакцию США на атаку 9/11.

Комиссия по ядерному регулированию оценила, что в пренебрежении риска терроризма вероятность пожара в бассейне отработавшим топливом в течение оставшегося лицензионного срока текущего парка американских реакторов лежит в диапазоне от 0,14 до 6%. Эта оценка не принимала во внимание тот факт, что в настоящее время рассматривается продление лицензий реакторов на дополнительные 20 лет. Хотя Комиссия оценила, что последствия пожара отработавшего топлива в бассейне с плотной упаковкой в среднем приведут к долгосрочному принудительному переселению миллионов людей, она посчитала, что вероятность достаточно мала для того, чтобы не просить ядерные электроэнергетические компании потратить по 50 миллионов долларов в расчете на один реактор с отработавшим топливом (около 1% от капитальных затрат на новый ядерный энергетический реактор), чтобы перейти на хранение с малой плотностью.

Если представители общественности и неправительственные организации не согласны с этим, то они могут оказать давление на Комиссию по ядерному регулированию и надзорные органы в Конгрессе для дополнительной защиты. Однако, ограничившись публикацией последствий, умноженных на неопределенные вероятности, Комиссия по ядерному регулированию не дала возможности журналистам, Конгрессу и общественности понять потенциальную величину последствий пожара в бассейне для отработавшего топлива с плотной упаковкой. Главная задача данной статьи заключалась в том, чтобы сделать эту информацию более доступной.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают признательность за полезные комментарии и предложения от Яна Бейеа, Эдвина Лаймана, Зиа Миана, и Масафуми Такубо. Фрэнк фон Хиппель благодарит других членов Комитета Национальной академии по накопленному опыту аварии в Фукусиме за обсуждения, которые помогли сфор-

мировать его мнение по этим вопросам. И, наконец, мы благодарим Лабораторию исследований воздуха (ARL) Национальной администрации по океану и атмосфере США (NOAA) за предоставление модели переноса и рассеивания HYSPLIT, использованной для проведения наших расчетов.

ПРИМЕЧАНИЯ И ССЫЛКИ

1. Ссылки приводятся ниже при более подробном обсуждении.
2. Гамма-лучи фактически образуются при распаде дочернего ядра цезия-137 Ba-137m с периодом полураспада 2,6 минуты.
3. "Lessons Learned from the Fukushima Nuclear Accident for Improving the Safety of U.S. Nuclear Plants, Phase 2," National Academy Press, 2016.
4. William Freebairn, "Nuclear safety upgrades post-Fukushima cost \$47 billion," 29 March 2016, <http://blogs.platts.com/2016/03/29/nuclear-safety-upgrades-post-fukushima/> (с оцениваемыми расходами для Японии в 27 миллиардов долларов или в среднем 640 миллионов долларов на реактор); Max Colchester, "EDF Pegs Nuclear Upgrade Cost at \$13 Billion," *Wall Street Journal*, 3 January 2012.
5. Активные зоны реакторов 1, 2 и 3 в целом содержали 700 ПБк (19 МКи) цезия-137, Kenji Nishihara et al., "Estimation of Fuel Compositions in Fukushima-Daiichi Nuclear Power Plant," Japan Atomic Energy Agency, #2012-018, 2012. Выброс оценивался в диапазоне 6–20 ПБк (0,16–0,54 МКи), "Report of the United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation," UNSCEAR, UN, 2013, para. 25.
6. "Lessons Learned from the Fukushima Nuclear Accident for Improving the Safety of U.S. Nuclear Plants," Phase I report, National Academy Press, 2014, 90-91.
7. TEPCO, "Fukushima Nuclear Accident Analysis Report," 2012, Attachment 9-5, 1.
8. TEPCO, "Fukushima Nuclear Accident Analysis Report," 2012, 345.
9. Записи обсуждений в Операционном центре Комиссии по ядерному регулированию с 11 по 20 марта, <http://pbadupws.nrc.gov/docs/ML1205/ML120520264.html>.
10. Shunsuke Kondo, "Rough Description of Scenario(s) for Unexpected Situation(s) Occurring at the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant," 25 March 2011, released by Japan's Cabinet Office, 30 January 2012. Перевод на английский язык можно найти по адресу <http://kakujo.net/npp/kondo.pdf>.
11. Брифинг Kondo (ссылка 10). МБк (мега-Беккерели) и Ки (Кюри) – это единицы измерения радиоактивности: соответственно 10^6 и $3,7 \times 10^{10}$ распадов в секунду. В области строгого радиационного контроля резидентами позволено оставаться, но будет проводиться обеззараживание и для ограничения доз будут ограничены некоторые виды деятельности, такие, как употребление в пищу пищевых продуктов местного происхождения.
12. UN Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, "Sources and Effects of Ionizing Radiation," UN, 2000, Volume II, Annex J, "Exposures and effects of the Chernobyl Accident," paras. 107-108 and Table 26.
13. Randall Gauntt et al., SNL Model of the unit 4 Spent Fuel Pool in "Fukushima Daiichi Accident Study, (Status as of April 2012)," Sandia National Laboratories, SAND2012-6173, 2012, 176-199.
14. Kenji Nishihara et al., "Estimation of Fuel Compositions in Fukushima-Daiichi Nuclear Power Plant," (ссылка 5), 114. Содержание Cs-137 в топливе примерно равнялось 4 ТБк (10^5 Ки)/кг, что соответствовало среднему выгоранию отработавшего топлива примерно в 35 МВт(тепл.)-день/кг.
15. TEPCO, "Fukushima Nuclear Accident Analysis Report," 2012, Attachment 9-1, производство столбцов 2 и 4 в таблице 4(4).
16. Теплоемкость воды примерно равна 4,2 МДж/(т·°C). При начальной тепловой мощности распада в бассейне в 2,3 МВт(тепл.), для нагрева 1400 тонн воды до на 75°C потребуется 2,2 суток, если не учитывать потери воды.
17. Основной формой потери тепла водой из бассейна будет испарение, но имеются также относительно небольшие потери на конвективное охлаждение и излучение в воздух, теплопроводность через стенки и дно бассейна.
18. Sandia National Laboratories, "Fukushima Daiichi Accident Study," (ссылка 13), Fig. 118. Для грубых вычислений, выход теплоты при распаде отработавшего топлива в бассейне 4 равнялся 2,3 МВт(тепл.) или 200 000 мегаджоулей (МДж) в сутки 11 марта 2011 года, и он понизился до 1,9 МВт(тепл.) 20 апреля, (ссылка 13), 159, при среднем значении в 2,1 МВт(тепл.) или 180000 МДж/сутки. Для испарения одной тонны воды потребуется около 2300 МДж тепла, так что $(180000 \text{ МДж/сутки}) / (2300 \text{ МДж/тонну}) = 78$ тоннам в сутки.
19. Предполагая, что начальная температура добавляемой воды равна 20 °C, потребуется 3,4 МВт(тепл.)-

- сутки для нагрева добавляемой воды до 90 °С, или около 1,7 суток при выходе 2 МВт тепла из отработавшего топлива.
20. Схема трубопроводов, позволивших ТЕРСО определить глубину воды в защищающем от переполнения резервуаре бассейна 4 с отработавшим топливом, приведена в ТЕРСО, "Fukushima Nuclear Accident Analysis Report," 2012, Attachment 9-2, Figure 2, которая показывает расположение для бассейна 1.
 21. ТЕРСО, "Fukushima Nuclear Accident Analysis Report," 2012, Attachment 9-5, Figure 2.В переделанном нами рисунке указывается одна точка в день, соответствующая максимальному уровню воды в этот день, т.е. после добавления воды в дни, когда «жираф» добавлял воду. Показаны не все измерения.
 22. Адаптировано из "Lessons Learned from the Fukushima Nuclear Accident for Improving the Safety of U.S. Nuclear Plants, Phase 2," (ссылка 6), Figure 2-15.
 23. "Lessons Learned from the Fukushima Nuclear Accident for Improving the Safety of U.S. Nuclear Plants, Phase 2," (ссылка 6), Figure 2.4. В реакторе с кипящей водой над активной зоной реактора установлены устройства для удаления капель увлекаемой воды, т.е. для «осушения» и «отделения» капель из пара перед его входом в турбину.
 24. ТЕРСО, "Fukushima Nuclear Accident Analysis Report," 2012, Attachment 9-5, Figure 5.
 25. ТЕРСО, "Fukushima Nuclear Accident Analysis Report," 2012, Attachment 9/1, Table 3 показывает, что объем бассейна 4 с отработавшим топливом равен 1390 м³, а суммарный объем колодца реактора и ямы осушителя–сепаратора равен 1400м³. Глубина ямы осушителя–сепаратора и колодца реактора равна всего лишь примерно 7 м против 12 м для бассейна с отработавшим топливом, так что полная площадь ямы осушителя–сепаратора и колодца реактора должна быть равна 172 м² против (9,9 м)*(12,2 м) = 121 м² для бассейна, Sandia National Laboratory, "Fukushima Daiichi Accident Study," (ссылка 13), 177, т.е. в 1,42 раза больше. Предположив, что глубина воды в колодце реактора и в яме осушителя–сепаратора равнялась 5,5 м после потерь из-за пролива и 2 м на 12 апреля (смотрите рисунок 4), около 600 м³ должно было перетечь в бассейн отработавшего топлива. Подробный анализ утечки можно найти в отчете Национальной Академии, "Lessons Learned from the Fukushima Nuclear Accident for Improving the Safety of U.S. Nuclear Plants, Phase 2," chapter 2.
 26. Адаптировано из Sandia National Laboratories, "Fukushima Daiichi Accident Study," (ссылка 13), Fig. 119. Первый автор исследования в Сандии полагает, что показанная температура оболочки топлива соответствует недавно выгруженному топливу, электронное письмо от Randall Gautt, 14 April 2016.
 27. Основано на сравнении измерений уровня загрязнения цезием-137 на 29 апреля, как показано в презентации Джона Келли, заместителя помощника секретаря по технологиям ядерных реакторов Департамента энергетики США 15 июня 2011 года "DOE Response to Fukushima Dai-ichi Accident," с картой районов эвакуации, показанной в "Final Report: The Follow-up IAEA International Mission on Remediation of Large Contaminated Areas Off-Site the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant, Tokyo and Fukushima Prefecture, Japan, 14-21 October 2013," IAEA, 23 January 2014,7. По причинам административного удобства Япония расширила эти районы перемещения, включив менее загрязненные районы на расстоянии 20 км от завода до границ городов и деревень.
 28. A.F. Stein, et al. "NOAA's HYSPLIT atmospheric transport and dispersion modeling system," *Bulletin of the American Meteorological Society* 96 (2015): 2059-2077.
 29. S. Saha et al., "NCEP Climate Forecast System Version 2 (CFSv2) 6-hourly Products," Research Data Archive at the National Center for Atmospheric Research, Computational and Information Systems Laboratory, 2011, <http://dx.doi.org/10.5065/D61C1TXF>.
 30. Определено из Sandia National Laboratories, "Fukushima Daiichi Accident Study," (ссылка 13), Figure 121. Первый автор отчета подтвердил, что символ % на вертикальной оси рисунка 121 является типографской опечаткой, электронное письмо от Randall Gautt, 14 April 2016.
 31. "Report of the United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation," (ссылка 5), UNSCEAR, UN, 2013, para. 25.
 32. Высота выброса определяется подъемом султана из-за тепла, производимого в пожаре в бассейне отработавшего топлива. 1331 сборка отработавшего топлива в бассейне 4 содержала около 70 тонн циркония и связанные с ними 45 стоек для отработавшего топлива, в которых содержалось около 170 тонн стали, Sandia National Laboratories, "Fukushima Daiichi Accident Study," (ссылка 13), Tables 21 and 22 and Figure 111. Если весь этот материал окисляется в течение 4 суток, то средний выход мощности будет равен примерно 3 МВт(тепл.). Используя формулу 25 из James Carson and Harry Moses, "The Validity of Several Plume Rise Formulas," *Journal of the Air Pollution Control Association* 19 (1969): 862-866, и

- пренебрегая членом с импульсом султана, можно получить, что султан поднимется на 75/U м в атмосфере со стабильной вертикальной структурой температуры, 100/U м в нейтральной атмосфере и 380/U м в нестабильной атмосфере, где U – скорость ветра в м/с. В период с 19 по 22 марта 2011 года средняя скорость ветра на высоте в 100 м над уровнем земли на атомной электростанции Фукусима–Дайичи составляла примерно 4 м/с. При высокой облачности и инсоляции от низкой до средней класс устойчивости в дневное время находился в интервале от нейтрального до слегка неустойчивого. В ночное время класс устойчивости находился в интервале от нейтрального до слегка стабильного. Исходя из этого, первоначальный подъем султана добавлял примерно от 25 до 75 метров к 50-метровой высоте здания реактора. Для сценария, показанного на рисунке 5, считалось, что цезий-137 будет выброшен из вертикального линейного источника, протяженного от 75 до 125 метров над уровнем земли.
33. “Rise in atmospheric radiation levels in Tokyo and Kanagawa” (*Majirox News*, 7 October 2011) <http://www.majiroxnews.com/2011/10/07/rise-in-atmospheric-radiation-levels-in-tokyo-and-kanagawa/>, на основании сообщения “Results of Airborne Monitoring Survey by MEXT in Tokyo Metropolitan and Kanagawa Prefecture,” Japan Ministry of Education, Culture, Sports, Science and Technology, 6 October 2011.
 34. “Spent Fuel Pool Study (SFPS) MACCS2 Output Fields,” <http://pbdupws.nrc.gov/docs/ML1328/ML13282A535.html>, ML13282A564, LNT 3.4 High Density, 13 November 2012, 2, lines 131-140 and 9, line 764, опубликовано в сети Комиссией по ядерному регулированию по запросу генерального прокурора Нью-Йорка (смотрите <http://pbdupws.nrc.gov/docs/ML1334/ML13341A003.pdf>, 409).
 35. A. Stohl et al., “Xenon-133 and caesium-137 releases into the atmosphere from the Fukushima Dai-ichi nuclear power plant: determination of the source term, atmospheric dispersion, and deposition,” *Atmospheric Chemistry and Physics* 12 (2012): 2313-2343.
 36. Копию WASH-740 с плохим разрешением можно найти по адресу <http://www.dissident-media.org/infonucleaire/wash740.pdf>.
 37. David Burnham, “AEC files show effort to conceal safety perils,” *New York Times*, 9 November 1974.
 38. “Reactor Safety Study,” WASH-1400, Appendix I, 173.
 39. Elisabeth Cardis et al., “Estimates of the cancer burden in Europe from radioactive fallout from the Chernobyl accident,” *International Journal of Cancer* 119 (2006): 1224-1235. Двадцать восемь работников электростанции умерло от лучевой болезни в течение четырех месяцев после аварии в Чернобыле.
 40. Jan Beyea et al., “Accounting for long-term doses in “worldwide health effects of the Fukushima Daiichi nuclear accident,” *Energy and Environmental Science* 6 (2013): 10421045. Ни в отчете “Report of the United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation,” UNSCEAR, UN, 2013, ни в докладе Всемирной организации здравоохранения, “Health risk assessment from the nuclear accident after the 2011 Great East Japan Earthquake and Tsunami based on a preliminary dose estimation,” World Health Organization, 2013, не содержалось оценок дозы популяции или оценок последующих раковых заболеваний.
 41. Смотрите, например, Joel Yellin, “The Nuclear Regulatory Commission's Reactor Safety Study,” *Bell Journal of Economics* 7 (Spring, 1976): 317-339.
 42. “Report to the APS by the study group on light-water reactor safety,” *Reviews of Modern Physics* 47 (1975): Supplement 1.
 43. “Risk Assessment Review Group Report to the U. S. Nuclear Regulatory Commission,” NUREG/CR-0400, 1978.
 44. NRC Statement on Risk Assessment and the Reactor Safety Study Report, WASH-1400, in “Light of the Risk Assessment Review Group Report,” 18 January 1979.
 45. Anthony Andrews, “Nuclear Fuel Reprocessing: U.S. Policy Development,” Congressional Research Service, 27 March 2008.
 46. В 2013 году в бассейнах в Соединенных Штатах хранилось около 50000 тонн отработавшего топлива и скорость выгрузки отработавшего топлива составляла примерно 2200 тонн в год, “Spent Nuclear Fuel Management,” U.S. Governmental Accountability Office, 2014, 11-12. Указанный тоннаж соответствует количеству урана, первоначально находившегося в отработавшем топливе.
 47. Более подробный обзор исследований этого предмета, проведенный Комиссией по ядерному регулированию, можно найти в документе “Consequence Study of a Beyond-Design-Basis Earthquake Affecting the Spent Fuel Pool for a U.S. Mark I Boiling Water Reactor,” U.S. Nuclear Regulatory Commission, NUREG-10-17.
 48. N.A. Pisano et al., “The Potential for Propagation of a Self-Sustaining Zirconium Oxidation Following Loss of Water in a Spent Fuel Storage Pool,” неопубликованное исследование, подготовленное для Комиссии по ядерному регулированию США Лабораториями Сандия в январе 1984 года, упомянутое V. L. Sailor

- et al. in "Severe Accidents in Spent Fuel Pools in Support of Generic Safety Issue 82," Brookhaven National Laboratory, NUREG/CR-4882, BNL- NUREG-52093, 1987.
49. Brookhaven National Laboratory, "Severe Accidents in Spent Fuel Pools in Support of Generic Safety Issue 82," (ссылка 48), 79.
 50. E.D. Throm, "Regulatory Analysis for the Resolution of Generic Issue 82, "Beyond Design Basis Accidents in Spent Fuel Pools," U.S. Nuclear Regulatory Commission, NUREG-1353, 1989.
 51. "Technical Study of Spent Fuel Pool Accident Risk at Decommissioning Nuclear Power Plants," U.S. NRC, NUREG-1738, 2001, Executive Summary.
 52. Robert Alvarez et al., "Reducing the Hazards from Stored Spent Power-Reactor Fuel in the United States," *Science & Global Security* 11 (2003): 1.
 53. Matthew L. Wald, "Study Warns Attack on Fuel Could Pose Serious Hazards," *New York Times*, 30 January 2003.
 54. "Safety and Security of Commercial Spent Nuclear Fuel Storage," Public Report, National Academy Press, 2006. Shankar Vedantam, "Storage of Nuclear Spent Fuel Criticized," *Washington Post*, 28 March 2005.
 55. "Staff Evaluation and Recommendation for Japan Lessons-Learned Tier 3 Issue on Expedited Transfer of Spent Fuel," Nuclear Regulatory Commission, COMSECY-13-0030, Enclosure 1, 12 November 2013.
 56. "Consequence Study of a Beyond-Design-Basis Earthquake Affecting the Spent Fuel Pool for a U.S. Mark I Boiling Water Reactor," U.S. Nuclear Regulatory Commission, NUREG-2161, 2013.
 57. NUREG-2161, (ссылка 56), Table 27.
 58. Существует компромисс между длительностью и количеством произведенного водорода. Персонал Комиссии по ядерному регулированию обнаружил, что для сценария, в котором топливо в бассейне с плотной упаковкой остается раскрытым в течение примерно 20 часов («малая» утечка), то выделившегося водорода будет достаточно для взрыва, но если период раскрытия сократится до 3 часов («умеренная» утечка), то водорода для взрыва не хватит, NUREG-2161, (ссылка 56), Figures 28, 29, 85, and 92.
 59. Причина, по которой не происходит утечки большего количества цезия-137, вероятно, состоит в том, что его две основные химические формы, CsI и Cs₂MoO₄, не остаются в воздухе в течение длительного времени, и конденсируются в частицы и выпадают, или осаждаются на холодных поверхностях внутри нетронутого здания реактора. "MELCOR Best Practices as Applied in the State-of-the-Art Reactor Consequence Analyses (SOARCA) Project," U.S. NRC, NUREG/CR-7008, 2014.
 60. NUREG-2161, (ссылка 56), Tables 27 and 28.
 61. "Report of the United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation," UN, 2013, para. 25 и UN, 2000: Vol. 1, Annex J, "Exposures and Effects of the Chernobyl Accident," para. 2 3; и (для Фукусимы Дай-ичи), "Report of UNSCEAR," UN, 2013, para. 25.
 62. COMSECY-13-0030, Enclosure 1, (ссылка 55), Tables 1, 35, 52. Предполагая среднюю степень выгорания в 45 МВт(тепл.)-день/кг урана, 3,2 Ки Cs-137 на МВт(тепл.)-день и 20% потерю цезия-137 из-за 10 лет распада, в среднем бассейне будет содержаться 570 тонн отработавшего топлива или несколько активных зон. Смотрите также (ссылка 55), 78-79 and Table 72.
 63. BWRI (II) = реактор с кипящей водой с первичной оболочкой Mark I (II). PWR = реактор с водой под давлением, AP-1000 = модернизированный реактор с водой под давлением мощностью 1000-МВт (эл.).
 64. NUREG-2161, (ссылка 56), Table 33, в предположении, что доза популяции в 17 Зв приведет к одному смертельному исходу от рака, "Reassessment of NRC's Dollar Per Person-Rem Conversion Factor Policy," NUREG-1530, Rev. 1, Draft Report for Comment, 2015, 22.
 65. Персонал Комиссии по ядерному регулированию рассматривал также распределение популяции для трех площадок с меньшей средней плотностью населения в радиусе 50 миль (80 км), чем для атомной электростанции Пич Боттом, но в предположении такой же погоды, как на Пич Боттом, COMSECY-13-0030, Enclosure 1, (ссылка 55), Table 53. По количеству населения в окрестности радиусом 50 миль (80 км) Пич Боттом (5,5 миллиона человек) занимает пятое место в Соединенных Штатах. На первом месте находится Индиан-Пойнт с населением 17,2 миллиона человек, <http://msnbc.msn.com/id/42555888/>.
 66. COMSECY-13-0030, Enclosure 1, (ссылка 55). В таблице 10 принимаются во внимание только последствия в радиусе до 50 миль (80 км) и стоимости сокращения дозы радиации для популяции в 2000 долларов за 1 бэр. Таблицы 27–30 предназначены для анализа чувствительности, в котором 50-мильный предел исключен, а дозы радиации оценивались в 4000 долларов за 1 бэр.
 67. Ответ Комиссии по ядерному регулированию на вопрос 6b от Комитета Национальной Академии Наук

- по накопленному опыту по ядерной аварии в Фукусиме от 16 июля 2015 года, доступный в Офисе записей с публичным доступом Национальной академии наук, позиция #457. Этот ответ относился к различию между запрещенными районами и популяциями для пожаров в бассейнах с высокой плотностью и низкой плотностью. Приведенные числа взяты из более позднего сообщения от 1 июня 2016 года, в котором числа представлены отдельно. Критерий обитаемости Комиссии по ядерному регулированию был равен 2 бэр за первый год и по 0,5 бэр ежегодно после этого, COMSECY-13-0030, Table 59. Критерий обитаемости в NUREG-2161 для первого года также был равен 0,5 бэр (p.D-21), что не соответствует более строгим требованиям в Пенсильвании. Поэтому числа для запрещенных районов и популяций между двумя исследованиями отличаются.
68. Область, загрязненная до уровня более 40 Ки/км², "UNSCEAR Report," UN, 2000, Vol. 1, Annex J, "Exposures and Effects of the Chernobyl Accident", Table 8. Кроме того, область в 4 000 квадратных миль была загрязнена до уровней между 0,56 и 1,48 МБк/м² (15 и 40 Ки/км²) и была объявлена как область строгого радиационного контроля, (ссылка 61), para. 108.
 69. Зона обязательного перемещения включает всю область земли с радиусом до 20 км от атомной электростанции Фукусима Дай-ичи. За ее пределами в зону обязательного перемещения включены части каждого города, загрязненные выше 1 МБк/м² (27 Ки/км²). "Results of the 2nd Airborne Monitoring by [Japan's] Ministry of Education, Culture, Sports, Science and Technology and the U.S. Department of Energy," 16 June 2011.
 70. Ответ Комиссии по ядерному регулированию на вопрос 6b от Комитета Национальной Академии Наук по накопленному опыту по ядерной аварии в Фукусиме от 16 июля 2015 года и последующее разъяснение с авторами (ссылка 67).
 71. UNSCEAR Report (UN, 2000) Vol. 1, Annex J, "Exposures and Effects of the Chernobyl Accident" (ссылка 61), para. 95. Кроме того, до 1995 года из области строгого радиационного контроля выехали примерно 123 000 человек (около 45%), para. 108.
 72. "UNSCEAR Report," UN, 2013, para. 24. Включая добровольную эвакуацию, их количество достигло максимума в 165 000 человек. "Fukushima nuclear evacuees fall below 100,000," *Japan Times*, 9 January 2016.
 73. "Spent Fuel Pool Study (SFPS) MACCS2 Output Fields," MACCS2 output file ML13282A564 (LNT 3.4 HighDensity) (ссылка 34), lines 68, 635-698, and, 13-15.
 74. H-N Jow, et al., "MELCOR Accident Consequence Code System (MACCS) Model Description," Sandia National Laboratories, NUREG/CR-4691, SAND86-1562, Vol. 2, 1990 chapter 2.
 75. "PAG Manual: Protective Action Guides and Planning Guidance for Radiological Incidents," U.S. Environmental Protection Agency, Draft for Interim Use and Public Comment, March 2013, Table 3.1.
 76. Включая дозу от короткоживущего (период полураспада 2,6 минуты) продукта распада Ba-137m (94,6% от распадов Cs-137), "Preliminary Report on Operational Guidelines Developed for Use in Emergency Preparedness and Response to a Radiological Dispersal," DOE/HS- 0001 ANL/EVS/TM/09-1, 2009, Table 3.2.
 77. Фактор выветривания, использованный Комиссией по ядерному регулированию в модели MACCS2 для параметризации влияния на дозу, получаемую от загрязненной земли по мере проникновения цезия-137 в более глубокие слои, определяется формулой $0,5 \exp(-t/0,73) + \exp(-t/128)$, где время t измеряется в годах. Можно видеть, что мощность дозы уменьшается почти вдвое в течение первого года, и после этого изменяется очень медленно, "Spent Fuel Pool Study (SFPS) MACCS2 Output Fields," MACCS2 output file ML13282A564 (LNT 3.4 HighDensity) (ссылка 34), 92, lines 32-35.
 78. Розу ветров для атомной электростанции Пич Боттом, т.е. график частоты для ветра, дующего в каждом из 16 направлений, можно найти в "State-of-the-Art Reactor Consequence Analyses Report," U.S. Nuclear Regulatory Commission, NUREG-1935, 2012, Figure 8. Большая часть роз ветров указывает направление, с которого дует ветер. Правила Комиссии по ядерному регулированию противоположны.
 79. Когда закончится влажное осаждение, средняя площадь области, загрязненной до 1 МБк/м² и более, будет равна 51000 км², и средняя переселяемая популяция уменьшится до 11,3 миллиона.
 80. COMSECY-13-0030, (ссылка 55), Enclosure 1, Table 53. Диапазон, указанный для результатов Комиссии по ядерному регулированию, может включать вариации как площадки, так и погоды.
 81. Вопросы, направленные Кевину Витту, менеджеру проекта, отделение накопленного опыта Японии, Управление регулирования ядерных реакторов, Комиссия по ядерному регулированию, 7 июня 2016 года, и сенатором Эдвардом Марки председателю Комиссии по ядерному регулированию Стивену Дж. Бернсу, 30 июня 2016 года.

82. "PAG Manual," (ссылка 75), Table 3.1.
83. "Spent Fuel Pool Study (SFPS) MACCS2 Output Fields," MACCS2 output file ML13282A564 (LNT 3.4 High Density) (ссылка 34), 21, line 38. Критерий переселения популяции, использованный персоналом Комиссии по ядерному регулированию, в данном случае был равен 0,5 бэр за первый год, поскольку атомная электростанция Пич Боттом находится в штате Пенсильвания, в котором установлены свои собственные стандарты .
84. "MACCS Best Practices as Applied in the State-of-the-Art Reactor Consequence Analyses (SOARCA) Project," U.S. Nuclear Regulatory Commission, NUREG/CR-7009, 2014, Table 4.14, entry for "Normal Activity Shielding Factor for all but Cohort 4," (институционализированные популяции).
85. COMSECY-13-0030, (ссылка 55), Enclosure 1, Table 60.
86. "Spent Fuel Pool Study (SFPS) MACCS2 Output Fields," MACCS2 output file ML13282A564 (LNT 3.4 High Density) (ссылка 34), 9, lines 779 and 781.
87. Отношение начальной мощности дозы к Бк/м² равно 2,7, "External Dose-Rate Conversion Factors for Calculation of Dose to the Public," (U.S. Department of Energy, DOE/EH-0070, 1988, 152.
88. Исправленный ответ Комиссии по ядерному регулированию на часть вопроса 6b от Комитета Национальной Академии Наук по накопленному опыту по ядерной аварии в Фукусиме от 8 марта 2016 года, доступный в Офисе записей с публичным доступом Национальной академии наук, позиция #472.
89. COMSECY-13-0030, Enclosure 1, (ссылка 55), Table 43.
90. COMSECY-13-0030, Enclosure 1, (ссылка 55), Table 1.
91. "NRC drafts guidance for 80-year lives," *World Nuclear News*, 21 December 2015.
92. COMSECY-13-0030, Enclosure 1, (ссылка 55), Table 11-14.
93. "Spent Fuel Pool Study (SFPS) MACCS2 Output Fields," MACCS2 output file ML13282A564, (LNT 3.4 High Density), (ссылка 34), 135-136.
94. "Reassessment of NRC's dollar per person-rem conversion factor policy," (ссылка 64), 2015.
95. COMSECY-13-0030, 70 (ссылка 55).
96. Выгода для базового варианта представлена в COMSECY-13-0030, Table 10, взвешенная по бассейнам в соответствии с количеством бассейнов в группах (от 1 до 4) американских энергетических ядерных реакторов, как указано в ссылке 55, Enclosure 1, Table 1.
97. "Japan approves increase in Fukushima compensation to \$57 billion," *Reuters*, 28 July 2015.
98. TEPCO, "Records of Applications and Payouts for Indemnification of Nuclear Damage," 8 April 2016, <http://www.tepco.co.jp/en/comp/images/jisseki-e.pdf>.
99. Toyohiro Nomura and Taro Hokubo, "The Japanese Nuclear Liability Regime and the TEPCO Fukushima Daiichi Accident," OECD/NEA Workshop on Nuclear Damages, Liability Issues and Compensation Schemes, 10-11 December 2013, Vienna, slide 23 and TEPCO, "Records of Applications and Payouts for Indemnification of Nuclear Damage" 8 April 2016, (ссылка 98)
100. "Spent Fuel Pool Study (SFPS) MACCS2 Output Fields," MACCS2 output file ML13282A564 (LNT 3.4 High Density) (ссылка 34), 92, lines 11-14.
101. "Memorandum and Order in the Matter of Entergy Nuclear Operations, Inc. (Indian Point Nuclear Generating Units 2 and 3)" 4 May 2016, 39.
102. Ministry of Economy, Trade and Industry, "Report of the Power Supply and Demand Verification Subcommittee of the Advisory Committee on Energy and Natural Resources," April 2016, <http://www.meti.go.jp/press/2016/04/20160428010/20160428010-2.pdf> (на японском языке) p.40.
103. COMSECY-13-0030, Enclosure 1, (ссылка 55), 93. В 2015 году 61 американская атомная электростанция произвела в среднем 1,3 миллиарда киловатт-часов, IAEA, Power Reactor Information System. В течение семи лет эта величина составит 9,1 миллиардов киловатт-часов. Поэтому оценка Комиссии по ядерному регулированию соответствует цене в 0,017 цента за киловатт-час. Когда Комитет Национальной Академии Наук по накопленному опыту по ядерной аварии в Фукусиме попросил объяснить эту крошечную цену, персонал Комиссии по ядерному регулированию ответил, что эта цена является оценкой разности цен на атомной электростанции и на альтернативном источнике. Ответ Комиссии по ядерному регулированию на вопрос от Комитета Национальной Академии Наук по накопленному опыту по ядерной аварии в Фукусиме от 24 сентября 2015 года, доступный в Офисе записей с публичным доступом Национальной академии наук, позиция #465.
104. Предполагаемый «крупный выброс» в атмосферу включает 19 ПБк (0,5 МКи) цезия-137. В сценарии французского Института радиационной защиты и ядерной безопасности (IRSN), площадь примерно в 625 км² должна быть загрязнена цезием-137 до 0,59 МБк/м² (16 Ки/км²) и выше. Emmanuel Raimond,

- IRSN, частное сообщение, 4 сентября 2013 года. Выброс от аварии Фукусима Дай-ичи оценивался в 6-20 ПБк (смотрите выше).
105. В Японии в 2011 году доходы от туризма были на 3 миллиарда долларов (около 20%) меньше, чем в среднем за 2010 и 2012 год. Во Франции туризм и экспорт продовольствия ежегодно приносят 60 и 75 миллиардов долларов соответственно. В Соединенных Штатах эти значения соответственно равны 160 и 215 миллиардов долларов. Все значения доходов от туризма и экспорта продовольствия были взяты из таблиц Всемирного Банка: "International tourism, receipts (current US\$)," "Food Exports (percent of merchandise exports)," and "Merchandise exports (current US\$)" for 2014.
 106. Alexander M. and Natalia Danzer, "The Long-Run Consequences of Chernobyl: Evidence on Subjective Well-Being, Mental Health and Welfare," *Journal of Public Economics* 135 (2016): 47-60.
 107. "Japan's Compensation System for Nuclear Damage as Related to the TEPCO Fukushima Daiichi Nuclear Accident," OECD, 2012, 34.
 108. Andy Newman, "Hurricane Sandy vs. Hurricane Katrina," *New York Times*, 27 November 2012; and National Oceans and Atmospheric Administration, "U.S. Billion-dollar Weather and Climate Disasters, 1980-2015," <http://www.ncdc.noaa.gov/billions/events.pdf>.
 109. COMSECY-13-0030, (ссылка 55), v.
 110. In COMSECY-13-0030, 6-7, персонал Комиссии по ядерному регулированию объясняет: "Хотя базовый сценарий [в их анализе затрат и выгод] используется как первичное основание для рекомендаций персонала [не проводить требующегося ускоренного переноса отработавшего топлива], персонал анализировал также дополнительные сценарии, в которых ключевые параметры изменялись для того, чтобы предоставить верхнюю и нижнюю оценки рассчитанной выгоды. Комбинация высоких оценок для важных параметров, примененных в некоторых чувствительных сценариях, представленных в Приложении 1, приведет к большим экономическим последствиям, таким, что рассчитанная выгода от ускоренного переноса отработавшего топлива в сухое хранилище в контейнерах для этих сценариев перевесит связанные расходы ... Тем не менее, даже в этих сценариях появится только ограниченный выигрыш по безопасности при использовании качественных целей по охране здоровья [QHOs], и ожидаемые расходы по реализации не будут оправданы."
 111. U.S. Nuclear Regulatory Commission, "Safety Goals for the Operations of Nuclear Power Plants; Policy Statement," *Federal Register*, 21 August 1986, 30028.
 112. "United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, UNSCEAR 2012 Report," UN, 2015, Table A3.
 113. COMSECY-13-0030, Enclosure 1, (ссылка 55), 3. Отметим, однако, что в рабочей тетради Комиссии по ядерному регулированию для системы радиологической оценки для анализа последствий, RASCAL3.0.5 (NUREG-1889, 2007) пример для пожара отработавшего топлива (стр. 116) приводит 4-суточной дозе более 450 бэр вниз по ветру до 10 миль (16 км).
 114. Для населения США в 316 миллионов в 2013 году, U.S. Centers for Disease Control, "Deaths and Mortality," <http://www.cdc.gov/nchs/fastats/deaths.htm>.
 115. Включая взвешенные эффекты не смертельных раковых заболеваний, Draft NUREG-1530, (ссылка 64).
 116. NUREG-2161, (ссылка 56), Table 33.
 117. <https://www.eia.gov/tools/faqs/faq.cfm?id=207&t=3>
 118. Vicki Bier et al., "Development of an Updated Societal-Risk Goal for Nuclear Power Safety," Proceedings of the Conference on Probabilistic Safety Assessment and Management, Honolulu, Hawaii, 22- 27 June, 2014; and Richard Denning and Vinod Mubayi, "Insights into the Societal Risk of Nuclear Power Plant Accidents," *Risk Analysis*, 16 February 2016 [электронная публикация].
 119. Рекомендации персонала можно найти в COMSECY-13-0030, (ссылка 55), 2. Индивидуальные письменные мнения членов Комиссии можно найти по адресу <http://www.nrc.gov/reading-rm/doc-collections/commission/comm-secy/2013/2013-0030comvtr.pdf>.
 120. "Market-Driven Reactor Shutdowns Threaten Local Economies" (Nuclear Energy Institute Fact Sheet) February 2015; and "Nuclear power plants warn of closure crisis" (*The Hill*, 5 November 2015). Институт ядерной энергии – это лоббирующий инструмент ядерной энергетической отрасли промышленности США.
 121. Примечательное недавнее исключение – это Грегори Яжко, начавший свою публичную политическую карьеру в офисе известного критика ядерной индустрии, тогда члена Палаты представителей и сейчас сенатора Эдварда Марки. Позднее Яжко работал в штабе сенатора от штата Невада и лидера большинства в Сенате Гарри Рейда, организовавшего назначение Яжко в Комиссию в 2005 году. В 2009 году Яжко был назначен администрацией Обамы председателем Комиссии по ядерному регулированию.

нию. Однако, через три года он был вынужден уйти в отставку после столкновений с другими членами Комиссии как по политике, так и по его стилю управления, John Broder and Matthew Wald, "Chairman of N.R.C. to Resign Under Fire," *NewYorkTimes*, 21 May 2012.

122. Личное сообщение от бывшего члена Комиссии.

123. Code of Federal Regulations, Title 10, Part 52, "Licenses, Certifications, and Approvals for Nuclear Power Plants," Section 171, "Finality of manufacturing licenses; information requests," paragraph (a)(1). Смотрите также презентацию по этому поводу, "Adequate Protection in NRC Decision-Making" членом Комиссии по ядерному регулированию Уильямом Остендорффом в Институте ядерной энергии 7 марта 2011 года.

124. "Consideration of Additional Requirements for Containment Venting Systems for Boiling Water Reactors with Mark I and Mark II Containments," U.S. Nuclear Regulatory Commission, SECY-12-0157, 26 November 2012, p. 2. Анализ затрат и выгоды для требования вентиляции с фильтрованием страдал теми же недостатками, обсуждаемыми выше для регулятивного анализа ускоренного перевода отработавшего топлива на хранение в сухих контейнерах. Был сделан вывод, что общие затраты вне площадки для аварии типа Фукусимы в Соединенных Штатах составят примерно 3 миллиарда долларов по сравнению с приблизительно 200 миллиардов долларов в Японии, "Lessons Learned from the Fukushima Nuclear Accident for Improving the Safety of U.S. Nuclear Plants," (ссылка 3), Appendix L.

125. SECY-12-0157, (ссылка 124), Enclosure 3, "Foreign Experience", 19-20. Информация по Китаю, Венгрии, России и Южной Африке отсутствует.

126. Letter to Allison MacFarlane, Chair of the NRC, from Anthony R. Pietrangelo, Senior Vice President and Chief Nuclear Officer of the Nuclear Energy Institute, 25 January 2013.

127. Letter to Allison MacFarlane, Chair of the NRC, from 21 Republican members of the House Committee on Energy and Commerce, 15 January 2013, <https://energycommerce.house.gov/sites/republicans.energycommerce.house.gov/files/letters/20130115NRC.pdf>.

128. Член Комиссии Мэгвудв "Nuclear Regulatory Commission, Decision Item: SECY-120157, Commission Voting Record," 19 March 2013, <http://www.nrc.gov/reading-rm/doc-collections/commission/cvr/2012/2012-0157vtr.pdf>.

129. "HomeFires" (Национальная ассоциация защиты от пожаров, <http://www.nfpa.org/research/reports-and-statistics/fires-by-property-type/residential/home-fires>).