

ЭКОНОМИЧЕСКИЕ ПОТЕРИ ОТ ПОЖАРА В АМЕРИКАНСКОМ БАССЕЙНЕ ДЛЯ ПЛОТНО УПАКОВАННОГО ОТРАБОТАВШЕГО ТОПЛИВА

Фрэнк Н. фон Хиппель и Майкл Шеппнер

АННОТАЦИЯ

В 2013 году персонал Комиссии по ядерному регулированию США оценил сокращение экономических потерь за пределами площадки от пожара в осушенном американском бассейне для отработавшего топлива, если бы топливо, которое охлаждалось более пяти лет, было бы перемещено для хранения в сухих контейнерах – вариант, названный "срочным перемещением". В этой статье показано, что экономия от такого перемещения будет намного больше оценки Комиссии по ядерному регулированию. Экономия увеличится примерно до 2 триллионов долларов, если: будут включены потери за пределами 50 миль (80 км) от аварии; порог загрязнения земли для долгосрочного перемещения населения изменится до значений, использованных для аварий в Чернобыле и Фукусиме, и рекомендованных Агентством по защите окружающей среды США; и, на основании опыта Японии, предполагается, что дезактивация земельных участков до приемлемых для возврата населения уровней займет по меньшей мере четыре года. Если будет реализовано срочное перемещение, то экономические потери за пределами площадки могут быть сокращены примерно на 98%.

Фрэнк Н. фон Хиппель работает по программе науки и всеобщей безопасности Принстонского университета, Принстон, Нью-Джерси, США.

Почтовый адрес для корреспонденций: Frank N. von Hippel, Program on Science and Global Security, 221 Nassau St., 2nd Floor, Princeton, NJ 08542, USA.

Адрес электронной почты: fvhippel@princeton.edu

Майкл Шеппнер работает по программе науки и всеобщей безопасности Принстонского университета, Принстон, Нью-Джерси, США.

Статья получена 19 января 2017 года и принята к публикации 22 марта 2017 года.

ВВЕДЕНИЕ

Авторы предыдущей статьи "Понижение опасности от пожара в бассейнах для отработавшего топлива"¹ (впоследствии Статья 1) анализировали последствия пожара отработавшего топлива в плотно упакованном бассейне после потери воды. Было обнаружено, что персонал Комиссии по ядерному регулированию значительно недооценил радиологические последствия такой аварии. Оценка персонала была произведена как часть анализа затрат и результатов предложения "срочного перемещения", или перемещения отработавшего топлива для хранения в сухих контейнерах после 5 лет охлаждения в бассейне². Недооценка персонала стала частью регулятивного анализа, который привел Комиссию по ядерному регулированию к отклонению предложения на основании двух причин: i) расходы на срочное перемещение будут превышать взвешенные по вероятности результаты; и ii) предложение не будет "существенным усилением безопасности", поскольку взвешенные по вероятности риски для здоровья от атомных электростанций США для проживающих поблизости лиц уже не превышают показатели Количественных целей в области здравоохранения Комиссии по ядерному регулированию.

После публикации Статьи 1 персонал Комиссии по ядерному регулированию раскрыл, что порог радиоактивного загрязнения, используемый в их компьютерной программе для расчета того, где станет необходимо перемещать население был увеличен из-за предположения фактора радиационной защиты, равного 0,18. Как мы покажем, такое предположение повышает порог загрязнения для перемещения до

величины, в три раза превышающей пороги, использованные при авариях в Чернобыле и Фукусиме, и рекомендованные Агентством по защите окружающей среды США. В данной статье представлена оценка влияния этого предположения на расчеты убытков от пожара отработавшего топлива, проведенные персоналом Комиссии по ядерному регулированию.

Представлена также оценка воздействия на расходы от изменения предположения Комиссии по ядерному регулированию того, что на дезактивацию понадобится один год, после чего перемещенное население сможет возвратиться в свои дома и на свои рабочие места. Комиссия по ядерному регулированию признала, что она не смогла найти основание для своего предположения, и что оно не согласуется с опытом префектуры Фукусима, где первые возвращения перемещенного населения в наименее загрязненные части гораздо меньшей запретной площади были разрешены только через 5 лет после аварии³. Как будет показано ниже, если время возвращения будет смещено на четыре года вперед, то экономические потери от временного перемещения населения, рассчитанные по методологии Комиссии по ядерному регулированию, превысят затраты на оставление зараженной площади, т.е. на бессрочное перемещение.

РАДИОАКТИВНЫЕ ВЫБРОСЫ В АТМОСФЕРУ ОТ ПОЖАРА В БАСЕЙНЕ С ОТРАБОТАВШИМ ТОПЛИВОМ

Персонал Комиссии по ядерному регулированию для своих расчетов базового случая использовал атомную электростанцию в округе Сурри, Виргиния, потому что плотность населения в окрестности радиусом 50 миль (80 км) от станции близка к средней для площадок американских реакторов⁴. Представленные ниже расчеты экономических потерь и доз для населения поэтому относятся к пожару отработавшего топлива на площадке Сурри.

В расчете преимуществ в уменьшенных последствиях аварии при переходе от хранения с высокой плотностью к хранению с низкой плотностью в бассейнах отработавшего топлива Комиссия по ядерному регулированию рассчитывала разницу между последствиями пожара в плотноупакованном бассейне и выброса из пожара в бассейне после удаления отработавшего топлива, охлаждавшегося более пяти лет.

В плотно упакованном бассейне после того, как откроется верхний слой отработавшего топлива, химическая реакция пара из испаряющейся воды и горячей циркониевой оболочки отработавшего топлива приведет к образованию водорода, который, по оценкам персонала Комиссии по ядерному регулированию, поднимет свою концентрацию в воздухе над бассейном до взрывоопасного уровня. Взрыв водорода разрушит здание и его способность как защитной оболочки, как это произошло в трех зданиях реакторов во время аварии в Фукусиме из-за взрыва водорода, образовавшегося в непокрытых активных зонах реакторов. В случае пожара в бассейне отработавшего топлива в Соединенных Штатах около двух третей запаса цезия-137 в бассейне, или, по оценкам персонала Комиссии по ядерному регулированию, в среднем 1 600 ПБк (43 мегаКюри), будет выброшено в атмосферу – или примерно в сто раз больше, чем было выброшено из защитных оболочек реакторов в Фукусиме.

После передачи старого отработавшего топлива для хранения в сухих контейнерах средний бассейн будет содержать примерно одну треть цезия-137. Однако, персонал Комиссии по ядерному регулированию оценил, что выброс цезия-137 при пожаре в бассейне низкой плотности будет составлять только 23 ПБк, что соответствует уменьшению более, чем на 98%. Объяснение столь огромного эффекта связано с тем, что персонал обнаружил, что образование водорода в высохшем бассейне низкой плотности будет недостаточно сильным для поднятия концентрации над бассейном до взрывоопасных уровней. Если здание над бассейном останется целым, то, по оценке персонала, в атмосферу будет выброшено только 3% запасов цезия-137 в бассейне по сравнению с двумя третями в случае разрушения покрывающего здания при взрыве водорода⁵.

ВЛИЯНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ЗАЩИТЫ КОМИССИИ ПО ЯДЕРНОМУ РЕГУЛИРОВАНИЮ НА ПОРОГИ ПЕРЕМЕЩЕНИЯ

В первом приближении экономические потери от пожара отработавшего топлива будут пропорциональны численности популяции, перемещаемой из-за радиоактивного загрязнения (см. ниже). Численность перемещаемой популяции зависит от того, какие районы будут считаться непригодными для жизни человека – либо временно, до тех пор, пока они не будут дезактивированы, либо постоянно, когда дезактивация до уровня пригодности для жизни не будет возможной, или когда она будет настолько дорогостоящей, или продлится так долго, что компенсация полной стоимости зараженной собственности обойдется

дешевле, чем оплата дезактивации и многих лет временного перемещения.

При расчете площади района, который станет запретным после пожара отработавшего топлива, персонал Комиссии по ядерному регулированию указал, что он следовал документу Агентства по защите окружающей среды "Руководства по принятию защитных мер и руководство по планированию для радиологических аварий", который рекомендует перемещение населения при риске, превышающем "прогнозируемую дозу за первый год 2 бэр (20 мЗв) [или] прогнозируемую мощность дозы 0,5 бэр/год (5 мЗв/год) за второй и последующие годы"⁶. В своих расчетах Комиссия по ядерному регулированию использовала составной пятилетний порог перемещения в 4 бэр: сумму дозы Агентства по защите окружающей среды за первый год в 2 бэр плюс 0,5 бэр в год за последующие четыре года⁷.

В руководстве Агентства по защите окружающей среды заявлено, что ее рекомендации по дозе "консервативно не принимают в расчет защиту, обеспечиваемую нахождением внутри помещений в части любого дня из прогнозируемых лет"⁸. Однако, невозможность воспроизвести результаты Комиссии по ядерному регулированию привела авторов Статьи 1 к предположению о том, что, возможно, Комиссия по ядерному регулированию предполагала коэффициент защиты. После публикации Статьи 1 стало известно, что персонал Комиссии по ядерному регулированию действительно использовал коэффициент защиты, равный 0,18⁹. Это означает, что средняя доза гамма-излучения, получаемая населением в зараженном радиоактивностью районе, принималась равной 18% от дозы, которая была бы получена вне помещения на плоской поверхности.

Цезий-137 с периодом полураспада в тридцать лет вносит основной вклад в долговременную дозу облучения. В отсутствие защиты прогнозируемая пятилетняя доза облучения Комиссии по ядерному регулированию в 4 бэр преобразуется в уровень загрязнения цезием-137, примерно равный 0,81 МБк/м².¹⁰ Если учесть коэффициент защиты, равный 0,18, то порог загрязнения Комиссии по ядерному регулированию для переселения увеличится до 4,5 МБк/м².

Порог загрязнения для переселения после аварии в Чернобыле составлял примерно 1,5 МБк/м² (40 ки/км²)¹¹. Для аварии в Фукусиме использовалась доза без защиты за первый год, примерно равная 2 бэр (20 мЗв), что совпадает с рекомендуемой Агентством по защите окружающей среды предельной дозе для переселения за первый год¹². В отсутствие защиты этот предел соответствует порогу загрязнения 1,5 МБк/м². Влияние изменения порога переселения с 4,5 МБк/м² до 1,5 МБк/м² на расчет экономических убытков персоналом Комиссии по ядерному регулированию оценивается ниже.

ОЦЕНКИ ЗАГРЯЗНЕННЫХ РАЙОНОВ

Для расчета рассеивания в атмосфере и выпадения радиоактивных осадков использовалась модель HYSPLIT¹³ в предположении 36-часового выброса цезия-137 с постоянной скоростью¹⁴; расчеты проводились в течение семи суток для исторических атмосферных условий, доступных в Национальном центре атмосферных исследований США¹⁵. Выпадение осадков рассчитывалось на сетке размером 30 × 30 градусов с центром в местоположении атомной электростанции Сурри (т.е. около 1700 км к северу и югу, и 1300 км к западу и востоку). Затронутая популяция рассчитывалась с использованием оцениваемого распределения плотности населения США за 2015 год, доступного в Центре социально-экономических данных и приложений НАСА¹⁶. Расчеты проводились для выбросов, начинающихся в первый день каждого месяца 2015 года¹⁷. Модель запускалась для выбросов в 1600 ПБк и 23 ПБк для оценки уменьшения площади запретных районов и численности переселяемой популяции, которые могли бы стать результатом срочного перемещения.

Таблица 1 показывает, в зависимости от порога запрещения, различия в средних площадях запретных районов и численности переселенных популяций для пожаров в бассейнах высокой плотности и малой плотности, а также отношения таких средних площадей и численностей популяций. Для порогов переселения в 1,5 или 4,5 МБк/м² срочное перемещение отработавшего топлива для хранения в сухих контейнерах сокращает площадь запретных районов и численность переселяемых популяций на 98 – 99%. Показанные в таблице 1 значения для различий в площади запретных районов и численности переселяемых популяций поэтому также равны в пределах 2% средним площадям запретных районов и численностям переселяемых популяций для пожара в плотноупакованном бассейне.

Несмотря на применение сильно отличающейся модели рассеяния в атмосфере, оценка персонала Комиссии по ядерному регулированию среднего уменьшения переселяемой популяции из-за срочного перемещения, также показанная в таблице 1, грубо согласуется с результатами, показанными для порога загрязнения для переселения, примерно равного 4,5 МБк/м². Наши вычисления также показывают, что

уменьшение порога запрета до значений для Чернобыля и Фукусимы, а также рекомендуемого уровня Агентства по защите окружающей среды в 1,5 МБк/м², увеличит численность переселяемой популяции в среднем в 2,7 раза, из-за большей площади запретных районов.

Таблица 1. Различия и отношения средних площадей запретных районов и численности переселяемой популяции для выбросов цезия-137 от пожаров в бассейнах высокой и малой плотности (1600 и 23 ПБк соответственно) для американской атомной электростанции Сурри. В скобках показаны диапазоны уменьшений для 12 прогонов. КЯР – Комиссия по ядерному регулированию.

Пороги загрязнения, МБк/м ²	КЯР ¹⁸	4,5	2,5	1,5	1	0,5
Уменьшение средней запретной площади (в 1000 км ²)	31 (14–48)	20 (5,0–49)	30 (7,6–66)	43 (10–83)	56 (17–102)	86 (26–151)
Отношение площади для малых и больших выбросов		0,9%	1,5%	2,0%	2,4%	3,3%
Уменьшение средней переселяемой популяции в миллионах	3,5 (1,3–8,8)	3,0 (0,4–12)	5,5 (0,4–33)	8,1 (1,1–41)	10 (1,3–44)	16 (2,5–48)
Отношение переселяемой популяции для малых и больших выбросов		1,6%	1,7%	1,7%	1,8%	2,0%

УМЕНЬШЕНИЕ РАСХОДОВ ЗА ПРЕДЕЛАМИ ПЛОЩАДКИ И ДОЗ В РЕЗУЛЬТАТЕ СРОЧНОГО ПЕРЕМЕЩЕНИЯ

Персонал Комиссии по ядерному регулированию оценил, что перемещение отработавшего топлива, охлаждавшегося более пяти лет, для хранения в сухих контейнерах будет стоить в среднем 50 миллионов долларов на бассейн из-за более раннего приобретения большего количества контейнеров для сухого хранения¹⁹.

В анализе затрат и результатов Комиссии по ядерному регулированию эти оцененные дополнительные затраты на срочное перемещение сравнивались с взвешенным по вероятности сокращением последствий пожара в бассейне отработавшего топлива²⁰. Уменьшение ущерба умножалось на оцененную среднюю вероятность пожара в 4,3·10⁻⁶ на бассейн за год, и затем на оцененные средние дисконтированные за 10,7 лет оставшейся лицензированной продолжительности эксплуатации реактора²¹. Это приводит к оцененной дисконтированной средней вероятности пожара отработавшего топлива примерно в 5·10⁻⁵ на бассейн во время оставшегося лицензированного срока эксплуатации американских реакторов атомных электростанций. Из рассмотрения была исключена возможность того, что террористический акт может привести к потере воды из бассейна²².

Персонал Комиссии по ядерному регулированию умножил эту оцененную вероятность аварии на свою оценку уменьшения стоимости последствий аварии в 125 миллиардов долларов, чтобы получить взвешенные по средней вероятности и дисконтированные результаты от срочного перемещения для базового варианта в 7 миллионов долларов (от 0,16 до 139 миллионов долларов) на бассейн. Хотя оцененная в 50 миллионов долларов средние затраты на срочное перемещение находятся в пределах диапазона неопределенности для результатов срочного перемещения, персонал ориентировался на среднее значение "базового сценария" и пришел к выводу, что срочное перемещение "невыгодно по затратам"²³.

Однако, персонал отметил, что правила Комиссии по ядерному регулированию для расчета сметы расходов и прибылей требуют, чтобы:

- 1) были исключены последствия аварии за пределами 50 миль (80 км);
- 2) не обновлялась оценка 1995 года выгоды от предотвращенной дозы в 2000 долларов за каждый человеко-бэр;
- 3) было проведено дисконтирование стоимости аварии по отношению к расходам на срочное перемещение по ставке в 7% за год в течение периода от вложения в срочное перемещение до гипотетической аварии.

Поэтому персонал предусмотрел тесты чувствительности к влиянию следующих факторов на рассчитанные результаты срочного перемещения:

- 1) учет последствий аварии до расстояния в 1000 миль (1600 км);

- 2) изменение выгоды от предотвращенной дозы до 4000 долларов за каждый человеко-бэр;
- 3) изменение реальной дисконтной ставки до 2% в год.

Персонал обнаружил, что вместе взятые изменения 1 и 2 увеличат оцениваемое среднее уменьшение ущерба благодаря срочному перемещению от 125 до 700 миллиардов долларов. Из экономии в 700 миллиардов долларов 435 миллиардов приходится на уменьшение дозы для населения примерно на 110 миллионов бэр, и 265 миллиардов – на уменьшение потерь имущества из-за радиационного заражения²⁴.

Комбинированное влияние изменений 1,2 и 3 увеличит взвешенную по вероятности дисконтированную выгоду от срочного перемещения в базовом сценарии до 39 миллионов долларов (1,6 –1124 миллиона долларов), и в базовом сценарии эта сумма станет сравнимой с оцененными в 50 миллионов долларов средними расходами на срочное перемещение²⁵.

Эти вопросы обсуждались в докладе Национальной академии наук, опубликованном в мае 2016 года²⁶. Как обсуждалось выше, после появления данного доклада стали известными еще два дополнительных предположения, сделанных в анализе затрат и результатов Комиссии по ядерному регулированию:

- 1) населенные районы будут дезактивированы в течение одного года; и
- 2) дозы, получаемые населением, будут уменьшены на коэффициент защиты, равный 0,18.

Ниже мы оценим влияние изменения порога заражения для переселения и продолжительности переселения на оценки расходов, сделанные Комиссией по ядерному регулированию. Затем мы оценим влияние изменившегося порога переселения на полную дозу облучения населения и в конце рассчитаем общее влияние данных изменений на оценку Комиссии по ядерному регулированию выгоды срочного перемещения.

Потери из-за переселения

Как отмечалось выше, когда персонал Комиссии по ядерному регулированию увеличил свой 50-миллионный предел в своих расчетах последствий, они рассчитали что расходы на переселение составят 265 миллиардов долларов в ценах 2012 года. Средние расходы на каждого переселенца составили 76 000 долларов²⁷.

Выше было оценено, что численность переселяемого населения возрастет в 2,7 раза, если порог загрязнения уменьшится он величины в 4,5 МБк/м², принятой персоналом Комиссии по ядерному регулированию, до 1,5 МБк/м², порогом для аварии в Чернобыле, и, фактически, для аварии в Фукусиме, и рекомендованной Агентством по защите окружающей среды прогнозируемой дозе для переселения за первый год. Умножая расходы на переселение в 265 миллиардов долларов по оценке Комиссии по ядерному регулированию на указанный коэффициент, получим увеличение расходов до примерно 700 миллиардов долларов.

Второй расчет, который нужно провести, связан с тем, как увеличатся потери на одного переселяемого, если предполагаемая длительность переселения увеличится с одного года до нескольких лет, как это случилось в Японии.

Оценка персонала Комиссии по ядерному регулированию стоимости переселения популяции в расчете на одного человека складывается из четырех составляющих: 1) затрат на само переселение; 2) стоимости дезактивации; 3) потери цены оставляемой собственности; и 4) потери на использование собственности в течение периода переселения.

Затраты на переселение

Выходные данные компьютерных расчетов по программе MACCS2, используемой персоналом Комиссии по ядерному регулированию для своего регулятивного анализа, показывают, что затраты на переселение предполагались равными 12 000 долларов на одного человека. Как отмечалось ранее, предполагалось также, что все переселенное население должно будет вернуться домой через один год. Поэтому предполагается, что 12 000 долларов – это расходы на переселение на одного человека за один год²⁸.

Затраты на дезактивацию

Персонал Комиссии по ядерному регулированию установил свой целевой уровень дезактивации по мощности дозы в 0,5 бэр/год²⁹ что для предполагаемого коэффициента защиты 0,18 должно будет соответствовать уровню загрязнения в течение второго года в 3 МБк/м². Персонал предположил далее, что можно будет провести дезактивацию от в три раза более высокого уровня, т.е. от 9 МБк/м², при затратах в 7 110 долларов на человека, и что можно будет провести дезактивацию от в пятнадцать раз более высокого уровня, т.е. от уровней загрязнения в 45 МБк/м², при затратах в 19 000 на человека³⁰. Основываясь на японском опыте, дезактивация со столь высокого уровня совершенно нереальна. Самое большое уменьшение мощности дозы, достигнутое на открытом воздухе в жилых районах префектуры Фукусима, составляло около трех раз³¹. Однако, площадь, загрязненная до столь высокого уровня, будет сравнительно малой. Поэтому здесь ею можно пренебречь и предположить, что расходы на дезактивацию будут равны 7 110 долларов на человека по всей зоне переселения.

Потери стоимости собственности и потери от ее неиспользования

Комиссия по ядерному регулированию основывала свою оценку убытков на душу населения от потери доступа к своей собственности при переселении на стоимости сельскохозяйственной и не сельскохозяйственной собственности в США в расчете на душу населения³². Поскольку общая стоимость сельскохозяйственных активов в 1997 году составляла всего 4% от стоимости не сельскохозяйственных активов³³, в дальнейшем обсуждении ею пренебрегалось. Общая стоимость производственных активов (т.е. не включающих стоимость не мелиорированной земли) США в 2009 году оценивалась в 48,5 триллиона долларов, или 158 000 долларов на душу населения³⁴. Используя индекс потребительских цен для расчета инфляции в период с 2009 по 2012 год, можно рассчитать стоимость собственности на душу населения в 2012 году, которая будет равна (не включая землю) 168 000 долларов³⁵. Это близко к величине в 172 000 долларов на душу населения, полученной по методологии Комиссии по ядерному регулированию³⁶. Кроме того, в 2000 году стоимость не мелиорированной земли в США оценивалась в 17% от стоимости американских производственных активов³⁷. Ниже предполагается, что в 2012 году это отношение осталось таким же, и тогда учет стоимости земли увеличит среднюю стоимость собственности на душу населения примерно до 200 000 долларов.

Персонал Комиссии по ядерному регулированию корректировал среднюю стоимость собственности на душу населения в каждом округе, умножая среднее значение стоимости на душу населения по всей стране на отношение дохода на душу населения в округе к среднему доходу на душу населения по всей стране³⁸. Для целей грубой оценки мы предполагаем, что в каждом округе стоимость активов на душу населения равна средней стоимости по всей стране³⁹.

Персонал предполагал, что потеря стоимости ("амортизация") не земельной собственности в течение периода переселения составляет 20% в год. Кроме того, они оценивали потерю использования собственности, включая земельную, в 12% от ее полной стоимости за год⁴⁰. Расчет амортизации за t лет делается, умножая стоимость производственных активов на душу населения в 172 000 долларов на коэффициент $[1 - \exp(-0,2 \cdot t)]$. Исходя из этого, потери из-за амортизации за один год будут равны 31 000 долларов. Умножая общую стоимость собственности на душу населения в 200 000 долларов на 12% в год, получим убытки от не использования земли в 24 000 долларов в год. Общая стоимость расходов из-за переселения за один год поэтому будет равна 12 000 долларов за само переселение, плюс 7 110 долларов за дезактивацию, плюс 31 000 долларов за амортизацию, плюс 24 000 долларов из-за не использования, что в сумме дает 74 110 долларов, что близко к оценке в 76 000 долларов, приведенной Комиссией по ядерному регулированию.

Если проводить расчеты для переселения на 3 или 4 года, то расходы на само переселение, рассчитываемые так же, как и выше, станут равными 36 000 или 48 000 долларов, убытки из-за амортизации будут равны 78 000 или 95 000 долларов, и убытки из-за невозможности использования станут равными 72 000 или 96 000 долларов. Включая приблизительно 7 000 долларов на дезактивацию, общая сумма составит 193 000 или 246 000 долларов. В начале четвертого года общие убытки превысят общую стоимость активов. В этом случае персонал Комиссии по ядерному регулированию мог бы ограничить убытки на душу населения общей стоимостью запрещенной собственности в 200 000 долларов, в 2,6 раза превышающей оценку потерь из-за перемещения на один год в 76 000 долларов. Принимая во внимание темпы дезактивации в Японии и тот факт, что персонал Комиссии по ядерному регулированию не смог предложить ника-

кого обоснования своему предположению о дезактивации за один год⁴¹, представленная оценка кажется более правдоподобной. В самом деле, эта оценка, вероятно, является минимальной, поскольку, как и в Японии, может быть решено, что оставление такой большой площади будет неприемлемым, и работы по дезактивации будут длиться на много лет дольше, чем это диктует чисто экономическая логика.

Умножение убытков в 700 миллиардов долларов на 2,6 увеличит данную сумму примерно до 1,9 триллиона долларов.

В качестве проверки чувствительности мы рассмотрим, какое влияние будет оказано на эту оценку убытков, если дезактивация с уменьшением мощности дозы в три раза на сильнее всего загрязненных площадях будет проведена намного быстрее, чем в Японии, т.е. в течение одного или двух лет. В таком случае население из районов, первоначально зараженных до 4,5 МБк/м² и дезактивированных до 1,5 МБк/м², сможет вернуться в свои дома и на места работы после этого периода. По данным из таблицы 1 можно видеть, что в среднем, из 8,1 миллиона человек, переселяемых из районов с загрязнением более 1,5 МБк/м², 3 миллиона, т.е. 37% переселяется из районов с загрязнением более 4,5 МБк/м²; для этой части населения мы предполагаем полную потерю их собственности, т.е. в 2,6 раза больше оценки Комиссии по ядерному регулированию, как это было рассчитано ранее. Оставшиеся 5,1 миллиона человек, или 63%, могут возвратиться в районы, которые были дезактивированы до безопасных уровней. Если они вернуться назад через один год, то их убытки на душу населения будут такими же, как это было рассчитано Комиссией по ядерному регулированию. Если они вернутся назад через два года, то их убытки на душу населения будут в 1,67 раза больше того, что предполагала Комиссия по ядерному регулированию для возвращения через один год. Взвешенный по популяции множитель для оценки Комиссии по ядерному регулированию будет поэтому равен 1,59 или 2,01, а соответствующие экономические потери уменьшатся с 1,9 до 1,1–1,4 триллиона долларов.

Сокращение вызванных радиацией раковых заболеваний

Персонал Комиссии по ядерному регулированию добавил к своей оценке экономических потерь от срочного перемещения оценку выигрыша от сокращения вызванных радиацией раковых заболеваний. Согласно повторяющимся обзорам Национальной академии наук, для низких доз и мощностей доз ионизирующего излучения, таких, как от загрязнения земли цезием-137, факты лучше всего поддерживают "линейную гипотезу", согласно которой количество раковых заболеваний будет линейно пропорционально популяционной дозе, т.е. сумме индивидуальных доз радиации⁴². Популяционная доза является суммой трех компонентов: 1) дозы, получаемой переселенной популяцией после ее возвращения в дезактивированные районы; 2) популяционной дозе радиации за пределами области выселения, границу которой персонал Комиссии по ядерному регулированию определил как 4,5 МБк/м², а мы предполагаем, что она соответствует контуру загрязнения в 1,5 МБк/м²; и 3) дозы переселенной популяции в течение периода переселения. Доза для ракового заболевания рассчитывается как доза за 50 лет. В отсутствие защиты для уровня загрязнения 1 МБк/м² доза радиации за 50 лет будет равна 13,1 бэр. Однако, внутри помещения, где большинство людей проводит большую часть времени, доза будет меньше. Хотя персонал Комиссии по ядерному регулированию в своем анализе затрат и результатов использовал средний коэффициент защиты, равный 0,18, в других источниках рекомендуется "наилучшее практическое" значение 0,33⁴³.

Для того, чтобы воспроизвести оценку популяционной дозы Комиссии по ядерному регулированию в 110 миллионов бэр, предполагалось, что после дезактивации уровень загрязнения внутри контура 4,5 МБк/м² однороден. Тогда средняя доза за 50 лет для трех миллионов человек внутри этого контура для коэффициента защиты Комиссии по ядерному регулированию 0,18 будет равна 32 миллионам человеко-бэр. За пределами этого контура средняя популяционная доза в 61 миллион человеко-бэр рассчитывалась с помощью программы HYSPLIT; суммарная доза составила 93 миллиона человеко-бэр. Принимая во внимание различие в моделях рассеяния, эту оценку можно считать обоснованно близкой к оценке Комиссии по ядерному регулированию.

Для бессрочной эвакуации из внутренней части контура загрязнения в 1,5 МБк/м² консервативно предполагается, что переселенное население получает нулевую дозу, а для расчета популяционной дозы за пределами контура 1,5 МБк/м² применяется "практически наилучший" коэффициент защиты 0,33. Это приводит к популяционной дозе около 50 миллионов человеко-бэр. Используя рекомендуемый персоналом Комиссии по ядерному регулированию обновленное значение стоимости предотвращенного ракового заболевания в 5 100 долларов на бэр⁴⁴, выигрыш от сокращения раковых заболеваний при срочном перемещении в денежном выражении составит примерно 270 миллиардов долларов. Поскольку предполага-

лось, что бессрочно переселяться будет значительно большая популяция (8,1 миллиона против 3 миллионов человек), эта сумма меньше, чем рассчитанная Комиссией по ядерному регулированию, которая предполагала экономию в 4000 долларов на бар и коэффициент защиты в 0,18 (смотрите выше).

Суммарная выгода

Добавив выгоду в 270 миллиардов долларов от уменьшенной популяционной дозы к сокращению экономических убытков в 1,9 триллиона долларов, мы получим оценку общего выигрыша от срочного перемещения в случае пожара в бассейне отработавшего топлива примерно в 2,2 триллиона долларов в ценах 2012 года, если дезактивация потребует по меньшей мере 4 лет и потери для популяции внутри контура в 1,5 МБк/м² будут равны полной стоимости их собственности. Если область между контурами в 1,5 МБк/м² и 4,5 МБк/м² будет дезактивирована и повторно заселена в течение одного или двух лет, то выигрыш уменьшится до 1,4 или 1,7 триллиона долларов соответственно.

Эти значения превышают сумму в 125 миллиардов долларов, используемую Комиссией по ядерному регулированию в ее анализе затрат и результатов, от 11 до 18 раз. Умножая на среднюю дисконтированную вероятность пожара в бассейне с отработавшим топливом в $5 \cdot 10^{-5}$ на бассейн в течение следующих 20 лет (смотрите выше), мы получаем среднюю, взвешенную по вероятности, дисконтированную выгоду от 70 до 110 миллионов долларов. Это превышает среднюю оценку персонала Комиссии по ядерному регулированию в 50 миллионов долларов на бассейн для средних расходов на срочное перемещение. Учет избегаемых психологических и других косвенных расходов за пределами зоны переселения еще более увеличит выгоду⁴⁵. Однако, так же, как и в расчетах Комиссии по ядерному регулированию, существует широкий диапазон неопределенности взвешенной по вероятности выгоды из-за большого диапазона неопределенности в оцениваемой вероятности пожара в бассейне для отработавшего топлива, включая возможность успешной террористической атаки.

Реалистический индикатор величины недооценки Комиссией по ядерному регулированию последствий ядерных аварий можно получить из ее оценки экономического влияния радиоактивных выбросов масштаба Фукусимы в Соединенных Штатах. Она была получена в части другого исследования политических вариантов после аварии в Фукусиме, в которой персонал Комиссии по ядерному регулированию исследовал расходы и выгоду от установки фильтров на воздушных клапанах американских реакторов на кипящей воде с защитной оболочкой небольшого объема⁴⁶. Если потребуются сбросить давление газа внутри защитной оболочки – как это требовалось на Фукусиме – то система фильтров могла бы очистить выпускаемый газ от радиоактивных частиц и растворимых газов, в том числе и цезия-137. В анализе затрат и результатов Комиссии по ядерному регулированию варианта с фильтрованием выброса, в базовом случае не фильтруемый выброс оценивался как 1,3% от запаса цезия-137 в одном из реакторов Пич Боттом, или около 5 ПБк⁴⁷, что сравнимо с комбинированным выбросом в 6–20 ПБк от суммарного выброса от трех расплавлений активной зоны на Фукусиме⁴⁸. Персонал Комиссии по ядерному регулированию оценил экономические потери от выброса за пределами площадки в 1,9 миллиарда долларов⁴⁹. Официальная оценка расходов на дезактивацию и компенсации для аварии в Фукусиме на декабрь 2016 года была в 60 раз больше, или 13,5 триллиона иен (около 117 миллиардов долларов)⁵⁰.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Если применить срочное перемещение в американских бассейнах для отработавшего топлива, то средние оцениваемые экономические потери от пожара отработавшего топлива можно будет уменьшить на 98%, или на 2,2 триллиона долларов. Этот результат был получен с использованием методологии Комиссии по ядерному регулированию для расчетов ущерба, начиная с оценки ее персоналом последствий снятия 50-мильного предела Комиссии по ядерному регулированию (или 80 км). Были исправлены два фактора в этом вычислении персонала: 1) критерий переселения популяции был скорректирован для порога загрязнения, использованного для запрета после аварий в Чернобыле и Фукусиме, и рекомендованного Агентством по охране окружающей среды, и 2) длительность переселения популяции была исправлена до четырех лет, что все еще остается меньше, чем в Фукусиме. Оцененная выгода от уменьшения вызванных радиацией раковых заболеваний была меньше, чем оценка персонала Комиссии по ядерному регулированию, из-за большей переселяемой популяции в результате меньшего порога загрязнения для запрета.

В случае действительного пожара в бассейне для отработавшего топлива экономические убытки бу-

дуг больше, или меньше среднего значения, в зависимости от погодных условий во время события. При пороге запрета в 1,5 МБк/м² и 12 недель исторической погоды в округе Сурри, оцениваемый размер переселяемой из-за пожара в бассейне высокой плотности популяции, и, следовательно, экономические убытки, меняются от 7 раз меньше среднего до 5 раз больше среднего. При рассчитанном выше среднем значении в 1,9 триллиона долларов это соответствует диапазону изменений только от погодных условий, от 0,3 до 10 триллионов долларов. Этот диапазон может еще более расшириться, если вычисления будут сделаны для различных площадок с различными окружающими популяциями. Одним из индикаторов чувствительности к площадке служит тот факт, что средняя переселяемая популяция для Пич Боттом, площадки на уровне 90 перцентилей в отношении популяции в радиусе 50 миль, примерно вдвое больше, чем для Сурри, представляющей среднее значение⁵¹.

Два триллиона долларов в 16 раз больше оценки в 125 миллиардов долларов уменьшения ущерба в радиусе 50 миль (80 км), используемой Комиссией по ядерному регулированию в ее анализе затрат и результатов для срочного перемещения. Такая коррекция представляет собой убедительное оправдание для пересмотра отказа Комиссии по ядерному регулированию от варианта срочного перемещения.

ПРИМЕЧАНИЯ И ССЫЛКИ

1. F. von Hippel and M. Schoeppner, "Reducing the Danger from Fires in Spent Fuel Pools," *Science & Global Security* 24(2016): 141-173.
2. "Staff Evaluation and Recommendation for Japan Lessons-Learned Tier 3 Issue on Expedited Transfer of Spent Fuel," U.S. Nuclear Regulatory Commission, COMSECY-13-0030, 2013.
3. Ministry of the Environment, Japan, "Progress on off-site Cleanup and Interim Storage in Japan," December 2016.
4. COMSECY-13-0030, 98-99. (ссылка 2)
5. Средние выбросы, взвешенные по бассейну, базируются на COMSECY-13-0030, Tables 35 and 52.(ссылка 2)
6. "Protective Action Guides and Planning Guidance for Radiological Incidents," U.S. Environmental Protection Agency, 2016, Table 1-1. Цитируемое руководство то же самое, что и в предыдущем издании (1992 года), цитированном в COMSECY-13-0030, Table 59. (ссылка 2)
7. COMSECY-13-0030, Table 60. (ссылка 2)
8. "Protective Action Guides and Planning Guidance for Radiological Incidents," 10. (ссылка 6)
9. E-mail to FvH from William Reckley, Advanced Reactor Program, Office of New Reactors, U.S. NRC, 13 December 2016.
10. Первоначальная наземная мощность дозы при уровне загрязнения цезием-137 1 МБк/м² равна 1,75 бэр/год, Eckerman, K. F., and Jeffrey Clair Ryman. "External exposure to radionuclides in air, water, and soil: exposure-to-dose coefficients for general application, based on the 1987 federal radiation protection guidance," Washington, D.C.: U.S. Environmental Protection Agency, Office of Radiation and Indoor Air, 1993. Функция "выветривания" (т.е., коэффициент ослабления из-за проникновения цезия-137 в грунт), использованная в программе Комиссии по ядерному регулированию MELCOR Accident Consequence Code System 2 (MACCS2), равна $0,5 \cdot \exp(-t/0,73) + \exp(-t/128)$ где t измеряется в годах, "Spent Fuel Pool Study (SFPS) MACCS2 Output Fields," <http://pbadupws.nrc.gov/docs/ML1328/ML1328A535.html>, ML1328A564, LNT 3.4 High Density, 13 November 2012. При расчете интегральных доз эта функция выветривания умножается на экспоненциальный коэффициент, соответствующий 30-летнему периоду полураспада цезия-137.
11. "Sources and Effects of Ionizing Radiation 2000," Vol. II, Annex J. Exposures and effects of the Chernobyl accident. Vienna: UNSCEAR. Table 8.
12. "Progress on off-site Cleanup and Interim Storage in Japan," slide 4. (ссылка 3)
13. A.F. Stein et al. "NOAA's HYSPLIT atmospheric transport and dispersion modeling system," *Bulletin of the American Meteorological Society* 96 (2015): 2059-2077.
14. Комиссия по ядерному регулированию выложила в сеть результаты расчетов по программе MACCS2, на которых основаны оценки последствий в документе COMSECY-13-0030 (ссылка 2). Варианту большого выброса соответствует ML1328A564, LNT 3.4 High Density, 13 November 2012, для которого мощность выброса относительно постоянна в интервале 31,4 часа. Смотрите стр. 8, строки 635-698 для интервалов выбросов и стр. 13-14 для количества, выброшенного в каждом интервале.
15. S. Saha et al., "NCEP Climate Forecast System Version 2 (CFSv2) 6-hourly Products," Research Data Ar-

- chive at the National Center for Atmospheric Research, Computational and Information Systems Laboratory, 2011, <https://doi.org/10.5065/D61C1TXF>. Данные представлены на сетке с шагом 0,5 градуса и на 37 уровнях давления.
16. Gridded Population of the World, Version 3 (GPWv3): Population Density Grid. Palisades, NY: NASA Socio-economic Data and Applications Center, <https://doi.org/10.7927/H4XK8CG2>. Данные представлены на сетке с шагом 0,04 градуса.
 17. После семи суток моделированного выпадения осадков в среднем 83% (36–99%) выброшенной радиоактивности выпало на сетке размером 30°×30°, в среднем 44% (10–99%) на суше и в среднем 39% (1–82%) над Атлантикой из-за прибрежного расположения округа Сурри. Мы полагаем, что большая часть активности, не выпавшая на сетке, была сдута господствующими над Атлантикой восточными ветрами за пределы сетки.
 18. Значения Комиссии по ядерному регулированию цитируются в докладе Национальных академий наук, “Lessons learned from the Fukushima nuclear accident for improving safety and security of U.S. nuclear plants. Phase 2,” 2016, Table 7.2.
 19. Из-за пределов, установленных на температуру оболочки хранящегося отработавшего топлива, в каждом контейнере можно будет разместить меньше топлива, охлаждавшегося пять лет, чем топлива, охлаждавшегося 25 лет. Более раннее приобретение контейнеров также увеличивает их вес в расчетах расходов Комиссии по ядерному регулированию. Для дисконтной ставки в 7% в год базового варианта Комиссии по ядерному регулированию приобретение контейнера на 20 лет раньше увеличивает его вес в расчетах затрат в четыре раза. Однако, в COMSECY-13-0030, Table 9 (ссылка 2) расходы, как представляется, относительно нечувствительны к изменению дисконтной ставки от 7 до 2% в год. Мы не смогли воспроизвести расчеты расходов, проведенные персоналом Комиссии по ядерному регулированию с точностью, лучшей, чем до множителя 2. Мы попросили сотрудников Комиссии по ядерному регулированию, производивших расчеты затрат и результатов, помочь нам, но в то время, когда статья была направлена в печать, мы все еще не получили ответа.
 20. Во всех случаях цитируемые здесь средние значения усреднены по бассейнам для четырех классов реакторов, рассмотренных в документе COMSECY-13-0030. (ссылка 2)
 21. COMSECY-13-0030, Tables 43 and 1. (ссылка 2) Усредненный по бассейнам остающийся лицензированный срок службы реакторов равен 20,5 годам, но этот срок сокращается на 7% в год из-за того, что выгода от уменьшенных последствий будет получена позже, чем будут произведены инвестиции в дополнительные сухие контейнеры, и предполагается, что если не будет инвестиций в сухие контейнеры, то владельцы атомных электростанций смогут реализовать свой реальный доход в 7% в год на фондовой бирже, там же., 70.
 22. COMSECY-13-0030, 8. (ссылка 2)
 23. COMSECY-13-0030, Table 10. (ссылка 2)
 24. “Lessons Learned from the Fukushima Nuclear Accident,” Table 7.2. (ссылка 18)
 25. Средние значения, усредненные по бассейнам, приведены в COMSECY-13-0030, Tables 27-30. (ссылка 2) Нижние и средние значения соответствуют дисконтной ставке в 7% (ставка базового варианта персонала), высокие значения приведены для дисконтной ставки в 2%.
 26. “Lessons Learned from the Fukushima Nuclear Accident, Phase 2,” Chapter 7. (ссылка 18)
 27. “Lessons Learned from the Fukushima Nuclear Accident, Phase 2,” Table 7.2. (ссылка 18)
 28. “POPCST” (расходы на переселение популяции) ML13282A564, LNT 3.4 High Density, 13 November 2012, 92, Record #30. Смотрите также обсуждение в *Code Manual for MACCS2: Volume 1, User’s Guide*, 3-13, где стоимость приравнивалась к суточным выплатам в течение переселения.
 29. ML13282A564, LNT 3.4 High Density, 13 November 2012, 92, Record #7.
 30. “CDNFRM” (расходы на дезактивацию, не сельскохозяйственные) ML13282A564, LNT 3.4 High Density, 13 November 2012, 92, Records #17 and #18.
 31. Tetsuo Yasutaka and Wataru Naito, “Assessing cost and effectiveness of radiation decontamination in Fukushima Prefecture, Japan,” *Journal of Environmental Radioactivity* 151(2016): 512-520, Table 1.
 32. База данных для цены собственности Комиссии по ядерному регулированию подготовлена в документе “SECPop2000: Sector Population, Land Fraction, and Economic Estimation Program” (NRC, NUREG-6525, Rev. 1, 2003). Значения 1997 года были экстраполированы на 2002 год и пересчитаны на 2011 год с множителем 1,25, COMSECY-13-30, 99. (ссылка 2)
 33. SECPop2000, Table 5.7, 55. (ссылка 32)
 34. “Statistical Abstracts of the United States, 2012,” Tables 2 and 723.

35. Индекс потребительских цен от Бюро трудовой статистики, "CPI Detailed Report," November 2016, Table 24.
36. Средняя величина стоимости собственности по стране в целом, приведенная в "SECPOP2000," Table 5.7, неверна. Мы пересчитали ее, используя уравнение 5-2 из SECPOP2000, и исходные данные из SECPOP2000, Table 5.7. (ссылка 32)
37. "Decennial Census of Housing-Based price index: aggregate land data, annual, 1930-2000," Lincoln Institute of Land and Policy, <http://datatoolkits.lincolninst.edu/subcenters/land-values/price-and-quantity.asp>.
38. "SECPOP2000," 55. (ссылка 32)
39. Данные по среднему доходу на душу населения по округам собираются Бюро экономического анализа министерства торговли США. В 2015 году в медианном округе доход на душу населения составлял 44 700 долларов, и 90% населения проживало в округах с доходом на душу населения от 71% до 164% от этого значения, по данным Бюро экономического анализа, <http://www.bea.gov/iTable/iTable.cfm?reqid=70&step=1&isuri=1&acrdn=7#reqid=70&step=25&isuri=1&7022=20&7023=7&7024=non-industry&7033=-1&7026=xx&7027=2015&7001=720&7028=-1&7031=xx&7040=-1&7083=levels&7029=20&7090=70>.
40. Ценовая модель представлена в *Code Manual for MACCS2: Volume 1, User's Guide*. Мы получили предположения Комиссии по ядерному регулированию для ставки амортизации (DPRATE) и скорости возврата (DSRATE) из документа ML13282A564, LNT 3.4 High Density, 13 November 2012, 92, Records #28 and #29.
41. U.S. NRC, "Memorandum and Order in the Matter of Entergy Nuclear Operations, Inc. (Indian Point Nuclear Generating Units 2 and 3)" 4 May 2016, 39.
42. Самый новый обзор представлен в докладе Национальной академии наук "Health Risks from Exposure to Low Levels of Ionizing Radiation" BEIR VII, Phase 2, 2006, 6-8.
43. U.S. NRC, "MACCS Best Practices as Applied in the State-of-the-Art Reactor Consequence Analyses (SOARCA) Project," NUREG/CR-7009, 2014, Table 4.14, entry for "Normal Activity Shielding Factor for all but Cohort 4," (институционализированные популяции).
44. U.S. NRC, "Reassessment of NRC's Dollar Per Person-Rem Conversion Factor Policy," NUREG-1530, Rev. 1, Draft Report for Comment, 2015, 22.
45. Обсуждение денежного эквивалента психологического ущерба смотрите в "Lessons Learned from the Fukushima Nuclear Accident, Phase 2," 181-183. (ссылка 18). Обсуждение других косвенных затрат, не рассмотренных Комиссией по ядерному регулированию, смотрите в Phase 1 report, Appendix L. (ссылка 49)
46. U.S. NRC, "Consideration of Additional Requirements for Containment Venting Systems for Boiling Water Reactors with Mark I and Mark II Containments," SECY-12-0157, 2012.
47. SECY-12-0157, Enclosure 5b, Table 2, (ссылка 46) базовый вариант показывает выброс в 1.3%. Мы предполагаем запас цезия-137 в каждом из реакторов Пич Боттом в 374 ПБк на основании документа U.S. NRC, "State-of-the-Art Reactor Consequence Analyses Project: Peach Bottom Integrated Analysis," NUREG/CR-7110, Rev. 1, 2012, Vol. 1, Table A-3.
48. United Nations, "Report of the United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation," UNSCEAR 2013, Vol. I, Scientific Annex A, para. 25.
49. SECY-12-0157, Enclosure 5C, Table 7, Case 2. (ссылка 46) Смотрите также обсуждение в докладе Национальной Академии Наук "Lessons Learned from the Fukushima Nuclear Accident for Improving Safety and Security of U.S. Nuclear Plants, Phase 1," 2014, Appendix L.
50. Yuka Obayashi and Kentaro Hamada, "Japan nearly doubles Fukushima disaster-related cost to \$188 billion" Reuters, 9 December 2016. Эта сумма включает в себя 8 триллионов иен (примерно 80 миллиардов долларов) для вывода из эксплуатации атомной электростанции Фукусима Даичи. Дополнительные подробности можно найти в сети, смотрите <http://www.jiji.com/jc/article?k=2016120900050&g=eco> (на японском языке).
51. На основании сравнения таблицы 1 в этой статье с таблицей 3 в Статье 1 для порога переселения в 1,5 МБк/м².