

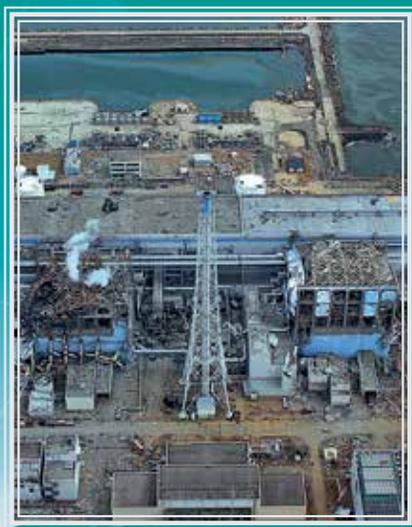


ИБРАЭ

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК
Институт проблем безопасного развития атомной энергетики

Труды ИБРАЭ

АВАРИЯ НА АЭС «ФУКУСИМА-1»: ОПЫТ РЕАГИРОВАНИЯ И УРОКИ



НАУКА

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК
Институт проблем безопасного развития атомной энергетики

ТРУДЫ ИБРАЭ

Под общей редакцией члена-корреспондента РАН
Л. А. Большова

Выпуск 13

АВАРИЯ НА АЭС «ФУКУСИМА-1»: ОПЫТ РЕАГИРОВАНИЯ И УРОКИ

Научный редактор
профессор, доктор физико-математических наук
Р. В. Арутюнян

Москва Наука 2013

УДК 621.039
ББК 31.4
Т78

Рецензенты:

академик РАН А. А. Саркисов,
кандидат технических наук Р. М. Бархударов

Труды ИБРАЭ РАН / под. общ. ред. чл.-кор. РАН Л. А. Большова ; Ин-т проблем безопасного развития атомной энергетики РАН. — М. : Наука, 2007—

Вып. 13 : Авария на АЭС «Фукусима-1»: опыт реагирования и уроки / науч. ред. Р. В. Арутюнян. — 2013. — 246 с. : ил. — ISBN 978-5-02-038468-2 (в пер.).

В настоящем издании представлены результаты оценки и прогнозирования развития аварии на АЭС «Фукусима-1», ее радиационных последствий для населения и территорий Японии и Российской Федерации, выполненные непосредственно после 11 марта 2011 г., в острый период. Проведено сравнение прогнозных оценок с фактическими данными по состоянию на конец 2012 г.

Для специалистов в области безопасности АЭС, радиационной безопасности и защиты населения и территорий, а также для студентов и аспирантов.

Proceedings of IBRAE RAS / Ed. by L. A. Bolshov ; Nuclear Safety Institute (IBRAE) RAS. — Moscow : Nauka, 2007—

Issue 13 : Accident at «Fukushima-1» NPP: response experience and lessons [in Russian] / Ed. by R. V. Arutyunyan. — 2013. — 246 p. : ill. — ISBN 978-5-02-038468-2 (bound).

In this book, we present the results of evaluation and prediction of the accident development at the "Fukushima-1" NPP and its radiation consequences for the population and territories of Japan and Russia completed immediately following March 11, 2011, within the acute period. Predictions are compared against the actual data as of the end of 2012.

Aimed at the experts in the problems of NPP safety, radiation safety, and protection of the population and territories. Recommended for students and postgraduates.

ISBN 978-5-02-038468-2

- © Продолжающееся издание «Труды ИБРАЭ РАН», 2007 (год основания), 2013
- © Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН, 2013
- © Коллектив авторов, 2013
- © ООО «Комтехпринт», 2013
- © Редакционно-издательское оформление. Издательство «Наука», 2013





Р. В. Арутюнян
руководитель
ТКЦ ИБРАЭ РАН



О. А. Павловский
руководитель экспертной группы
ТКЦ ИБРАЭ РАН



Совещание группы экспертов ТКЦ ИБРАЭ РАН
по оценке воздействия радиационной аварии на здоровье населения
слева направо: Е. Л. Серебряков, м.н.с.; В. П. Меркушов, с.н.с.;
А. В. Зарянов, инженер; Д. В. Арон, м.н.с.; Р. И. Бакин, зав. лаб.;
О. А. Павловский, к.т.н., зам. зав. отд., С. Н. Краснопёров, н.с.; А. В. Шикин, с.н.с.;
А. Л. Фокин, с.н.с.; А. В. Капустин, м.н.с.; Д. Ю. Томащик, инженер;
Д. А. Припачкин, к.ф-м.н., н.с.; С. В. Панченко, с.н.с.;
Р. В. Арутюнян, д.ф-м.н., зам. директора



В. Ф. Стрижов
заместитель директора
ИБРАЭ РАН



А. Е. Киселев
заведующий отделением
ИБРАЭ РАН



Совещание группы экспертов ТКЦ ИБРАЭ РАН
по моделированию аварий на АЭС, слева направо:
сидят: В.Ф. Стрижов, д.ф-м.н., зам. директора; Д. Ю. Томащик, инженер;
стоят: Н. А. Мосунова, к.ф-м.н., зав. отд-ем; С. В. Цаун, к.ф-м.н., зав. лаб.;
А. Е. Киселев, д.т.н., зав. отд-ем; К. С. Долганов, к.т.н., зав. лаб.

Содержание

Введение	8
Авария на АЭС «Фукусима-1»: оперативный прогноз и оценка радиационных и радиологических последствий <i>Р. В. Арутюнян, О. А. Павловский, С. В. Панченко, С. Н. Красноперов, Е. Л. Серебряков</i>	15
Результаты экспресс-расчетов тяжелой аварии на АЭС «Фукусима-1» при помощи кода СОКРАТ <i>К. С. Долганов, А. В. Капустин, А. Е. Киселев, Н. А. Мосунова, В. Д. Озрин, Д. Ю. Томащук, В. Ф. Стрижов, С. В. Цаун, Т. А. Юдина</i>	67
Анализ работы систем безопасности во время аварии на энергоблоках № 2 и 3 АЭС «Фукусима-1» и пути совершенствования подходов к анализу тяжелых аварий <i>К. С. Долганов, А. Е. Киселев, Д. Ю. Томащук, Т. А. Юдина</i>	80
Зависимость от выгорания накопления ^{134}Cs и ^{137}Cs в активной зоне блока № 2 АЭС «Фукусима-1» <i>Р. И. Бакин, А. Е. Киселев, В. И. Тарасов, С. В. Панченко, С. В. Цаун, А. В. Шикин</i>	102
Некоторые результаты по моделированию радиационной обстановки и оценке источника аварийного выброса на АЭС «Фукусима-1» с учетом трехмерных полей метеоданных <i>Р. В. Арутюнян, Р. И. Бакин, Л. А. Большов, Д. В. Дзама, Д. А. Припачкин, В. Н. Семенов, О. С. Сороковикова, А. Л. Фокин, С. В. Цаун, А. В. Шикин, Р. М. Вильфанд, Р. Ю. Игнатов, К. Г. Рубинштейн, М. М. Смирнова</i>	113
Анализ зависимости возможных социально-экономических последствий аварии на АЭС «Фукусима-1» от критериев вмешательства <i>Д. В. Арон, Р. В. Арутюнян, Л. А. Большов, С. В. Панченко, Д. Н. Токарчук</i>	138

Оценки возможных доз облучения населения Японии в результате аварии на АЭС «Фукусима-1» на основе чернобыльского опыта <i>О. А. Павловский, С. В. Панченко, Е. Л. Серебряков</i>	154
Функционирование ТКЦ ИБРАЭ РАН в начальной фазе аварии на АЭС «Фукусима-1» <i>Р. В. Арутюнян, Л. А. Большов, С. И. Воронов, А. Е. Киселев, С. Н. Красноперов, О. А. Павловский, С. В. Панченко, Д. А. Припачкин, В. Ф. Стрижов</i>	172
Использование комплекса моделей POMRad для моделирования распространения радиоактивных веществ в морской среде после аварии на АЭС «Фукусима-1» <i>А. Л. Крылов, А. В. Носов, В. П. Киселев</i>	197
Актуальные задачи совершенствования готовности к реагированию на чрезвычайные ситуации радиационного характера <i>Р. В. Арутюнян, Л. А. Большов, О. А. Павловский</i>	215

Введение

Выход настоящего сборника статей сотрудников Института проблем безопасного развития атомной энергетики Российской академии наук (ИБРАЭ РАН) приурочен к двухлетию событий на АЭС «Фукусима-1» в Японии. Эта крупнейшая по последствиям радиационная авария в XXI в. произошла 11 марта 2011 г. в результате сильнейшего в истории Японии землетрясения и последовавшего за ним разрушительного цунами. Практически сразу после того, как информационные сообщения о землетрясении и цунами, а также о возникших проблемах на АЭС «Фукусима-1» поступили на ленты информационных агентств мира, Технический кризисный центр (ТКЦ) ИБРАЭ РАН был переведен в режим повышенной готовности и стал функционировать в круглосуточном режиме в полном штатном составе.

В соответствии с регламентом и дополнительным распоряжением Правительства РФ эксперты ТКЦ должны были обеспечить поддержку Национального центра по управлению в кризисных ситуациях (НЦУКС) МЧС России, Ситуационно-кризисного центра (СКЦ) Госкорпорации «Росатом» и Кризисного центра концерна «Росэнергоатом» в их деятельности по следующим направлениям:

- прогнозирование ситуации на АЭС Японии, попавших в зону воздействия землетрясения (во взаимодействии с Росатомом);
- прогнозирование радиационной обстановки в районе размещения АЭС «Фукусима-1» и «Фукусима-2» при неблагоприятных сценариях развития аварийной ситуации на энергоблоках этих АЭС;
- прогнозирование радиационной обстановки на территории России при неблагоприятном развитии ситуации на АЭС Японии (совместно с Росгидрометом, НПО «Тайфун»).

Первое сообщение, подготовленное экспертами ТКЦ ИБРАЭ РАН уже к вечеру 11 марта 2011 г., носило информационный характер и обобщало собранную к тому моменту информацию из официальных японских источников. Параллельно с анализом поступавшей информации о развитии событий на аварийной АЭС «Фукусима-1» эксперты ТКЦ начали оценку возможных неблагоприятных сценариев развития аварии вплоть до возможности плавления активной зоны атомных реакторов и выхода значительной части радионуклидов за пределы зданий энергоблоков. Проводились также компьютерные оценки возможных последствий радиоактивных выбросов для населения Японии и близлежащих к зоне аварии государств, в том числе для Дальневосточного региона России. Вся подготавливавшаяся эксперта-

ми ТКЦ ИБРАЭ РАН информация в виде оперативных справок, аналитических записок, кратких и более полных обобщающих отчетов направлялась во все заинтересованные организации и ведомства, в первую очередь в НЦУКС МЧС России и СКЦ Росатома.

Представленные в настоящем издании статьи являются определенным обобщением подготовленной экспертами ТКЦ информации. Важно подчеркнуть, что тексты статей дают представление о том уровне понимания проблемы, который был у экспертов в момент подготовки рабочих материалов, а он изменялся в период от примерно трех недель после аварии (первая статья сборника) до почти двух лет после этого инцидента (последняя статья).

Первая статья сборника *«Авария на АЭС “Фукусима-1”: оперативный прогноз и оценка радиационных и радиологических последствий»* обобщает итоги анализа ситуации в первые недели после аварии. С позиций сегодняшнего дня (спустя два года после аварии) некоторые оценки и подходы изменились. Например, сейчас традиционно принято деление радиоактивного следа от выброшенных в атмосферу при аварии радионуклидов на три зоны, а не на две, как было сделано в этой статье. Не заострено в ней внимание и на описании процессов интенсивного вымывания радиоактивных веществ атмосферными осадками в северо-западной части префектуры Фукусима, поскольку к моменту обобщения поступавших в ТКЦ материалов (на конец марта 2011 г.) такие данные практически не поступали. Однако, основываясь на этих, даже не очень полных, данных, эксперты ТКЦ ИБРАЭ РАН сделали и представили в вышестоящие органы оценки и предложения, которые потом полностью подтвердились.

В следующей статье *«Результаты экспресс-расчетов тяжелой аварии на АЭС “Фукусима-1” при помощи кода СОКРАТ»* представлены результаты предварительных расчетных оценок для наиболее неблагоприятного сценария развития событий на энергоблоке № 1 (в предположении неработоспособности систем теплоотвода от активной зоны с момента полного обесточивания). Эти оценки были выполнены специалистами ИБРАЭ РАН уже к утру 12 марта 2011 г. Полученные в результате расчетов хронологическая последовательность ключевых событий, оценки состояния барьеров безопасности, температуры и степени разрушения активной зоны являлись исходными данными для определения экспертами ТКЦ величин возможных выбросов радиоактивных веществ в окружающую среду. Оперативные расчеты показали, что в консервативном случае протекание аварии достаточно

скоротечно и уже примерно через 2 ч с момента исходного события разрушается второй барьер безопасности (оболочка твэла), а через 13 ч — третий барьер безопасности (корпус реактора). Через семь дней от начала аварии прогнозировался выход расплава за пределы бетонного основания реакторного здания. Поступившая позднее информация позволила внести уточняющие коррективы в расчеты и повысить реалистичность оценки состояния активной зоны, а также обосновать возможные причины взрывов на первых трех энергоблоках. Основные результаты оперативных расчетов подтвердились послеаварийными исследованиями, которые выполнялись в 2011 г. зарубежными экспертами. Представленный в статье материал был получен в течение первого месяца после начала аварии.

Статья *«Работоспособность систем безопасности реакторной установки ВВР/4 в условиях полного обесточивания АЭС “Фукусима-1” и пути совершенствования подходов к анализу тяжелых аварий»* является обобщением различных данных об аварии на АЭС «Фукусима-1» и содержит анализ условий работоспособности систем безопасности, обеспечивших длительное охлаждение активной зоны, а также возможных причин их отказа. На примере данного анализа определены задачи по совершенствованию расчетного моделирования тяжелых аварий для действующих и проектируемых АЭС и обоснования выполнимости руководств по управлению тяжелыми авариями. Материал статьи базируется на данных, полученных к концу 2011 г.

Анализ результатов наблюдений за последствиями произошедших ранее крупных аварий на АЭС показывает, что основная роль в формировании дозовых нагрузок на население принадлежит изотопам йода, цезия и теллура (как материнского изотопа для изотопов йода). При этом в первые часы и сутки после аварии основной вклад в облучение дают изотопы йода, а впоследствии все большую роль начинают играть изотопы цезия. Количество наиболее биологически значимого из них — ^{137}Cs , определяющего среднесрочные и долгосрочные последствия таких аварий, в первые часы трудно определить средствами традиционных мониторинговых сетей, непросто это сделать и по результатам измерений радиоактивного загрязнения проб объектов внешней среды. Более удобным маркером является ^{134}Cs , поскольку этот изотоп сравнительно легко можно идентифицировать в окружающей среде. В этом случае для повышения точности всех последующих оценок необходимо знать, в каких соотношениях изотопы цезия находились в топливе (источнике) на момент аварии. Анализ предшествующих аварий по-

казал, что традиционно используемые консервативные предположения о соотношении ^{134}Cs и ^{137}Cs в начальный период после аварии для реакторов различного типа и с разной степенью выгорания топлива заметно отличаются от реально наблюдаемых величин в объектах внешней среды. Описание использованной в ИБРАЭ РАН методологии оценки накопления различных изотопов, в том числе ^{134}Cs и ^{137}Cs , в реакторах АЭС «Фукусима-1» на момент аварии приведено в статье *«Зависимость от выгорания накопления ^{134}Cs и ^{137}Cs в активной зоне блока № 2 АЭС “Фукусима-1”»*. Сравнение результатов расчетов, полученных в марте 2011 г. с помощью модифицированного компьютерного кода БОНУС, с данными натурных измерений в первые месяцы после аварии, показало их хорошую сходимость и подтвердило корректность использования этого кода для экспресс-оценки возможного радионуклидного состава аварийного выброса.

Следующая статья *«Некоторые результаты по моделированию радиационной обстановки и оценке источника аварийного выброса на АЭС “Фукусима-1” с учетом трехмерных полей метеоданных»* посвящена оценке источников аварийных выбросов радиоактивных веществ, происходивших в течение 15 марта 2011 г. на АЭС «Фукусима-1». На основе моделирования переноса радиоактивных веществ в атмосфере с учетом реальных атмосферных условий были получены расчетные оценки мощности дозы, которые сравнивались с реальными измерениями в точках контроля радиационной обстановки. При этом оказалось, что расчетные значения мощности дозы в районах радиоактивного загрязнения местности отличаются от результатов прямых измерений с помощью аэрогаммаъемки не более чем в два раза. Кроме того, в статье приведена оценка выпадений ^{137}Cs вблизи некоторых точек контроля радиационной обстановки и показано, что результаты компьютерного моделирования отличаются от данных мониторинговых служб не более чем на 40%. Это позволило авторам статьи оценить количество выброшенных за 15 марта 2011 г. в атмосферу изотопов йода, цезия и радиоактивных благородных газов.

Исследованию причин серьезного масштабирования социально-экономических последствий при ограниченных радиологических последствиях радиационных аварий посвящена статья *«Анализ зависимости возможных социально-экономических последствий аварии на АЭС “Фукусима-1” от критериев вмешательства»*. В ней на основе обобщения доступной информации представлены оценки численности населения и площади территорий префектуры Фукусима, попавших в зоны с различными значениями

прогнозируемых доз облучения населения за первый год после аварии. Важным результатом этой работы следует признать доказательство того, что общие экономические потери за счет эвакуации и долгосрочного перемещения граждан в первую очередь зависят от критериев принятия решения по эвакуации и от ее длительности. В результате эвакуации населения из декларированной властями Японии расширенной зоны вокруг АЭС «Фукусима-1» с приостановлением в ней экономической деятельности на длительный срок прямые экономические потери могут составить порядка 100 млрд долл. и почти полностью будут обусловлены принятием решений, которые никак не обоснованы с точки зрения радиационной защиты населения.

Значительные размеры зон радиоактивного загрязнения после аварии на Чернобыльской АЭС в 1986 г. потребовали разработки простых и оперативных методик оценки доз облучения населения, исходя из наиболее просто измеряемого показателя — мощности дозы гамма-излучения на открытой местности. Поскольку, как и в случае чернобыльской аварии, радиационные последствия аварии на АЭС «Фукусима-1» в первые дни и недели определялись изотопами йода и теллура (особенно ^{132}I , ^{131}I и ^{132}Te) и лишь затем основной вклад в величину мощности дозы гамма-излучения на местности стали давать ^{134}Cs и ^{137}Cs , было решено попытаться использовать опыт реконструкции радиологических последствий чернобыльской аварии для оценки возможных доз внешнего и внутреннего облучения населения в результате аварии на АЭС «Фукусима-1» для населенных пунктов в префектурах Фукусима и Ибараки. В статье «Оценки возможных доз облучения населения Японии в результате аварии на АЭС “Фукусима-1” на основе чернобыльского опыта» излагаются подходы к созданию математической модели формирования доз облучения населения, проживавшего в различных зонах радиоактивного загрязнения. В качестве нормирующего показателя была выбрана мощность дозы внешнего гамма-излучения на открытой местности на 26 марта 2011 г. (15-е сутки после останова реакторов 11 марта). Приводятся также результаты сравнения расчетной и фактической динамики изменения мощности дозы гамма-излучения на местности и простые соотношения, позволяющие достаточно надежно прогнозировать значения доз внешнего и внутреннего облучения людей, проживающих в зоне радиоактивного загрязнения после аварии на АЭС «Фукусима-1».

Обобщением результатов работ экспертов ИБРАЭ РАН за первый год после аварии на АЭС «Фукусима-1» можно считать материалы статьи «Оперативный анализ аварии на АЭС “Фукусима-1” и прогнозирование ее последствий».

В ней представлено краткое описание созданного в ИБРАЭ РАН в 1996 г. ТКЦ, эксперты которого уже через несколько часов после получения информации об аварии на АЭС «Фукусима-1» включились в круглосуточную работу, осуществляя инженерную и научно-техническую поддержку НЦУКС МЧС России, СКЦ Росатома и Кризисного центра концерна «Росэнергоатом». Большое внимание уделено первым дням развития аварийной ситуации, когда удалось оперативно оценить риск загрязнения территории Дальнего Востока нашей страны и было показано, что радиационная обстановка не потребует принятия мер защиты населения; спрогнозировать аварийные процессы на энергоблоках АЭС «Фукусима-1» вплоть до момента взрыва водорода; оценить количественные характеристики и нуклидный состав выбросов радиоактивных веществ в окружающую среду. На последующих этапах деятельности ТКЦ удалось разработать методические подходы, позволившие оперативно оценивать дозу внешнего и внутреннего облучения людей, проживающих в разных регионах Японии; оценить возможные экономические потери при реализации мероприятий по защите населения и территорий в подвергшихся радиоактивному загрязнению префектурах Японии; довести до сведения средств массовой информации, общественности и федеральных органов власти достоверную, актуальную и научно обоснованную информацию об аварии на АЭС в Японии и ее последствиях для населения и окружающей среды.

Авария на АЭС «Фукусима-1» привела к поступлению большого количества радиоактивных вещества в морскую среду в период с 26 марта по 6—8 апреля 2011 г. В статье *«Использование комплекса моделей POMRad для моделирования распространения радиоактивных веществ в морской среде после аварии на АЭС “Фукусима-1”»* представлено описание разработанного в ИБРАЭ РАН комплекса компьютерных моделей POMRad, реализованного в виде программных кодов и предназначенного для трехмерного имитационного моделирования распространения радиоактивных веществ в сложных неоднородно загрязненных водных объектах. Представленные в статье расчеты показали, что превышение удельной активности ^{137}Cs в водах Тихого океана на два порядка и более относительно ранее фиксированных фоновых значений может наблюдаться на расстоянии нескольких тысяч километров от АЭС. Также показано, что результаты модельных расчетов при помощи POMRad в целом согласуются с опубликованными данными измерений удельной активности в воде, а также с расчетами при помощи других моделей.

В заключительной статье сборника *«Актуальные задачи совершенствования готовности к реагированию на чрезвычайные ситуации радиационного характера»* отмечается, что авария на АЭС «Фукусима-1» еще раз показала, что возникновение крупномасштабных радиационных аварий на современном этапе, к сожалению, возможно с учетом того, что в эксплуатации еще долго будут находиться АЭС и другие радиационно-опасные объекты, построенные на основе технологий и проектных решений создания предприятий атомной энергетики предыдущих поколений. Это ставит перед обществом неотложные задачи по совершенствованию систем безопасности и надежности самих установок и устройств, а также по развитию и практическому внедрению оптимального перечня мероприятий, направленных на защиту населения и объектов его жизнедеятельности от неблагоприятных воздействий.

Обобщая в целом, можно отметить, что в настоящем сборнике представлены результаты оценок и прогнозирования развития аварии на АЭС «Фукусима-1», ее радиационных последствий для населения и территорий Японии и Российской Федерации, выполненные как непосредственно в острый период после 11 марта 2011 г., так и в последовавшие после аварии два года.

Авария на АЭС «Фукусима-1»: оперативный прогноз и оценка радиационных и радиологических последствий¹

*Р. В. Арутюнян, О. А. Павловский, С. В. Панченко,
С. Н. Красноперов, Е. Л. Серебряков*

Введение

На начало 2011 г. в Японии было 17 атомных электростанций с 55 ядерными реакторами и суммарной установленной электрической мощностью 44,2 ГВт. АЭС размещаются в основном в прибрежной зоне Японского моря и Тихого океана (рис. 1).



Рис. 1. Места расположения АЭС Японии

¹ Материал был написан в 2011 г. через месяц после аварии.

11 марта в 14:46 по местному времени (05:46 UTC) в Японии произошло сильное землетрясение, которое вызвало в Тихом океане цунами, обрушившееся на северо-восточную часть острова Хонсю. На расположенных в префектуре Фукусима атомной электростанции «Фукусима-1», по сообщению японского правительства, были нарушены системы охлаждения реакторов. В тот же день были эвакуированы жители, проживающие в радиусе 2 км от АЭС.

12 марта на блоке № 1 произошел взрыв водорода, который разрушил здание реактора, однако защитная оболочка, по утверждению администрации, не была повреждена. Тем не менее зона эвакуации была увеличена до 20 км, затронув интересы примерно 170—200 тыс. людей, а в следующей зоне (от 20 до 30 км) правительство рекомендовало жителям оставаться в домах за закрытыми дверями.

Наряду с благородными газами в выбросе присутствовали изотопы радиоактивного йода, поэтому началась йодная профилактика среди персонала АЭС и жителей в окрестностях АЭС.

В дальнейшем многие технологические процессы на различных блоках АЭС «Фукусима-1» вышли из-под контроля. Поступающая из официальных источников информация стала противоречивой и не позволяла адекватно оценить происходящее на АЭС. В этих условиях данные мониторинга радиационной обстановки, доступные в реальном времени в сети Интернет, стали важнейшей базой для оценок и прогнозов уровней загрязнения различных объектов внешней среды и доз облучения.

В настоящей статье прослеживается хронология мониторинга фактических данных, а также их первичная обработка и анализ, на основе которого специалистами Центра научно-технической поддержки ИБРАЭ РАН вырабатывались оценки и корректировались прогнозы радиологических последствий аварии на АЭС «Фукусима-1» как для Японии, так и для сопредельных регионов.

Краткое описание источников информации

Эксперты Центра научно-технической поддержки ИБРАЭ РАН с момента аварии приступили к активному поиску зарубежных источников информации о радиационной обстановке в Японии и прилегающих территориях (акваториях), которые могли бы дополнить официальные источники и данные служб радиационного мониторинга России.

С 12 марта началось непрерывное отслеживание информации с сайтов организации ТЕРСО, эксплуатирующей атомные станции «Фукусима-1» и «Фукусима-2»:

- <http://www.tepco.co.jp/en/press/corp-com/release/index-e.html> — пресс-релизы об изменении состоянии АЭС «Фукусима-1» и АЭС «Фукусима-2»;
- <http://www.tepco.co.jp/en/nu/monitoring/index-e.html> — данные о состоянии радиационного мониторинга на промплощадках АЭС «Фукусима-1» и АЭС «Фукусима-2»;
- <http://www.tepco.co.jp/en/nu/monitoring/index-e.html> — мониторинг промплощадок АЭС «Фукусима-1» и «Фукусима-2».

Почти одновременно стали следить за пресс-релизами:

- Агентства ядерной и промышленной безопасности Японии (NISA) — <http://www.nisa.meti.go.jp/english/index.html>;
- Международного агентства по атомной энергии (МАГАТЭ) — <http://www.iaea.org>.

С 14 марта началось отслеживание информации с сайтов:

- JAIF — японского атомного промышленного форума (некоммерческого и неправительственного официального объединения, членами которого являются около 400 различных организаций и структур) — <http://www.jaif.or.jp/english/>;
- Министерства образования, культуры, спорта, науки и технологии Японии (MEXT) — http://www.mext.go.jp/english/radioactivity_level/detail/1303962.htm (радиационный мониторинг префектур Японии, префектуры Ибараки, зоны вне 20 км от АЭС, отбор проб в прибрежной зоне АЭС «Фукусима-1», отбор проб в питьевой воде, измерения суточных выпадений на поверхность земли, пробоотбор и анализ аэрозольей, оценка интегральных доз при нахождении на загрязненной территории и т. п.);
- Министерства образования, культуры, спорта, науки и технологии Японии — <http://www.bousai.ne.jp/eng/index.html> (контроль радиационной обстановки в окрестностях расположения ядерно- и радиационно-опасных объектов Японии онлайн).

Кроме того, просматривались различные европейские сайты, которые зачастую не менее оперативно предоставляли информацию от официальных и неофициальных источников Японии.

Результаты измерений мощности дозы на территории

География измерений

Японская национальная автоматическая система контроля за радиационной обстановкой (ЯАСКРО) в районах расположения ядерных и радиационно опасных объектов является на настоящее время наиболее корректным источником информации, по которому можно в общих чертах судить о радиационной обстановке на территории всей страны.

Система состоит из 218 постов. После аварии на АЭС «Фукусима-1» в префектуре Фукусима и соседней префектуре Мияги все датчики были отключены от системы общественного доступа, возможно из-за проблем с электроснабжением. Не работают по неизвестной причине и все 10 датчиков в префектуре Исикава. В остальных префектурах ЯАСКРО работает в живом времени и предоставляет информацию по максимально зарегистрированной дозе на одном из постов префектуры. Названия и месторасположение префектур, а также количество постов контроля представлено на рис. 2.

Префектура	Число постов	Из них не работают
Хоккайдо	9	
Аомори	15	
Мияги	7	7
Фукусима	23	23
Ибараки	39	2
Канагава	13	
Ниигата	11	
Исикава	10	10
Фукуи/Киото	18+6	1
Сидзуока	15	
Осака	15	
Окаяма/ Тоттори	1+3	
Симанэ	11	1
Эхимэ	8	
Сага/ Нагасаки	1+6	
Кагосима	7	
Всего	218	44



Рис. 2. Количество постов и датчиков по измерению мощности дозы на территории Японии, включая количество датчиков, которые были отключены по разным причинам после аварии на АЭС (<http://www.bousai.ne.jp/eng/>)

*Авария на АЭС «Фукусима-1»: оперативный прогноз
и оценка радиационных и радиологических последствий*

На каждом посту ЯАСКРО проводятся измерения мощности дозы, скорости и направления приземного ветра, а также количество осадков с интервалом измерений в 10 мин (рис. 3).

Ibaraki		2011/03/15 18:50 Collection data			
No	Observation office	Rate of space dose (nGy/h)	Wind Direction	Wind Velocity (m/s)	Precipitation (mm)
1	Ishigami Tokai Village	785	NE	1.9	---
2	Toyooka Tokai Village	423	NNE	4.1	---
3	Funaiishikawa Toukai Village	206	NE	3.4	---
4	Yokobori Naka City	334	E	2.7	---
5	Oshinobe Tokai Village	338	NE	4.1	0.0
6	Muramatsu Tokai Village	274	NE	2.8	---
7	Mawatari Hitachinaka City	340	NNE	4.1	---
8	Onuki Oarai Town	250	NNE	2.6	0.0
9	Hiroura Ibaraki Town	375	NE	3.3	---
10	Tsukuriya Hokota City	284	N	3.3	---
11	Araji Hokota City	139	NE	4.4	---
12	Hitachinaka Hitachinaka City	387	E	2.9	---
13	Ajigaura Hitachinaka City	217	NE	5.1	---
14	Ishikawa Mito City	234	E	2.4	---
15	Horiguchi Hitachinaka City	1139	NNE	3.0	---
16	Kuji Hitachi City	825	NE	4.2	---
17	Isobe Hitachioota City	531	NE	2.7	---
18	Kadobe Naka City	830	ENE	1.2	---
19	Sugaya Naka City	249	NE	2.7	---
20	Oba Mito City	173	NNE	1.3	---
21	Ebisawa Ibaraki Town	221	NE	0.9	---
22	Sawa Hitachinaka City	801	---	---	---
23	Yanagisawa Hitachinaka City	264	NNE	3.2	0.0
24	Motokomezaki Naka City	Under servey	---	---	---
25	Nukada Naka City	351	---	---	---
26	Kounosu Naka City	449	NE	1.5	0.0
27	Godai Naka City	431	---	---	---
28	Onuma Hitachi City	483	NE	3.4	0.0
29	Mayumi Hitachiota City	354	---	---	---
30	Uridura Naka City	238	---	---	---
31	Nemoto Hitachioomya City	351	NNE	1.7	0.0
32	Kume Hitachiota City	184	NNE	1.9	---
33	Isohama Oarai Town	177	---	---	---
34	Tasaki Hokota City	Under servey	---	---	---
35	Momiyama Hokota City	415	---	---	0.0
36	Yatabe Ibaraki Town	215	---	---	---
37	Yoshizawa Mito City	191	ENE	3.0	0.0
38	Kamitoda Hokota City	166	---	---	0.0
39	Tokushuku Hokota City	142	ENE	2.5	---

Рис. 3. Пример информации в сети постов в префектуре Ибаракки

Данные с системы ЯАСКРО можно получать в режиме реального времени с задержкой 10—15 мин, кроме того, имеется возможность вывести на дисплей динамику показателей (по мощности дозы и количеству метеорологических осадков) за последние 24 ч, за 7, 30 и 90 сут (рис. 4).

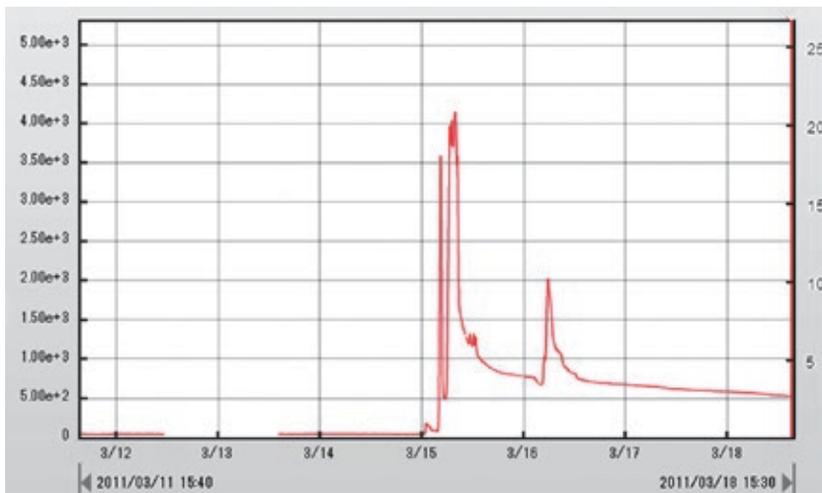


Рис. 4. Динамика мощности дозы в точке контроля № 18 (Kadobe Naka City) префектуры Ибараки с 12 по 18 марта

Сайт дает возможность увидеть в общих чертах положение дел по всей территории Японии. Позднее появились и другие источники представления оперативной информации (<http://japan.failedrobot.com/>) (рис. 5).

Вокруг АЭС и прежде всего на промплощадке измерения мощности дозы производились стационарными датчиками, размещенными по периметру предприятия (рис. 6). Впоследствии после аварии на блоке № 1 измерения стали проводиться с помощью передвижной лаборатории в точках, схематически показанных на рис. 7 (отображены некоторые результаты измерений с указанием даты и времени их выполнения). К сожалению, замеры в этих точках проводились нерегулярно.

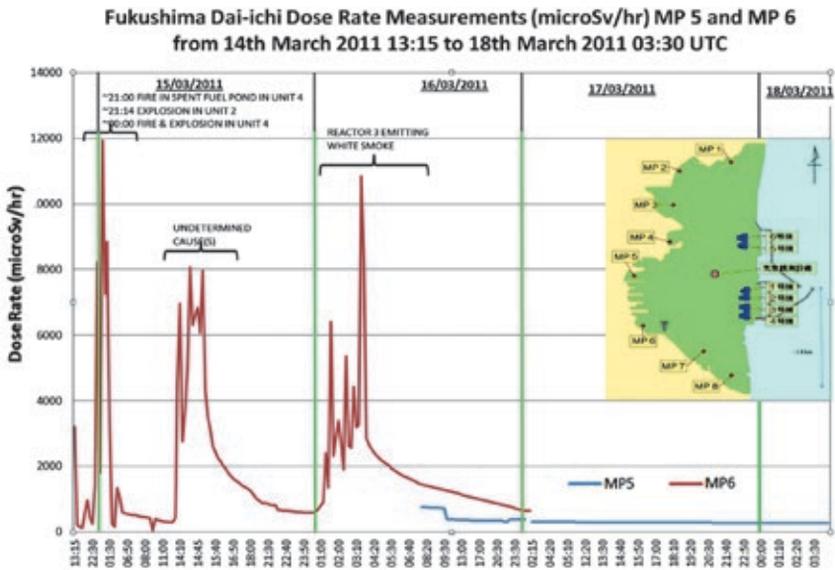


Рис. 6. Размещение стационарных постов контроля за мощностью дозы и динамика мощности дозы в точках контроля 5 и 6 на площадке АЭС «Фукусима-1», мкГр/ч



N — северная сторона административного здания,
W — западные ворота,
G — спортзал,
M — главная проходная (КПП)

Рис. 7. Точки контроля за мощностью дозы на промплощадке с помощью передвижных лабораторий и отдельные измерения в этих точках

В связи с выходом из строя стационарных датчиков в префектуре Фукусима был организован регулярный контроль за уровнями мощности доз на удалении 20—60 км от АЭС с помощью передвижных лабораторий. Одновременно специалисты различных организаций помимо измерений мощности дозы производили отбор проб воздуха, почвы, травы и других объектов окружающей среды. В открытый доступ результаты замеров передвижных лабораторий, работающих от границы 20 км до 60 км в северо-западном направлении, стали поступать с 16 марта (рис. 8). В северном направлении данные радиационной разведки появились 17 марта (рис. 9).

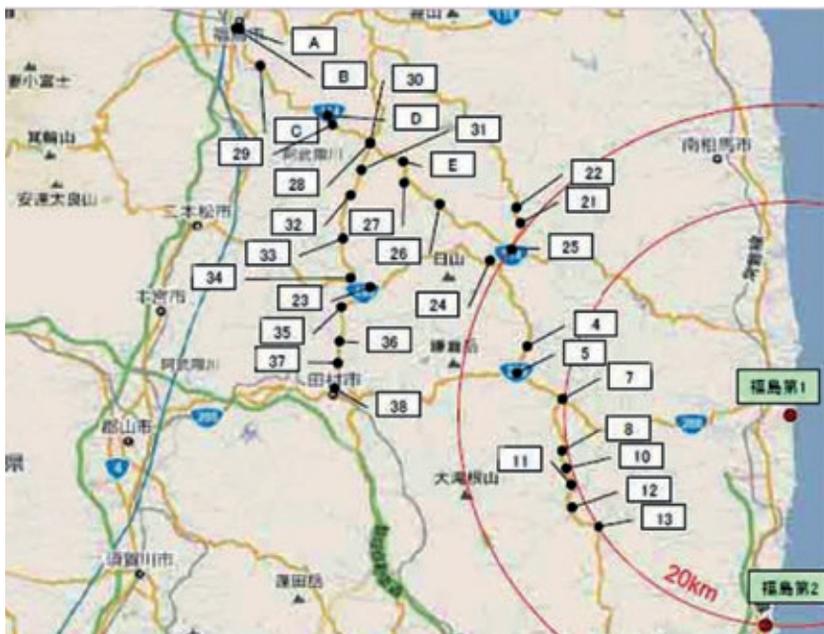


Рис. 8. Точки контроля за мощностью дозы с помощью передвижных лабораторий с 08:15 до 14:15 местного времени 16 марта 2011 г.

Радиационный мониторинг проводится также на территории АЭС «Фукусима-2» компанией ТЕРСО. Последние данные мониторинга приведены на рис. 10.



Рис. 9. Точки контроля и значения мощности дозы (мкЗв/ч), полученные с помощью передвижных лабораторий на север от АЭС



Рис. 10. Мощность дозы на датчиках стационарного контроля по периметру площадки АЭС «Фукусима-2» на 27 марта, 11 часов местного времени

Динамика мощности дозы в отдельных точках

Непрерывный ряд замеров проводился на главных воротах АЭС «Фукусима-1». Рост давления в корпусе блока № 1 и последующий взрыв здания хорошо просматриваются на представленной динамике мощности дозы (рис. 11), в известной мере отражая процессы, происходящие на реакторе блока № 1.

Динамический ряд мощности дозы на главных воротах, а также в ряде других точек стационарного контроля в период с начала аварии до 16 марта показан на рис. 12.



Рис. 11. Динамика мощности дозы на промплощадке (главные ворота АЭС) с начала останова реакторов до 13 марта, нГр/ч

На северо-западном следе наиболее информативная точка находится на расстоянии примерно 30 км от АЭС, которая первоначально обозначалась номером 21, а 17 марта получила номер 32 (см. рис. 7). Надо отметить, что измерения в этой точке проводились разными ведомствами и различными приборами. Понятно, что географическое совпадение точек контроля мощности дозы не является идентичным, поэтому возможны некоторые различия и в измеряемых величинах. Площадь с максимальным загрязнением, по-видимому, невелика и измеряется несколькими гектарами. Не исключено, что через эту точку проходит ось радиоактивного следа. Не случайно японскими специалистами 22 марта была предпринята попытка уточнить местоположение оси этого следа. На рис. 13 видна примерная ширина следа на удалении 30 км от АЭС, значение которой близко к 10 км. Динамику изменения мощности дозы во времени примерно на оси следа удастся проследить по результатам измерений в точке № 32 (рис. 14).

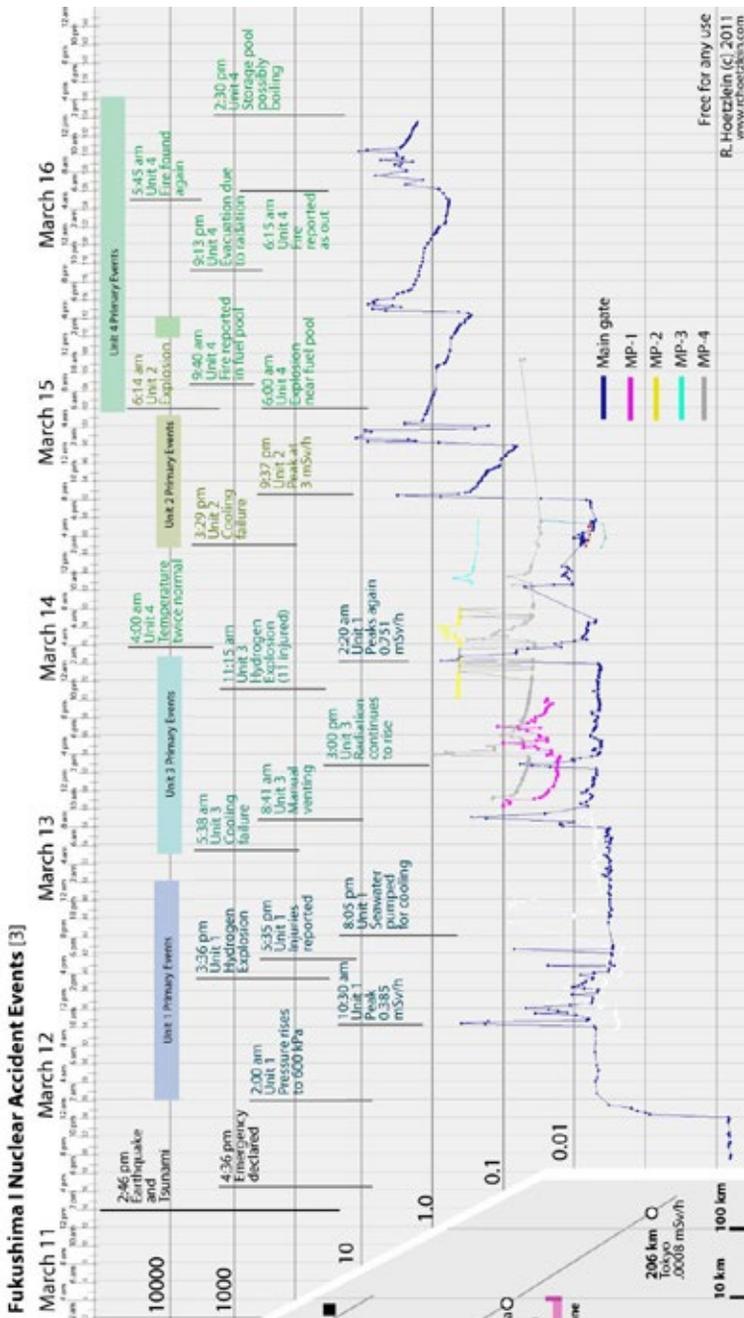


Рис. 12. Динамика мощности дозы в разных точках контроля на площадке с начала останова реакторов до 16 марта, мГр/ч (<http://www.rhoetzlein.com>)

Авария на АЭС «Фукусима-1»: оперативный прогноз и оценка радиационных и радиологических последствий



Рис. 13. Точки измерения мощности дозы (мкЗв/ч) с целью уточнения осевых значений на северо-западном и южном следах

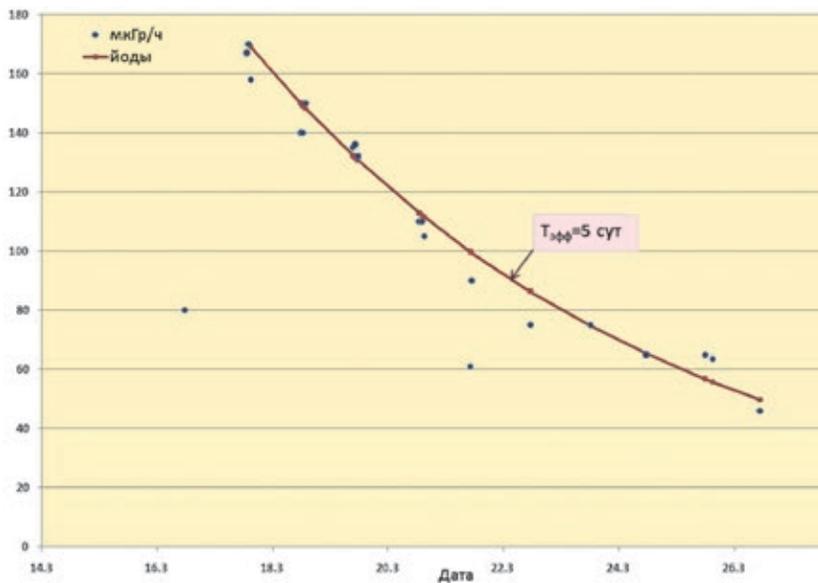


Рис. 14. Динамика мощности дозы на удалении примерно 30 км от АЭС в северо-западном направлении, мкГр/ч

Подобная же работа накануне (21 марта) была выполнена японскими мобильными группами радиационной разведки и в южном направлении от АЭС. Результаты этих оценок представлены на рис. 15.

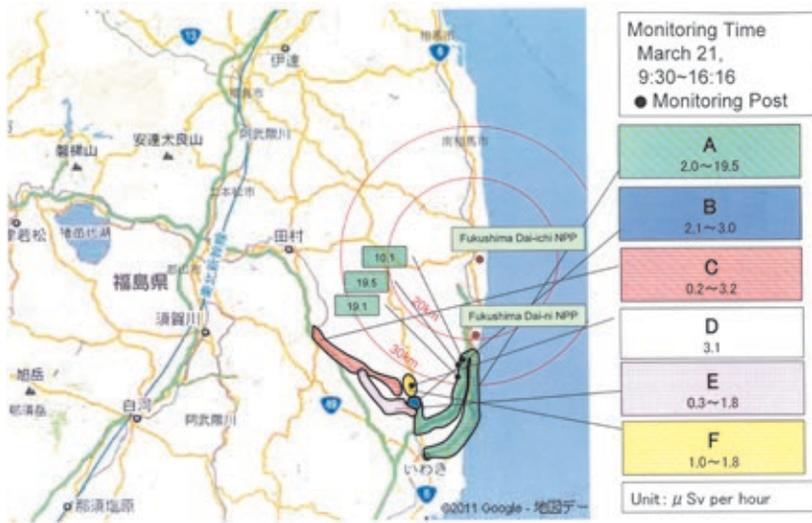


Рис. 15. Динамика мощности дозы на удалении 30—40 км от АЭС в южном и юго-западном направлениях, мкГр/ч

Передвижные лаборатории не ведут постоянный контроль за мощностью дозы в отдельных точках, однако проводимые ими измерения могут быть обработаны и представлены в картографическом виде. Иллюстрацией построения подобных карт служат данные обследования зоны в 20—45 км от АЭС, представленные на рис. 16.

Динамику мощности дозы на датчиках системы ЯАСКРО в префектурах, расположенных на юге и юго-западе от АЭС, иллюстрирует рис. 17.

Для унификации мест отбора проб и измерений на местности были выбраны наиболее значимые точки мониторинга, им присвоены номера, не совпадающие с номерами точек, где ранее проводились измерения мощности дозы отдельными мобильными группами (рис. 18). Так, место отбора проб внешней среды № 33 расположено рядом с точкой № 32, где измерялась мощность дозы, но не в точности совпадает с ней.

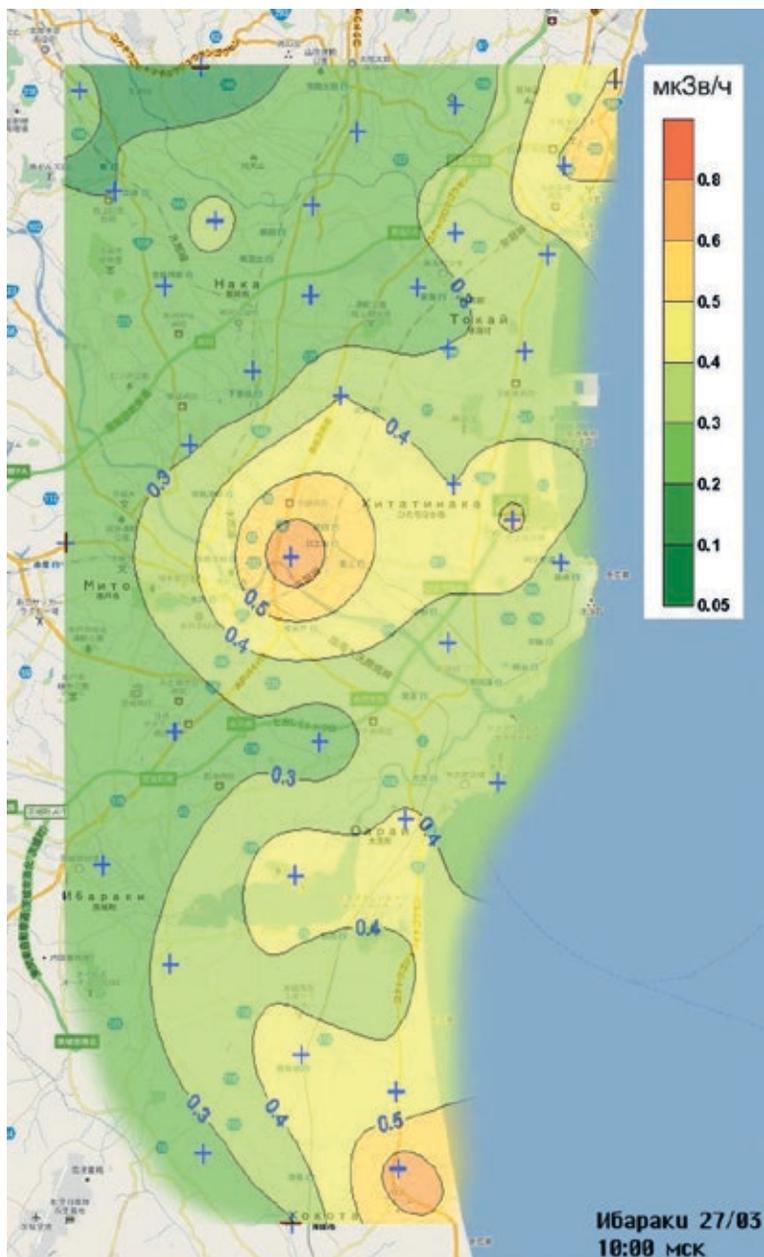


Рис. 16. Изодозы в префектуре Ибараки по состоянию на 27 марта, мкГр/ч

*Авария на АЭС «Фукусима-1»:
опыт реагирования и уроки*

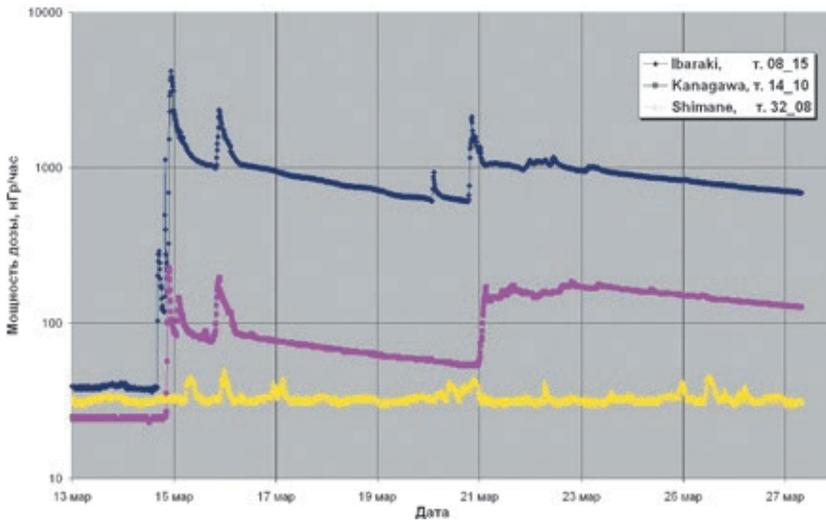


Рис. 17. Динамика мощности дозы на различных постах ЯАСКРО с 13 по 27 марта



Рис. 18. Идентификационные номера точек отбора проб и радиометрических измерений

Краткий анализ результатов

Неконтролируемое повышение давления в корпусе энергоблока № 1 привело примерно к 100-кратному росту мощности дозы на площадке АЭС «Фукусима-1» (рис. 19). Последовавший на этом энергоблоке взрыв водородо и разрушение части здания привели к почти мгновенному росту мощности дозы на промплощадке еще примерно на два порядка величины. Сформировался устойчивый радиационный фон, который по мере развития событий неуклонно повышался. Вплоть до 14 марта в периоды, когда над датчиком не было подсветки от радиоактивного шлейфа, мощность дозы была на удивление стабильной, что говорило о преимущественном загрязнении территории нуклидами с большим периодом полураспада. Каждый новый шлейф кратковременно повышал мощность дозы на один-два порядка величины и увеличивал «стационарный» уровень загрязнения внешней среды. Выбросы в этот период сформировали радиоактивный след в северо-западном направлении от блока № 1. Мощность дозы на расстоянии 30 км от АЭС достигала величины в 0,2 мГр/ч, а возможно, и 0,3 мГр/ч. Не исключено, что формирование этого радиоактивного следа спровоцировало решение об эвакуации населения за пределы 20-километровой зоны.

Мощность дозы на сформированном следе в основном была обусловлена радиоактивными изотопами йода. Утром 15 марта новые события на АЭС (декомпрессия на блоке № 2) привели к очередному выбросу радиоактивных веществ, преимущественно радиоактивных благородных газов и йода с небольшими примесями радиоактивных изотопов цезия.

Мощность дозы во время прохождения радиоактивного шлейфа возрастала на пять порядков величины от фонового уровня. Уровень загрязнения поверхности земли вырос более чем на порядок от предыдущего и стал определяться излучением изотопов йода. Значительная часть этого выброса ушла в сторону Тихого океана, однако часть радиоактивных облаков все же задела юго-восточную от АЭС часть территории Японии. Прохождение этого облака и остаточное загрязнение поверхности земли было зарегистрировано на всех 37 действующих постах ЯАСКРО префектуры Ибараки, а также, хотя и в меньшей степени, в соседних префектурах: районе Токио, префектурах Канагава, Сидзуока и Тотиги.

Наконец, 21 марта последовал новый значительный выброс, снова затронувший южные от АЭС территории. Все остальные выбросы, если они были, уносило в Тихий океан. До 29 марта новых выбросов с АЭС, оставивших след на территории Японии, не отмечено.



Рис. 19. Размещение реакторов на промплощадке АЭС «Фукусима-1»

Загрязнение воздушной среды

Сведения о загрязнении воздушной среды пока еще достаточно мозаичны и отрывочны. Общие представления о результатах измерений радионуклидов в воздухе на территории АЭС дают данные, приведенные в табл. 1.

*Авария на АЭС «Фукусима-1»: оперативный прогноз
и оценка радиационных и радиологических последствий*

**Таблица 1. Результаты радионуклидного анализа воздуха
на АЭС «Фукусима-1»**

Форма	Радио- нуклид	Концентрация (1), Бк/см ³	Концентрация преде- ла детектирования (2), Бк/см ³	Предельно допустимая концентрация для ра- ботника (3), Бк/см ³	Отно- шение (1):(3)
<i>19 марта 2011 г.</i>					
Лету- чие формы	¹³¹ I	5,9E-03	3,4E-05	1,0E-03	5,9
	¹³² I	2,2E-03	8,8E-05	7,0E-02	0,03
	¹³³ I	3,8E-05	2,9E-05	5,0E-03	0,01
	¹³⁴ Cs	Н. д.	—	2,0E-03	—
	¹³⁷ Cs	Н. д.	—	3,0E-03	—
Аэро- золи	⁵⁸ Co	Н. д.	—	1,0E-02	—
	¹³¹ I	1,1E-03	1,6E-05	1,0E-03	1,1
	¹³² I	3,8E-04	5,0E-05	7,0E-02	0,01
	¹³⁴ Cs	2,2E-05	1,7E-05	2,0E-03	0,01
	¹³⁶ Cs	Н. д.	—	1,0E-02	—
Другие	¹³⁷ Cs	2,4E-05	1,8E-05	3,0E-03	0,01
	¹⁰⁶ Ru	2,1E-04	2,1E-04	6,0E-04	0,36
	¹²⁹ Te	Н. д.	—	4,0E-01	—
	^{129m} Te	Н. д.	—	4,0E-03	—
	¹³² Te	6,7E-05	1,8E-05	7,0E-03	0,01
¹⁴⁴ Ce	Н. д.	—	7,0E-04	—	
<i>20 марта 2011 г.</i>					
Лету- чие формы	¹³¹ I	2,3E-03	1,3E-05	1,0E-03	2,3
	¹³² I	Н. д.	—	7,0E-02	—
	¹³³ I	Н. д.	—	5,0E-03	—
	¹³⁴ Cs	4,0E-05	8,3E-06	2,0E-03	0,02
	¹³⁷ Cs	3,9E-05	8,4E-06	3,0E-03	0,01
Аэро- золи	⁵⁸ Co	Н. д.	—	1,0E-02	—
	¹³¹ I	1,3E-03	6,8E-06	1,0E-03	1,29
	¹³² I	Н. д.	—	7,0E-02	—
	¹³⁴ Cs	2,8E-05	4,8E-06	2,0E-03	0,01
	¹³⁶ Cs	5,6E-06	5,4E-06	1,0E-02	0,001
Другие	¹³⁷ Cs	2,9E-05	5,0E-06	3,0E-03	0,01
	¹⁰⁶ Ru	3,8E-05	3,4E-05	6,0E-04	0,06
	¹²⁹ Te	Н. д.	—	4,0E-01	—
	^{129m} Te	1,4E-04	1,2E-04	4,0E-03	0,03
	¹³² Te	5,1E-04	6,0E-06	7,0E-03	0,07
¹⁴⁴ Ce	5,0E-03	4,6E-04	7,0E-04	7,08	
<i>21 марта 2011 г.</i>					
Лету- чие формы	¹³¹ I	1,5E-03	1,1E-05	1,0E-03	1,52
	¹³² I	2,5E-04	2,7E-05	7,0E-02	0,004
	¹³³ I	Н. д.	—	5,0E-03	—
	¹³⁴ Cs	3,1E-05	8,6E-06	2,0E-03	—
	¹³⁷ Cs	3,6E-05	7,9E-06	3,0E-03	0,01
Аэро- золи	⁵⁸ Co	Н. д.	—	1,0E-02	—
	¹³¹ I	9,2E-06	5,0E-06	1,0E-03	0,01
	¹³² I	1,1E-04	1,2E-05	7,0E-02	0,002
	¹³⁴ Cs	3,4E-05	5,4E-06	2,0E-03	0,02
	¹³⁶ Cs	4,5E-06	3,3E-06	1,0E-02	0
Другие	¹³⁷ Cs	3,8E-05	4,7E-06	3,0E-03	0,01
	¹⁰⁶ Ru	Н. д.	—	6,0E-04	—
	¹²⁹ Te	1,3E-03	3,8E-04	4,0E-01	0,003
	^{129m} Te	Н. д.	—	4,0E-03	—

Табл 1. Окончание

Форма	Радионуклид	Концентрация (1), Бк/см ³	Концентрация предела детектирования (2), Бк/см ³	Предельно допустимая концентрация для работника (3), Бк/см ³	Отношение (1):(3)
Другие	¹³² Te	3,9E-04	4,3E-06	7,0E-03	0,06
	¹⁴⁴ Ce	Н. д.	—	7,0E-04	—
<i>22 марта 2011 г.</i>					
Летучие формы	¹³¹ I	2,2E-03	1,6E-05	1,0E-03	2,24
	¹³² I	Н. д.	—	7,0E-02	—
	¹³³ I	Н. д.	—	5,0E-03	—
	¹³⁴ Cs	1,1E-05	1,1E-05	2,0E-03	0,01
	¹³⁷ Cs	1,3E-05	1,0E-05	3,0E-03	0
Аэрозоли	⁵⁸ Co	Н. д.	—	1,0E-02	—
	¹³¹ I	4,7E-04	7,4E-06	1,0E-03	0,47
	¹³⁴ Cs	1,6E-05	5,9E-06	2,0E-03	0,01
	¹³⁶ Cs	Н. д.	—	1,0E-02	—
Другие	¹³⁷ Cs	1,9E-05	5,3E-06	3,0E-03	0,01
	¹²⁹ Te	Н. д.	—	4,0E-01	—
	¹³² Te	6,7E-05	1,1E-05	7,0E-03	0,01
¹⁴⁴ Ce	Н. д.	—	7,0E-04	—	
<i>23 марта 2011 г.</i>					
Летучие формы	¹³¹ I	6,7E-04	9,6E-06	1,0E-03	0,67
	¹³² I	Н. д.	—	7,0E-02	—
	¹³³ I	Н. д.	—	5,0E-03	—
	¹³⁴ Cs	2,2E-05	7,6E-06	2,0E-03	0,01
	¹³⁷ Cs	2,3E-05	7,6E-06	3,0E-03	0,01
Аэрозоли	⁵⁸ Co	5,1E-06	5,1E-06	1,0E-02	0
	¹³¹ I	4,3E-04	5,0E-06	1,0E-03	0,43
	¹³⁴ Cs	1,7E-05	4,2E-06	2,0E-03	0,01
	¹³⁶ Cs	3,0E-06	2,7E-06	1,0E-02	0
	¹³⁷ Cs	1,3E-05	4,2E-06	3,0E-03	0
Другие	¹²⁹ Te	2,3E-01	1,2E-01	4,0E-01	0,58
	¹³² Te	4,3E-04	4,5E-05	7,0E-03	0,06
	¹⁴⁴ Ce	1,3E-03	3,7E-04	7,0E-04	1,9
<i>24 марта 2011 г.</i>					
Летучие формы	⁵⁸ Co	Н. д.	—	1,0E-02	—
	¹³¹ I	1,5E-03	1,0E-05	1,0E-03	1,5
	¹³² I	Н. д.	—	7,0E-02	—
	¹³³ I	Н. д.	—	5,0E-03	—
	¹³⁴ Cs	3,2E-05	7,9E-06	2,0E-03	0,02
	¹³⁷ Cs	3,1E-05	7,3E-06	3,0E-03	0,01
Аэрозоли	⁵⁸ Co	Н. д.	—	1,0E-02	—
	¹³¹ I	5,0E-04	4,8E-06	1,0E-03	0,5
	¹³² I	Н. д.	—	7,0E-02	—
	¹³⁴ Cs	1,1E-05	4,6E-06	2,0E-03	0,01
	¹³⁶ Cs	Н. д.	—	1,0E-02	—
	¹³⁷ Cs	1,2E-05	3,8E-06	3,0E-03	0
Другие	⁹⁵ Zr	2,5E-05	6,0E-06	8,0E-02	0
	¹²⁹ Te	4,6E+00	9,5E-01	4,0E-01	11,4
	^{129m} Te	3,4E-04	9,9E-05	4,0E-03	0,08
	¹³² Te	3,6E-04	4,4E-04	7,0E-03	0,05

Примечание. Н. д. — нет данных.

Как отмечают японские исследователи, наблюдаемые уровни за исключением ^{131}I не превышали допустимых нормативов для персонала АЭС. С точки зрения российского законодательства, допустимые нормативы для персонала также не превышены. Однако следует заметить, что при концентрации ^{131}I в воздухе на промплощадке и в санитарно-защитной зоне выше $6 \text{ Бк}/\text{м}^3$ ($6\text{E}-06 \text{ Бк}/\text{см}^3$) руководитель российской атомной станции обязан объявить состояние «Аварийная готовность». Состояние «Аварийная обстановка» на российских АЭС объявляется при достижении концентрации ^{131}I в воздухе на промплощадке уровня $7400 \text{ Бк}/\text{м}^3$ ($7,4\text{E}-03 \text{ Бк}/\text{см}^3$) и выше. В Японии действует критерий по допустимой объемной активности ^{131}I — $1000 \text{ Бк}/\text{м}^3$. При нормальной эксплуатации в России допустимая среднегодовая объемная активность в воздухе составляет по этому изотопу $1100 \text{ Бк}/\text{м}^3$.

Динамика концентраций отдельных радионуклидов в воздухе на территории АЭС показана на рис. 20.

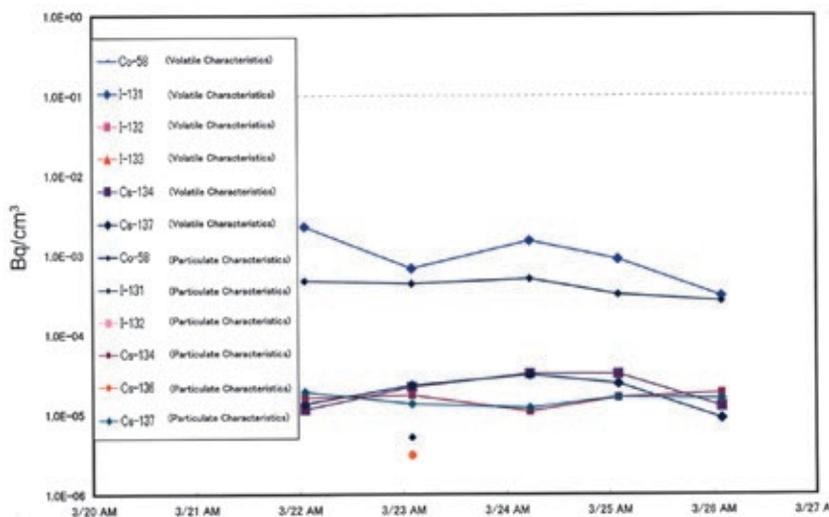


Рис. 20. Динамика содержания отдельных радионуклидов в воздухе у главных ворот АЭС

В зоне 20—45 км измерения аэрозолей в воздухе начали проводить ежедневно с 20 марта с использованием передвижной лаборатории примерно в одних и тех же точках (рис. 21). Результаты измерений с 20 по 23 марта представлены в табл. 2.

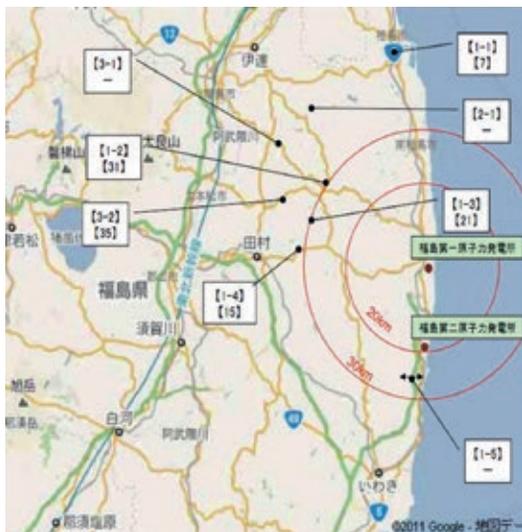


Рис. 21. Точки ежедневного контроля за концентрацией радиоактивных аэрозолей в приземном слое воздуха (<http://eq.wide.ad.jp>)

Таблица 2. Концентрация аэрозолей в приземном воздухе вокруг АЭС, Бк/м³

Место и время отбора	20 марта		21 марта		22 марта		23 марта	
	¹³¹ I	¹³⁷ Cs						
Т.1.1 около 45 км на север	3,5	2,4	17	3,8	4,9	Менее 1,2	4,0	1,2
Т.1.2 около 30 км на запад-северо-запад	1200	210	51	9,1	17	5,8	5,2	Менее 1,2
Т.1.3 около 30 км на запад-северо-запад	3800	860			7	1,1	8	Менее 1,4
Т.1-4 примерно в 35 км к западу	620	140			6,4	1,4	2,8	Менее 1,1
Т.1.5 примерно в 25 км к югу:								
13:00—13:40			5600	36	31	Менее 0,98	530	6,6
13:50—14:32			3700	22	29	Менее 1,2	180	2,3
14:43—15:24			280	4	79	Менее 1,4	110	2,1
14:55—15:34					1100	11		
15:50—16:30					570	7,7		

Как видно из данных табл. 2, концентрация радиоактивных аэрозолей по отдельным элементам за пределами промплощадки может быть даже выше, чем на самой площадке. Естественный вывод, который следует из первичного анализа данных, состоит в том, что на протяжении всего периода иссле-

дования источник радиоактивных аэрозолей (т. е. площадка с аварийными блоками) периодически «дышал». Эти спорадически возникающие «плюмы» и создавали за пределами площадки неравномерность полей концентраций различных нуклидов. В России для населения годовое поступление, например, ^{131}I воздушным путем в организм взрослого человека при планируемом облучении ограничено величиной 14 000 Бк согласно НРБ-99/2009, что соответствует индивидуальной поглощенной дозе около 4 мГр. В случае аварийного облучения граничная доза облучения щитовидной железы взрослого человека, которая не требует вмешательства, составляет 250 мГр или в годовом поступлении 830 кБк; при скорости легочной вентиляции $20 \text{ м}^3/\text{сут}$ это эквивалентно среднесуточной концентрации в течение 1 сут в $40\,000 \text{ Бк}/\text{м}^3$. Реальным ориентиром опасности может служить концентрация ^{131}I в воздухе на уровне $10 \text{ кБк}/\text{м}^3$.

Довольно многочисленные измерения над поверхностью земли проводятся в префектуре Фукусима. В этих пробах определялись два нуклида: ^{131}I и ^{137}Cs . В подавляющем большинстве случаев их измеренные концентрации отражают уровни вторичного загрязнения воздушной среды (табл. 3).

Таблица 3. Результаты анализа воздуха в префектуре Фукусима

№ места отбора пробы	Дата	Время отбора пробы (МСК)	Удельная объемная активность, Бк/м ³		Мощность дозы в месте отбора пробы (на момент отбора), мкЗв/ч
			^{131}I	^{137}Cs	
[1]	19 марта	12:30—12:50	1,22	Н. о.	7,2
[1]	20 марта	12:30—12:50	203	32,2	5
[1]	21 марта	12:30—12:50	2,5	Н. о.	4,5
[3]	23 марта	4:45—4:55	4	1,2	5,5
[4]	22 марта	5:10—5:30	10,5	Н. о.	3,4
[7]	25 марта	6:58—7:09	3,5	Менее 0,99	3,2
[7]	25 марта	7:58—8:09	4,3	1,6	3,2
[7]	25 марта	8:57—9:08	15	Менее 0,98	3,2
[7]	25 марта	9:58—10:09	22	1,1	3,2
[12]	21 марта	6:30—6:50	3,74	Н. о.	0,9
[12]	22 марта	5:32—5:52	3,92	Н. о.	2,2
[15]	23 марта	6:40—7:02	2,8	Менее 1,1	2,3
[15]	24 марта	4:58—5:09	3,1	Менее 0,99	2
[15]	24 марта	5:58—6:09	2,4	1,3	2,8
[15]	24 марта	6:58—7:09	2,5	Менее 1,2	2,5
[15]	24 марта	7:58—8:09	2,2	1,6	2,2
[15]	24 марта	8:58—9:09	2,8	Менее 1,2	2,5
[15]	24 марта	9:58—10:09	2,1	Менее 1,0	2,2
[21]	23 марта	7:54—8:17	8	Менее 1,4	9,4
[33]	24 марта	5:20—5:41	4,5	Менее 1,1	30

Таблица 3. Окончание

№ места отбора пробы	Дата	Время отбора пробы (МСК)	Удельная объемная активность, Бк/м ³		Мощность дозы в месте отбора пробы (на момент отбора), мкЗв/ч
			¹³¹ I	¹³⁷ Cs	
[33]	24 марта	6:20—6:40	3,3	Менее 0,98	30
[33]	24 марта	7:20—7:42	3,8	Менее 1,2	30
[33]	24 марта	8:20—8:42	3,8	1,5	30
[33]	24 марта	9:20—9:42	3,3	1,7	30
[36]	23 марта	4:50—5:10	5,2	Менее 1,2	9
[51]	20 марта	7:57—8:17	24	1,75	0,6
[51]	21 марта	7:37—7:57	2,69	Н. о.	0,5
[51]	22 марта	6:32—6:52	6,29	Н. о.	0,4
[62]	21 марта	7:00—7:20	12,8	2,37	4,1
[62]	22 марта	6:26—6:46	5,87	Н. о.	4,2
[71]	23 марта	7:15—7:58	530	6,6	5,5—14
[71]	23 марта	8:30—9:10	180	2,3	5,5—14
[71]	23 марта	9:20—5:59	110	2,1	5,5—14
[71]	24 марта	4:06—4:44	5,9	Менее 0,66	5,6
[71]	24 марта	4:53—5:33	9	Менее 0,71	5,6
[71]	24 марта	5:44—6:26	12	1,1	5,6
[71]	25 марта	5:51—6:38	43	2	4,1—5,5
[71]	25 марта	7:12—7:42	23	1,4	2
[71]	25 марта	8:12—8:42	19	1,3	2,8
[71]	25 марта	9:12—9:42	24	2,5	2,5
[71]	25 марта	10:12—10:42	10	1,3	2,2
[75]	20 марта	9:25—9:45	6,89	Н. о.	0,6
[75]	21 марта	9:00—9:20	28,9	Н. о.	1,5
[75]	22 марта	8:00—8:20	17	Н. о.	0,6
[80]	21 марта	8:20—8:40	13,2	0,735	2,8
[80]	22 марта	7:35—7:55	3,81	Н. о.	1,8

Примечание. Н. о. — не обнаружено.

Результаты измерений радиоактивных выпадений

В результате распространения газоаerosольных выбросов с аварийной АЭС на территории Японии сформировались два следа радиоактивных выпадений:

- в северо-западном направлении, протяженностью до 50—60 км;
- в юго-юго-западном направлении, протяженностью до 200—250 км.

Северо-западный след

Северо-западный след протянулся от АЭС примерно на 60 км. К сожалению, мощность дозы при прохождении радиоактивного облака не была отслежена, поскольку датчики ЯАСКРО в этот период были в нерабочем состоянии. Отголоски первого выброса, который имел и северную ветвь, зарегистрировали российские спасатели.

Отряд российских спасателей, находящихся на территории Японии в районе города Сендай (координаты 38,3333° с. ш. и 140,95° в. д.) примерно в 100 км севернее аварийной АЭС «Фукусима-1», с 14 марта 2011 г. приступил, в частности, к регулярному измерению мощности дозы в месте своего расположения.

14 марта и до 8 часов 15 марта (МСК) радиационный фон был на уровне естественного и составлял 0,12 мкЗв/ч. К 10 часам 15 марта он незначительно увеличился до 0,2 мкЗв/ч. С 10 часов радиационный фон начал медленно расти, очевидно из-за прохождения радиоактивного шлейфа, и этот рост продолжался до 14:45, когда он составил 4,2 мкЗв/ч. После этого наблюдалось достаточно резкое падение мощности дозы в течение получаса примерно на порядок величины. В 15:30 мощность дозы составляла примерно 0,4 мкЗв/ч, после чего стабилизировалась на этой величине.

За время прохождения радиоактивного факела над местом нахождения отряда возможная доза дополнительного облучения персонала составила около 12 мкЗв. За последующие 10 сут от радиоактивных выпадений (и в отсутствие новых выпадений) доза дополнительного облучения спасателей не превысит 60 мкЗв. Таким образом, за 10 сут доза дополнительного облучения спасателей из отряда российского МЧС составит около 70 мкЗв.

Мы полагаем, что северо-западный след в его нынешнем виде закончил формирование 13 марта. Измерения, начавшиеся 16 марта, фиксировали уже только дозу от выпавших нуклидов. Ее спад в последующие сутки показан на рис. 13.

Как уже отмечалось, ширина следа на удалении около 30 км составляла около 10 км. Для оси следа характерны некоторые локальные особенности (возможно, связанные с рельефом местности и растительностью), приведшие к образованию отдельных пятен с повышенным уровнем выпадений. Однако не исключено, что более детальные исследования размоют границы этих пятен.

Юго-западный след

В префектуре Ибараки отмечена самая высокая мощность дозы от выпадений (Hotiguchi City). Радиоактивный факел прошел фактически над всей территорией префектуры. В момент прохождения радиоактивных облаков в точках мониторинга мощность дозы варьировала от 2 до 5 мкГр/ч, что видно из данных, представленных на рис. 22.

Увязка событий, происходящих на АЭС, с данными мониторинга постоянно анализируется и уточняется. Так, работы по декомпрессии на блоке № 2 АЭС «Фукусима-1», которые были начаты в 20:37 15 марта, сопровождались выбросом радиоактивных благородных газов и изотопов йода в окружающую среду. На площадке АЭС «Фукусима-2» это событие отразилось повсеместным ростом мощности дозы (рис. 23).

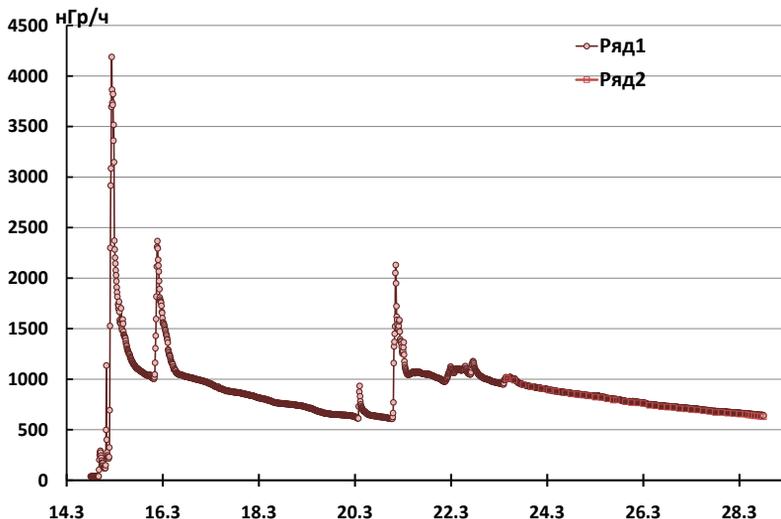


Рис. 22. Динамика мощности дозы в пункте измерения № 15 префектуры Ибараки

Второй пик на рис. 20 по времени привязан к технологическим событиям. В момент выброса был северо-восточный и северо-северо-восточный ветер. Скорость приземного ветра колебалась от 2 до 5 м/с. Радиоактивное облако зафиксировано датчиками ЯАСКРО на промплощадке АЭС «Фукусима-2» (рис. 24) и всеми датчиками этой префектуры. Динамику мощности дозы над территорией префектуры Ибараки иллюстрирует рис. 25.

По сравнению с первым облаком, прошедшим над этой территорией и оставившим радиоактивные выпадения, это второе облако было менее

мощным (в два-три раза слабее), а количество выпадений было примерно в пять раз ниже.

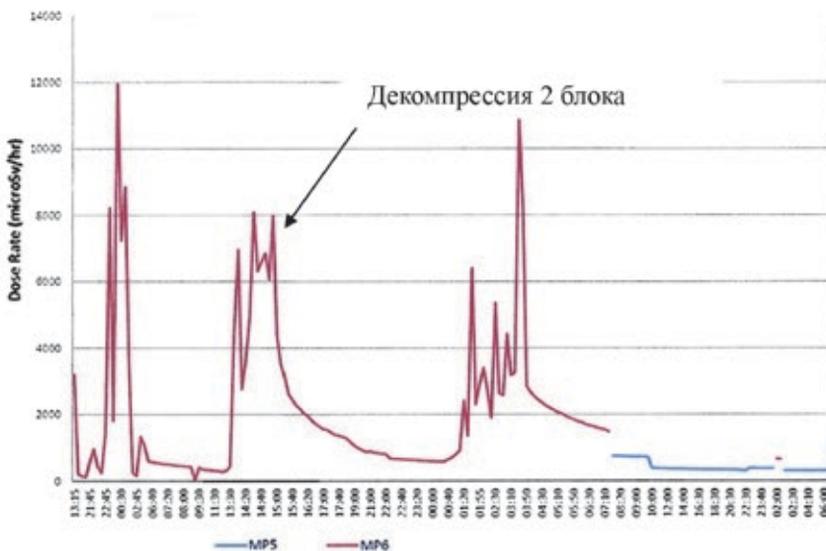


Рис. 23. Динамика мощности дозы в точках МР5 и МР6 на площадке АЭС «Фукусима-2» (время на шкале x привязано к UTC)



Рис. 24. Мощность дозы на площадке АЭС «Фукусима-2» на 27 марта

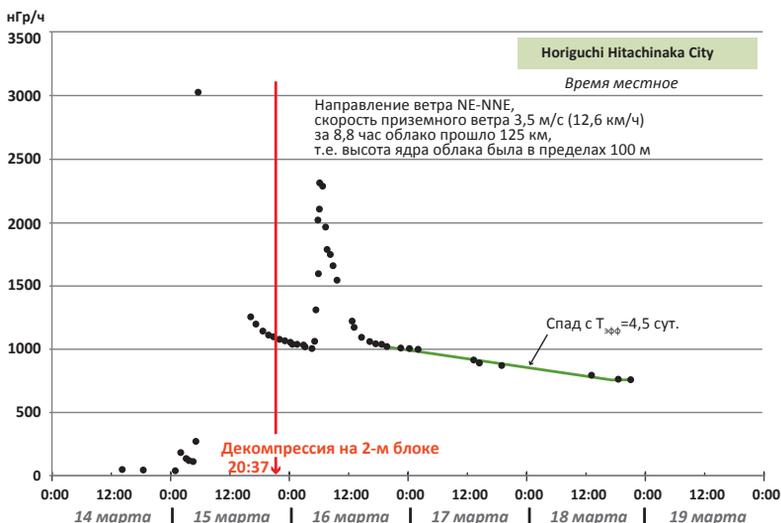


Рис. 25. Мощность дозы Нoriguchi City с 14 по 18 марта

На рис. 25 отражено уменьшение мощности дозы после прохождения радиоактивного облака. Фактически это результат радиоактивного распада нуклидов, сформировавших загрязнение почвенного покрова. По периоду спада мощности дозы, который в последующие двое суток после прохождения облака составил примерно 4,5 сут, можно с определенностью заключить, что основное загрязнение, как и в случае северо-западного следа, сформировано изотопами ^{132}Te , ^{132}I и ^{131}I .

Следующее радиоактивное облако прошло над префектурой Ибараки 21 марта. С 18 марта в целом ряде префектур начат сбор информации по суточным выпадениям радиоактивных аэрозолей. Анализ выполнялся для двух биологически значимых радионуклидов — ^{131}I и ^{137}Cs . Результаты измерений представлены в табл. 4 и 5. Как видно из данных, представленных в табл. 4 и 5, наиболее значимые выпадения радионуклидов отмечены в префектуре Ибараки. Судя по остаточной мощности дозы, уровень загрязнения почвенного покрова в месте установки планшетов за счет последнего облака почти удвоился по сравнению с тем, который был до прихода облака. От последнего облака выпало около 200 кБк/м² ^{131}I и около 25 кБк/м² ^{137}Cs .

Можно полагать, что на 22 марта максимальная плотность загрязнения в префектуре Ибараки по ^{131}I составляла 150 кБк/м², а по ^{134}Cs и ^{137}Cs — около 30 кБк/м² (от каждого).

**Таблица 4. Замеры выпадений ^{131}I (Бк/м²), произведенные
в течение 24 ч с 9:00 до 9:00**

№ п/п	Место	18—19 марта	19—20 марта	20—21 марта	21—22 марта	22—23 марта	23—24 марта	24—25 марта	25—26 марта	26—27 марта
1	Иватэ (Мориока)	Н. о.	Н. о.	4800	Н. о.	23	Н. о.	2,8	190	31
2	Акита	Н. о.	Н. о.	24	3,9	2,0	3,9	Н. о.	2,2	Н. о.
3	Ямагата (Ямагата)	Н. о.	22	58000	590	2100	170	150	7500	110
4	Ибараки	—	490	93000	85000	27000	1200	480	860	76
5	Тотиги (Уцуномия)	1300	540	5300	25000	23000	1200	570	670	320
6	Гумма (Маэбаси)	230	190	990	1500	310	42	27	37	6,9
7	Сайтама (Сайтама)	64	66	7200	22000	22000	16000	160	91	57
8	Тиба (Итихара)	21	44	1100	14000	22000	7700	130	320	42
9	Токио (Синдзюку)	51	40	2900	32000	36000	13000	173	220	100
10	Канагава	40	38	750	340	1300	3100	39	28	6,4
11	Ниигата	Н. о.	2,5	47	Н. о.					
12	Яманаси (Куху)	175	Н. о.	Н. о.	4400	110	3300	9,2	Н. о.	Н. о.

**Таблица 5. Замеры выпадений ^{137}Cs (Бк/м²), произведенные
в течение 24 ч с 9:00 до 9:00**

№ п/п	Место	18—19 марта	19—20 марта	20—21 марта	21—22 марта	22—23 марта	23—24 марта	24—25 марта	25—26 марта	26—27 марта
1	Иватэ (Мориока)	Н. о.	0,24	690	Н. о.	13	5,6	0,34	2,5	Н. о.
2	Акита	Н. о.	Н. о.	Н. о.	Н. о.	1,8	4,7	Н. о.	Н. о.	Н. о.
3	Ямагата (Ямагата)	Н. о.	20	4300	140	1900	150	150	1200	61
4	Ибараки	—	48	13000	12000	420	63	99	160	Н. о.
5	Точиги (Уцуномия)	62	45	250	440	99	95	54	63	73
6	Гумма (Маэбаси)	84	63	87	72	Н. о.				
7	Сайтама (Сайтама)	Н. о.	Н. о.	790	1600	320	180	17	16	16
8	Тиба (Итихара)	Н. о.	3,8	110	2800	360	210	23	86	24
9	Токио (Синдзюку)	Н. о.	Н. о.	560	5300	340	160	37	12	36
10	Канагава	Н. о.	Н. о.	210	110	64	42	7,7	14	Н. о.
11	Ниигата	Н. о.								
12	Яманаси (Куху)	Н. о.	Н. о.	Н. о.	400	26	180	Н. о.	10	Н. о.

Концентрация радионуклидов в почве

Важную информацию несут и пробы почвы, отобранные по северо-западному следу в префектуре Фукусима. К сожалению, пока остается неизвестным метод пробоотбора почвы, но сами значения концентраций радионуклидов в почве весьма показательны. Данные по мониторингу уровней загрязнения почвенного покрова представлены в табл. 6.

Таблица 6. Результаты анализа проб грунта в префектуре Фукусима

№ места отбора пробы	Дата	Время отбора (МСК)	Удельная активность, Бк/кг		Мощность дозы в месте отбора пробы (на момент отбора), мкЗв/ч
			¹³¹ I	¹³⁷ Cs	
[4]	23 марта	4:43	4200	770	2,8
[5]	25 марта	5:24	6900	1600	2,7
[6]	25 марта	6:18	11000	3300	3,7
[7]	25 марта	6:33	8000	1300	3,2
[11]	23 марта	5:08	33000	8600	2,8
[15]	23 марта	6:50	11000	3300	2,3
[15]	23 марта	6:58	4900	220	2,5
[21]	23 марта	8:00	70000	12000	9,4
[33]	21 марта	3:45	43000	4700	5
[33]	22 марта	4:11	48000	5400	10
[33]	23 марта	5:10	200000	45000	103
[34]	21 марта	5:51	16000	14000	1,5
[34]	22 марта	6:28	36000	3200	1,5
[34]	23 марта	7:17	92000	15000	15
[71]	23 марта	7:00	69000	2600	5,5—14
[71]	23 марта	10:22	140000	2900	5,5—14
[71]	25 марта	8:15	560	410	5,5

Дополнительно образцы проб почвы, воды и донных отложений были отобраны по северо-западному следу в префектуре Фукусима. Результаты измерений концентраций радионуклидов в этих пробах представлены в табл. 7.

Как уже упоминалось, на северо-западном следе отмечены локальные неоднородности в загрязнении земной поверхности. Из данных табл. 7 хорошо видно, что одной из таких точек является точка № 62, в которой уровни загрязнения почвы ¹³¹I составляли более 1 МБк/кг, а по ¹³⁷Cs — около 160 кБк/кг.

**Таблица 7. Результаты анализа образцов окружающей среды
в префектуре Фукусима**

№ места отбора пробы	Дата	Время отбора (МСК)	Удельная активность, Бк/кг		Тип пробы
			¹³¹ I	¹³⁷ Cs	
[4]	18 марта	5:45	84300	14200	Почва
[4]	19 марта	5:00	85400	8690	Почва
[4]	20 марта	6:04	151000	15100	Почва
[12]	18 марта	5:50	19300	3510	Почва
[12]	19 марта	5:35	6970	1260	Почва
[12]	20 марта	6:40	5390	1250	Почва
[12]	21 марта	6:30	3000	390	Почва
[51]	18 марта	6:30	8170	2260	Почва
[51]	19 марта	6:15	14100	4630	Почва
[51]	20 марта	7:50	10300	3020	Почва
[51]	21 марта	7:40	4830	910	Почва
[51]	22 марта	6:40	7440	107	Дождевая вода
[62]	18 марта	6:20	2090	511	Проба из пруда (ил)
[62]	19 марта	5:36	2450	940	Проба из пруда (ил)
[62]	19 марта	5:40	300000	28100	Почва
[62]	20 марта	6:40	2010	437	Проба из пруда (ил)
[62]	20 марта	6:40	1170000	163000	Почва
[62]	21 марта	6:35	1720	456	Проба из пруда (ил)
[62]	22 марта	6:00	1330	172	Проба из пруда (ил)
[75]	19 марта	7:15	12600	288	Почва
[75]	20 марта	9:17	14600	460	Почва
[75]	21 марта	9:10	30700	1220	Почва
[80]	18 марта	7:30	22600	3280	Почва
[80]	19 марта	7:00	35800	4040	Почва
[80]	20 марта	8:30	35800	4850	Почва

Измерение радиоактивных веществ в сельхозпродукции и питьевой воде

Для оценки доз возможного внутреннего облучения необходимо провести анализ уровней загрязнения различных продуктов питания и питьевой воды. Большое значение для оценки уровней загрязнения мясомолочной продукции местного производства имеет знание о загрязнении пастбищной травы. Именно поэтому обзор измерений начнем с данных, характеризующих загрязненность растительного покрова. Японские исследователи делят растительные пробы на две категории: те, которые могут непосредственно употребляться в пищу (о них речь идет ниже), и те, которые в пищу чело-

веком не употребляются (дикие травы). В табл. 8 представлены результаты измерений различных трав, отобранных в префектуре Фукусима. Места отбора проб указаны в соответствии с нумерацией точек отбора (см. рис. 18).

Таблица 8. Результаты анализа образцов флоры (листьев растений) в префектуре Фукусима

№ места отбора пробы	Дата	Время отбора (МСК)	Удельная активность, Бк/кг		Мощность дозы в месте отбора пробы (на момент отбора), мкЗв/ч
			¹³¹ I	¹³⁷ Cs	
[4]	18 марта	5:45	173 000	72 800	—
[4]	19 марта	5:00	184 000	65 100	—
[4]	20 марта	6:05	308 000	138 000	4,2
[4]	21 марта	6:03	315 000	120 000	3,5
[4]	22 марта	5:00	180 000	89 000	—
[12]	18 марта	5:35	360 00	40 100	1,6
[12]	19 марта	5:35	680 00	38 500	0,8
[12]	20 марта	6:40	75 700	50 000	0,7
[12]	21 марта	6:30	30 800	25 000	0,7
[51]	18 марта	6:35	181 000	28 300	0,9
[51]	19 марта	6:15	201 000	73 800	0,7
[51]	20 марта	7:50	36 900	11 700	0,6
[51]	21 марта	7:40	20 300	11 200	0,4
[62]	18 марта	6:20	2 520 000	1 800 000	Более 30
[62]	19 марта	5:40	845 000	1 010 000	26,5
[62]	20 марта	6:40	2 540 000	2 650 000	25,8
[62]	21 марта	6:32	1 330 000	1 240 000	20,4
[62]	22 марта	6:00	1 110 000	1 500 000	15,3
[75]	18 марта	7:15	690 000	17 400	—
[75]	19 марта	7:40	468 000	10 100	—
[75]	20 марта	9:25	548 000	17 500	—
[75]	21 марта	9:10	115 000	2 380	—
[80]	18 марта	7:30	88 600	17 800	—
[80]	19 марта	7:00	455 000	24 900	—
[80]	20 марта	7:20	497 000	24 700	3,4
[80]	21 марта	8:07	289 000	13 400	2,8
[80]	22 марта	7:35	140 000	17 200	1,8

Наиболее высокие уровни загрязнения диких трав отмечены в точке № 62. В этой точке концентрация и ¹³¹I, и ¹³⁷Cs составляла единицы МБк/кг. Точка № 62, как мы полагаем, находится на оси радиоактивного следа, сформированного 12 марта, на удалении примерно 40 км от АЭС. Она находится недалеко от мест измерения мощности дозы (точки «Е» и точки № 39), в которых днем 16 марта мощность дозы составляла около 14 мГр/ч, а гру-

бая оценка плотности выпадений дает величины порядка 4 МБк/м² по ¹³¹I и около 0,7 МБк/м² по ¹³⁷Cs. Полагаем, что выпадения были сухими, тогда ожидаемая плотность выпадений на растительный покров может составить примерно те же величины. Исходя из плотности растительного покрова 0,5 кг/м² и учитывая радиоактивный распад, получим оценку уровней загрязнения травы на уровне единиц МБк/кг. Единственное, что не вписывается в данную реконструкцию, — близкое отношение концентрации йода и цезия в растительной ткани. Возможно, что метеосадки, следовавшие за выпадениями, лучше смывали с поверхности растений йод, чем изотопы цезия.

Концентрация радионуклидов в продуктах питания

Данные по загрязнению пищевой растительной продукции представлены в табл. 9. К сожалению, не все названия продуктов питания были нами поняты из-за специфики японской кухни.

Таблица 9. Концентрация ¹³¹I и ¹³⁷Cs в молоке и продуктах питания растительного происхождения, Бк/кг

Дата отбора	Место отбора		¹³¹ I	¹³⁷ Cs
	Префектура	Населенный пункт		
<i>Молоко</i>				
16 марта	Фукусима	—	1190	
17 марта	Фукусима	Kawamata machi	1510	
18 марта	Фукусима	Kawamata machi	932	
19 марта	Фукусима	Iwaki-city	5200	210
20 марта	Фукусима	Fukushima-Kawamata-machi	5300	
19—21 марта	Ибараки	Ibaraki-Mito-City	1700	
<i>Шпинат</i>				
18 марта	Ибараки	Takahagi-city	54100	1931
19 марта	Тотиги	Utsunomiya-city	5700	790
	Ибараки	Takahagi-city	11000	586
	Гумма	Isezaki-city	2630	
20 марта	Ибараки	Tsukuba-city	4100	
21 марта	Ибараки	Hokota-machi	4100	
21 марта	Фукусима	Izumisaki-mura	19000	20000
21 марта	Ибараки	Hokota-city	12000	2110
22 марта	Ибараки	Hokota-city	12000	2100
23 марта	Ибараки	Hitachi-city	25200	
		Hitachioomiya-city	18550	
		Naka-city	14800	
		Hokota-city	7710	
		Morlya-city	2100	

Таблица 9. Окончание

Дата отбора	Место отбора		¹³¹ I	¹³⁷ Cs
	Префектура	Населенный пункт		
<i>Перья лука</i>				
23 марта	Ибараки	Hokota-city	356	
<i>Pena</i>				
21 марта	Ибараки	Hokota-city	12000	2110
	Фукусима	Sukagawa-city		420
<i>Kakina</i>				
19 марта	Тотиги	Sano-city	2000	
20 марта	Гумма	Takasaki-city		555
<i>Kanycta</i>				
21 марта	Фукусима	Minamisouma-city	5200	1400
<i>Kanycta брокколи</i>				
21 марта	Фукусима	Litate-mura	17000	7000
<i>Kukitana</i>				
21 марта	Фукусима	Ootama-mura	15000	41000
<i>Panc</i>				
21 марта	Фукусима	Shirakawa-city	8200	4600
<i>Chijirena</i>				
21 марта	Фукусима	Tanakura-machi	3700	4600
<i>Koutaisai</i>				
21 марта	Фукусима	Nihonmatsu-city	5400	5400
<i>Santona</i>				
21 марта	Фукусима	Saigou-mura	4900	12000
<i>Shinobufuyuna</i>				
21 марта	Фукусима	Kawamata-machi	22000	14000

Более низкие уровни загрязнения огородной зелени по сравнению с дикими травами могут быть объяснены тем, что в этот период в Японии отмечались ночные заморозки; вполне вероятно, что грядки с зеленью на ночь укрывались, а значительная часть выпадений прихлала именно на ночные часы.

Концентрация радионуклидов в питьевой воде

Замеры уровней загрязнения питьевой воды начаты 17 марта. Можно полагать, что не во всех населенных пунктах питьевое водоснабжение производится централизованно из подземных источников. Однако конкретных сведений о том, каковы источники водоснабжения в конкретных пунктах, у нас пока нет. Концентрации двух биологически наиболее значимых нуклидов ¹³¹I и ¹³⁷Cs приводятся в табл. 10 и 11 и на рис. 26.

Нормативы для воды, действующие в Японии при нормальной жизни, равны:

- 300 Бк/л для ^{131}I ;
- 200 Бк/л для ^{137}Cs .

Таким образом, в условиях аварии кардинальных защитных мер по защите питьевого водоснабжения не требуется, однако необходимо вести мониторинг.

Таблица 10. Концентрация ^{131}I в питьевой воде, Бк/кг

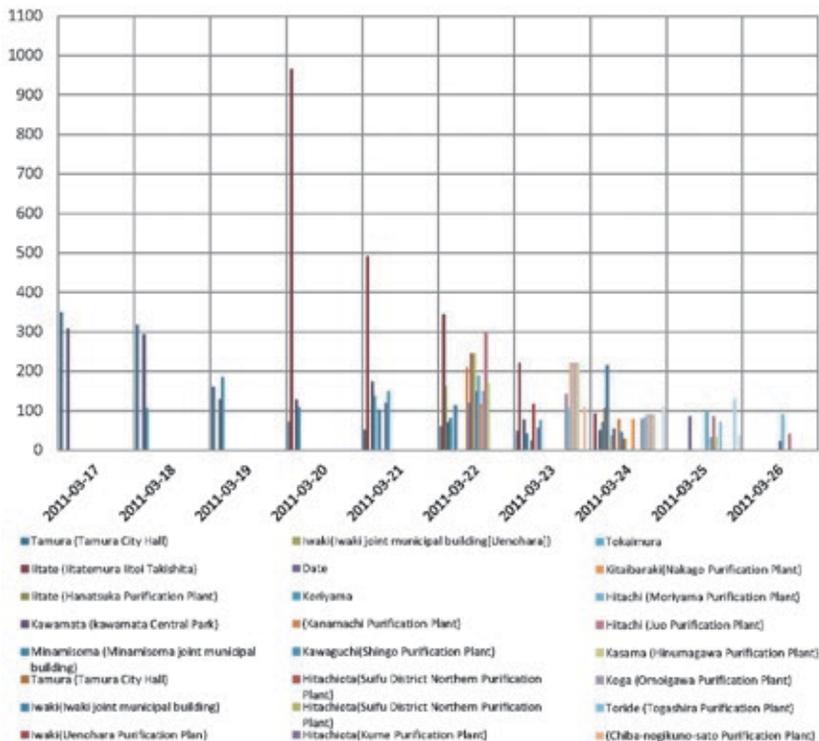
Место отбора	17 марта	18 марта	19 марта	20 марта	21 марта	22 марта	23 марта	24 марта
Иватэ (Мориока)		Н. о.	Н. о.	Н. о.	Н. о.	3,4	5,3	1,53
Акита								
Ямагата (Ямагата)		Н. о.	Н. о.	Н. о.	Н. о.	3,9	Н. о.	1,5
Ибараки		—	—	12	58	12	24	2,2
Тотиги (Уцунomia)		77	16	10	13	15	56	110
Гумма (Маэбаси)		2,5	3,4	5,9	4,7	9,3	7,0	8,0
Сайтама (Сайтама)		0,62	0,93	2,0	3,4	9,2	12	18
Тиба (Итихара)		0,79	1,2	0,68	0,59	0,48	7,8	13
Токио (Синдзюку)		1,5	2,9	2,9	5,3	19	26	25,6
Канагава		Н. о.	0,43	0,46	0,58	0,93	0,75	1,0
Ниигата		0,27	2,1	3,6	3,2	3,0	7,8	7,5
Яманаси (Куху)		Н. о.	Н. о.	0,24	Н. о.	Н. о.	Н. о.	0,22
Тамура (Фукусима)	348	317	161					
Litate-mura (Фукусима)				492	440			
Kawamata-city (Фукусима)		293	130		174			
Minamisouma-city (Фукусима)		105	185		137			
Date-city (Фукусима)					120			
Koorigayama-city (Фукусима)					150			
Iwaki-city (Фукусима)					103			
Touka-mura (Ибараки)							189	

Таблица 11. Концентрация ^{137}Cs в питьевой воде, Бк/кг

Место отбора	18 марта	19 марта	20 марта	21 марта	22 марта	23 марта	24 марта
Иватэ (Мориока)	Н. о.	0,13	Н. о.				
Акита	Н. о.						
Ямагата (Ямагата)	Н. о.	0,43					
Ибараки	—	—	0,48	18	4,8	3,3	1,1
Тотиги (Уцунomia)	1,6	2,6	2,8	6,0	5,3	9,3	9,3
Гумма (Маэбаси)	0,22	Н. о.	1,2	0,72	0,37	0,72	0,55
Сайтама (Сайтама)	Н. о.	0,32	0,82				

Табл 11. Окончание

Место отбора	18 марта	19 марта	20 марта	21 марта	22 марта	23 марта	24 марта
Тиба (Итихара)	Н. о.						
Токио (Синдзюку)	Н. о.	0,21	Н. о.	0,22	0,31	1,5	2,4
Канагава	Н. о.						
Ниигата	Н. о.						
Яманаси (Куху)	Н. о.						



Анализ по измерениям проб молока в поселке Кавамата (префектура Фукусима). Для анализа ситуации с загрязнением продуктов питания в поселке Кавамата, расположенном на удалении примерно 50 км от АЭС, необходимо было найти его на карте и оценить плотность выпадения различных нуклидов на пастбище (рис. 27).

На 16 марта мощность дозы в районе расположения поселка Кавамата составляла от 4 до 18 мкГр/ч. Ранее было установлено, что мощность дозы

обусловлена главным образом выпадениями ^{131}I , ^{132}Te и ^{132}I . На 22 марта (13 часов) мощность дозы находилась в районе 5 мкЗв/ч (рис. 28), что примерно соответствовало плотности загрязнения по ^{131}I $0,5\text{—}1 \text{ МБк/м}^2$.



Рис. 27. Расположение поселка Кавамата относительно АЭС

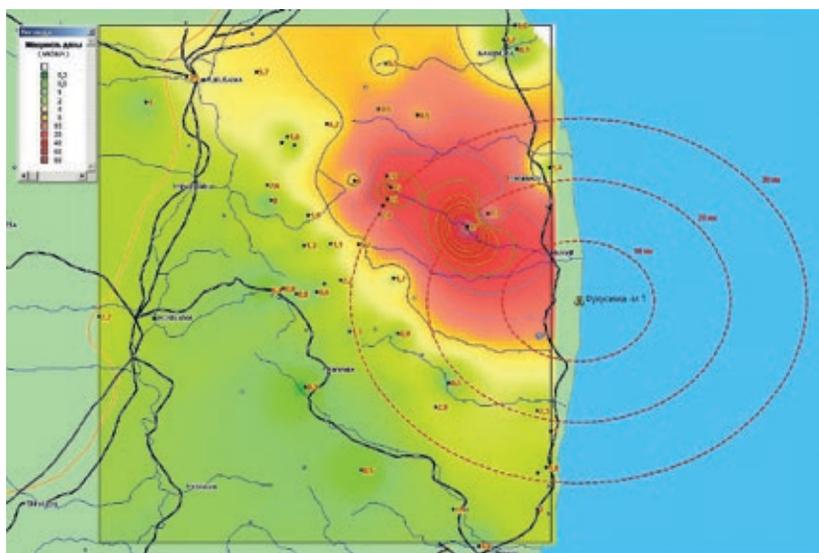


Рис. 28. Изодозы на северо-западном следе

Исходя из того, что впадения были «сухими», можно предполагать, что плотность загрязнения травяного покрова составляла 0,25—0,5 МБк/м². В рацион коровы мог входить зеленый корм. Если корова съедала траву примерно с 10 м²/сут (остальной рацион составляли сухие корма и комби-корм), то в ее организм могло попасть до 5 МБк ¹³¹I. В молоко в этом случае перешло бы примерно 150 кБк (для российских коров это значение могло составить 500 кБк). При суточном удое в 60 л концентрация ¹³¹I в молоке могла составить 2,5 кБк/л от суточного потребления загрязненных кормов. Реально измеренные значения 19 марта дали диапазон концентраций от 0,9 до 1,5 кБк/л. 20 марта была отобрана проба молока с концентрацией ¹³¹I 5,3 кБк/л, что показывает идентичность с нашими оценками.

Аварийный норматив на сырое молоко в Японии по концентрации ¹³¹I составляет 0,1 кБк/л для детей и 0,3 кБк/л для взрослых.

Чтобы оценить возможный вред для населения при бесконтрольном потреблении такой продукции, сделаем ряд консервативных предположений. Количество молока, потребляемое детьми, может достигать до 500 г/сут. При этом консервативно поступление ¹³¹I в организм ребенка при загрязнении молока порядка 2 кБк/л можно оценить как 0,5—1,0 кБк/сут. В этом случае индивидуальная поглощенная доза в щитовидную железу для годовалого ребенка за сутки потребления загрязненного молока может составить 2—3 мГр, а при непрерывном поступлении в течение месяца — 20—30 мГр. Для взрослого населения при потреблении молока на уровне 39 л/год (примерно 0,1 л/сут) максимальная индивидуальная доза на щитовидную железу от потребления жидкого молока составит консервативно 0,06 мГр/сут, а при непрерывном потреблении — 0,6 мГр.

После аварии на Чернобыльской АЭС в России были введены в действие временные допустимые уровни по ¹³¹I в молоке и других продуктах (документ от 6 мая 1986 г.). Аварийный норматив составлял 3,7 кБк/л (кг). На сегодня неизвестны радиационные последствия для здоровья человека при уровнях облучения щитовидной железы менее 0,5 Гр. То есть для детского населения мы имеем по меньшей мере десятикратный запас, а для взрослого населения запас по дозе составляет почти три порядка.

Анализ ситуации по измерениям проб шпината и иной растительной продукции на южном следе. В ряде населенных пунктов в префектурах, попавших под радиоактивные выпадения, отмечены повышенные уровни загрязнения растительной продукции (шпината, лука порея, капусты брокколи) ¹³¹I. При этом действующий в Японии норматив на эту продукцию (2 кБк/кг) превышался более чем на порядок величины.

Концентрация ^{131}I в отдельных пробах изменялась от 4 до 25 кБк/кг. В одной пробе шпината концентрация ^{131}I составила 54 кБк/кг.

Японская кухня в значительной степени ориентирована на рыбу, однако главное в ней — рис. В Японии едят три раза в день. Обычный завтрак японца состоит из риса и супа мисо, в который добавлены морские водоросли, тофу или лук-порей, а также дополнительного блюда, например, рыбы, приготовленной на гриле. Типичный обед может включать заправленные яйцом отварные овощи с вареным цыпленком, бульон из которых используется для приготовления супа; овощи и цыпленок подаются на рисе. Ужин — основная трапеза при трехразовом питании. На ужин подают небольшое количество рыбы на гриле или мясное блюдо, например, жаркое из мяса с картофелем; кроме того, на столе обязательно присутствуют отварная зелень, суп мисо и рис.

Чтобы оценить возможный вред для населения при бесконтрольном потреблении зеленой продукции с огорода, сделаем ряд консервативных предположений. Среднестатистический японец потребляет 100 г шпината в сутки и до 50 г иной зеленой продукции. На основании реальных данных о загрязнении ^{131}I зеленых овощей на уровне до 54 кБк/кг в префектуре Ибараки можно достаточно консервативно оценить поступление этого нуклида в организм взрослого человека на уровне 3—5 кБк/сут.

Поступление ^{131}I в щитовидную железу взрослого человека составит около 30% суточного потребления, т. е. от 1 до 1,5 кБк/сут. Дозовый коэффициент, позволяющий получить поглощенную дозу в щитовидной железе, составляет:

- для взрослого человека — 0,43 мГр/кБк;
- для ребенка в возрасте 1 года — 3,6 мГр/кБк.

В этом случае индивидуальная поглощенная доза в щитовидную железу для взрослого человека от потребления зеленых овощей в течение суток может составить 0,4—0,6 мГр, а при непрерывном потреблении этих овощей за весь период существования выпавшего ^{131}I — 4—6 мГр. Дети значительно меньше потребляют зелень, и для них критическим продуктом является молоко.

В одной из растительных проб обнаружено аномально высокое загрязнение ^{137}Cs на уровне 20 кБк/кг, что превышает действующий в Японии норматив по этому нуклиду в 40 раз. Разовое потребление такой растительной продукции в количестве 100 г создаст эффективную дозу облучения на уровне 25 мкЗв. Трудно предположить, что такая продукция будет регулярно потребляться в массовом порядке.

Измерение радиоактивных веществ в морской воде

Значительная часть выбросов с АЭС «Фукусима-1» распространилась над морской акваторией. Кроме того, некоторая часть радионуклидов аварийного происхождения со сбрасываемыми водами попадала в прибрежную часть океана. Точки контроля за концентрацией радионуклидов в морской воде в непосредственной близости от мест сброса показаны на рис. 29. Результаты измерений представлены в табл. 12.

Таблица 12. Объемная активность нуклидов в морской воде, Бк/см³

Время измерения	¹³¹ I	¹³² I	¹³⁴ Cs	¹³⁶ Cs	¹³⁷ Cs
<i>Место сброса — вокруг канала сброса (на юге) АЭС «Фукусима-1» (приблизительно 330 м на юг от канала сброса блоков 1—4)</i>					
25.03.2011, 8:30	50	3,3	7	0,8	7,2
24.03.2011, 10:25	4,2	1,7	0,45	0,061	0,44
23.03.2011, 8:50	5,9	5,4	0,25	0,025	0,25
22.03.2011, 6:30	1,2	1,4	0,15	0,024	0,15
<i>Место сброса — вокруг канала сброса (на севере) блоков 5 и 6 АЭС «Фукусима-1» (приблизительно 30 м на север от канала сброса блоков 5—6)</i>					
25.03.2011, 8:50	11	0,19	1,7	0,2	1,7
24.03.2011, 10:40	0,95	0,45	0,11	0,011	0,11
23.03.2011, 9:10	2,7	2,9	1,8	0,23	1,90
<i>Место сброса — вокруг канала сброса (на севере) от блоков 3 и 4 АЭС «Фукусима-2» (приблизительно 10 км от АЭС «Фукусима-1»)</i>					
25.03.2011, 10:00	0,43	0,058	0,026	0,0044	0,034
24.03.2011, 9:30	1,1	0,12	0,099	0,068	0,094
23.03.2011, 13:51	0,74	0,2	0,051	—	0,06
22.03.2011, 14:28	1,14	Ниже предела обнаружения	0,046	Ниже предела обнаружения	0,039
21.03.2011, 23:15	1,1	0,16	0,048	0,007	0,053
<i>Место сброса — на побережье Ивасава (около 7000 м на юг от канала сброса блоков 1 и 2) (приблизительно 16 км от АЭС «Фукусима-1»)</i>					
25.03.2011, 9:10	0,37	0,12	0,02	0,0042	0,022
24.03.2011, 8:45	0,5	Ниже предела обнаружения	0,035	0,005	0,038
23.03.2011, 23:45	0,7	0,12	0,031	0,006	0,03
22.03.2011, 15:06	0,67	Ниже предела обнаружения	0,039	Ниже предела обнаружения	0,044
21.03.2011, 23:45	0,66	0,12	0,031	0,006	0,033

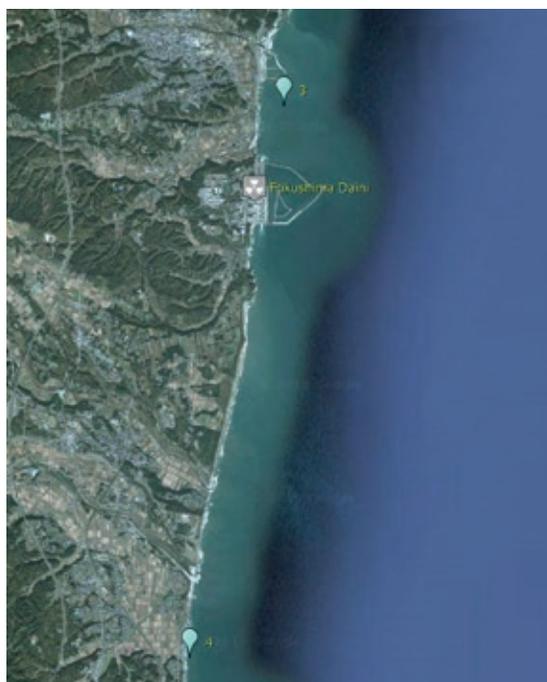


Рис. 29. Точки контроля морской воды рядом с АЭС «Фукусима-1»

22 марта Министерство образования, культуры, спорта, науки и технологий Японии обнародовало план действий по мониторингу прибрежных вод вблизи площадки АЭС «Фукусима-1». С 23 марта начали проводить забор проб воздуха и морской воды в прибрежной зоне вдоль трансект с интервалом в 10 км — забор проб был сделан вдоль каждой из трансект на удалении 30 км от берега (рис. 30). Глубина океана изменялась от примерно 90 м для северной точки до 130 м для южной. Результаты анализов, опубликованные 24 и 25 марта, представлены в табл. 13 и на рис. 31.

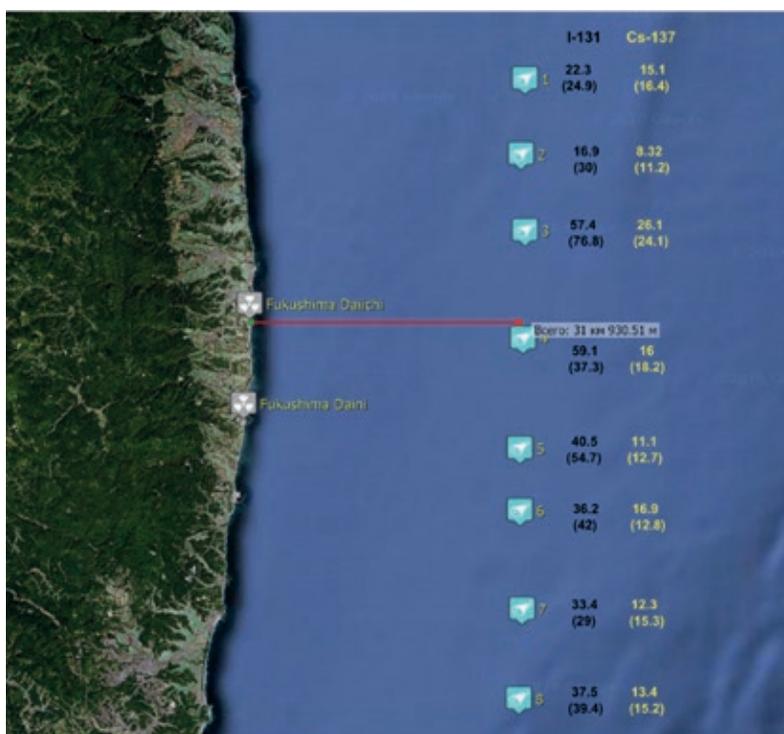


Рис. 30. Максимальные концентрации радионуклидов в морской воде 24 марта (в скобках — данные на 23 марта)

Следует заметить, что в Японии для нормальных условий эксплуатации с целью контроля за состоянием объектов окружающей среды установлены максимально допустимые уровни концентрации в морской воде различных радионуклидов, образующихся на АЭС.

Они составляют:

- для ^{131}I — 40 Бк/л;
- для ^{137}Cs — 90 Бк/л.

Таблица 13. Результаты измерения радионуклидов в морской воде

Точка за- бора проб	Дата и время (МСК) забора проб	Концентрация в морской воде, Бк/л		Мощность дозы над водой, мкЗв/ч
		¹³¹ I	¹³⁷ Cs	
1	23 марта, 02:10	24,9	16,4	0,034
	24 марта, 11:07	22,3	15,1	0,08
2	23 марта, 03:00	30	11,2	0,038
	24 марта, 12:09	16,9	8,32	0,08
3	23 марта, 03:30	76,8	24,1	0,049
	24 марта, 13:00	57,4	26,1	0,06
4	23 марта, 04:15	37,3	18,2	0,054
	24 марта, 14:00	59,1	16	0,046
5	23 марта, 05:20	54,7	12,7	0,035
	24 марта, 14:48	40,5	11,1	0,055
6	23 марта, 06:00	42	12,8	0,03
	24 марта, 15:35	36,2	16,9	0,08
7	23 марта, 06:37	29	15,3	0,04
	24 марта, 16:24	33,4	12,3	0,06
8	23 марта, 07:32	39,4	15,2	0,04
	24 марта, 17:18	37,5	13,4	0,059

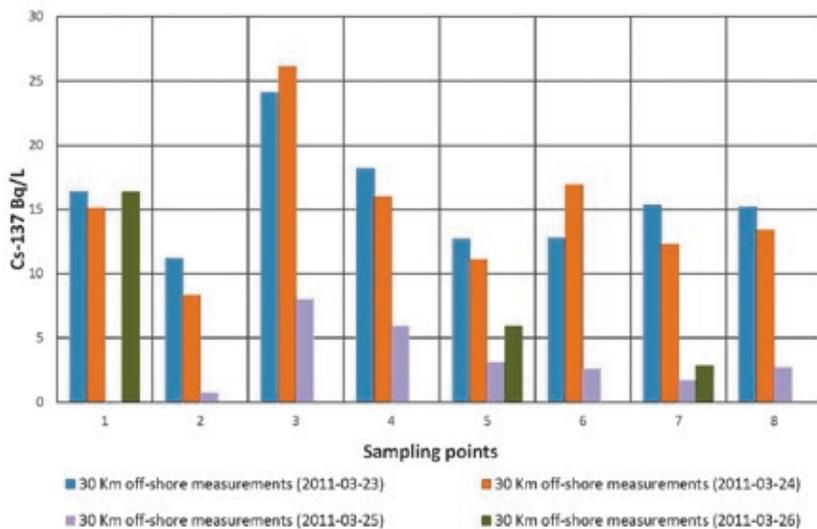


Рис. 31. Динамика концентрации ¹³⁷Cs в морской воде на удалении 30 км от береговой линии

Поэтому сообщения в прессе, что уровни загрязнения морской воды превышены в 1850 раз по йоду можно и нужно интерпретировать как тот факт, что концентрация ^{131}I в точках сброса вод с площадки АЭС «Фукусима-1» составляла 74 кБк/л.

Как видно из табл. 13, на расстоянии 30 км от берега происходит разбавление не менее чем в 1000 раз. Следует при этом учитывать, что заметная часть загрязнения водной поверхности на удалении 30 км от АЭС происходит за счет радиоактивных выпадений из факела выброса.

Цезий в рыбе накапливается постепенно вначале в бентоядных рыбах, а затем и в хищных. При сохранении таких уровней концентрации ^{137}Cs в морской воде в течение трех-четырех недель концентрация этого нуклида в бентоядных рыбах может достигнуть 400 Бк/кг. В случае сохранения указанной концентрации в воде в течение нескольких недель в хищных рыбах концентрация ^{137}Cs может вырасти через 8—10 мес до 1000—2000 Бк/кг, т. е. будет превышать установленный в Японии норматив (500 Бк/кг). Однако трудно предположить, что концентрация в воде будет сохраняться на этом уровне достаточно долго. Более вероятен сценарий «импульсного» загрязнения. Такой случай имел место при загрязнении Ботнического залива черновыльскими выбросами в 1986 г. Исследования шведских специалистов показали, что при пиковом загрязнении воды в 3 Бк/л во всей акватории через 3—4 мес концентрация в мелкой рыбе достигала 500 Бк/кг, а в более крупных окунях — до 3000 Бк/кг. При переносе этих результатов на акваторию Тихого океана важно учитывать, что соленость воды последнего (34,5‰) примерно на порядок выше (соленость на входе Ботнического залива составляет 6—8‰, а на севере опускается до 2—3‰). Это означает, что коэффициент накопления ^{137}Cs в рыбе в Тихом океане примерно на порядок ниже. При таком сценарии концентрация ^{137}Cs в рыбе не превысит установленных в Японии санитарных норм.

После черновыльской аварии в ряде стран (например, в Финляндии) были введены ограничения не на концентрацию ^{137}Cs в озерной рыбе, а на количество потребления рыбы из данного водоема в год. То есть упор был сделан на ограниченную часть населения, которая регулярно употребляла в пищу выловленную в конкретном водоеме рыбу. В случае повышенной концентрации радионуклидов в морской рыбе можно было бы ввести ограничение на потребление рыбы на некоторый срок, например, вместо норматива 1000 Бк/кг ввести ограничение в 20 кг на период с 1 мая по 1 декабря. Тогда, даже если в этих 20 кг попадет несколько килограммов

рыбы с концентрацией 2000 Бк/кг, предел годовой дозы в 1 мЗв все равно с большой вероятностью не будет превышен. Для Японии вопрос ограничений по содержанию радионуклидов в рыбе имеет большое значение. Эта страна по потреблению рыбы на душу населения занимает первое место в мире (около 60 кг/год). Немаловажным обстоятельством при выборе ограничений будет и то обстоятельство, что до настоящего времени большая часть радиоактивных выбросов осаждалась в Тихом океане. В этой самой большой водной акватории процессы разбавления идут достаточно интенсивно, и трудно полагать, что даже на непродолжительное время установится равновесное состояние по концентрации какого-либо нуклида. Следовательно, при выработке ограничительных мероприятий это обстоятельство тоже должно быть учтено.

Оценки доз внешнего излучения

Дозу внешнего облучения на северо-западном и южном следах можно разделить на дозу от прохождения радиоактивных облаков над данной местностью и на дозу от выпавших радионуклидов.

Для северо-западного следа оценить дозу от облака за отсутствием данных прямых измерений пока можно только косвенно, исходя из общих соображений об относительном вкладе двух ее составляющих. Будем полагать, что доза от облака составляет 3—5% суммарной дозы внешнего облучения за 10 сут. Приведенные ниже данные по префектуре Ибараки достаточно убедительно подтверждают такой вывод.

Оценки дозы внешнего облучения от радиоактивных выпадений проведем для нескольких характерных точек на оси радиоактивного следа, а именно в точках № 1 (город Фукусима), 32 и 62. Во всех этих точках расположены населенные пункты: в точке № 1 — центр префектуры город Фукусима, в других — небольшие сельские поселения. Расчет проводился по фактическим данным с 16 по 27 марта. Оценка доз внешнего облучения от выпадений составляла для точки № 1 — 1 мГр/ч, для точки № 62 — 3 мГр/ч, для точки № 32 — 24 мГр/ч. Если консервативно предположить, что максимальное загрязнение во всех точках этого следа сформировалось 13 марта и тогда же была максимальная мощность дозы на местности, то наши предыдущие оценки возрастут примерно в два раза и составят:

- для точки № 1 — 2 мГр/ч;
- для точки № 62 — 6 мГр/ч;

- для точки № 32 — примерно 50 мГр/ч.

Как уже отмечалось, доза от радиоактивного облака не должна была существенным образом повлиять на суммарную дозу внешнего облучения за две недели. Следовательно, в пределах точности измерений и расчетов приведенные выше цифры будут являться верхней оценкой доз внешнего облучения (без учета защитных свойств зданий, которые уменьшат приведенные оценки). В этой связи можно полагать, что для населенного пункта, расположенного в точке № 32, может и должен рассматриваться вопрос о защитных мероприятиях вплоть до временного отселения жителей.

Во всех остальных населенных пунктах, расположенных за 30-километровой зоной, единственной мерой защиты должен быть мониторинг, особенно за производимой в открытом грунте продукцией и местным молоком. Оценки доз внешнего излучения в 39 точках радиационного мониторинга префектуры Ибаракы за счет радиоактивных выбросов при аварии на АЭС «Фукусима-1» проводились на основе данных по результатам измерений мощности дозы гамма-излучения, представляемых на сайте <http://www.bousai.ne.jp/eng/>. В обработку включены данные за период с 15:00 28 февраля 2011 г. (UTC) по 08:40 27 марта 2011 (UTC). Общее число результатов измерений для каждой точки составляет 3851 (6 точек в час), хотя имеются и пропуски. Данные идентификации точек радиационного мониторинга приведены в табл. 14.

Таблица 14. Идентификационные данные по точкам радиационного мониторинга в префектуре Ибаракы

Индекс точки мониторинга	Краткое название	Полное название	Координаты, град	
			с. ш.	в. д.
108000001	Ishigami	Ishigami Tokai	36,4873	140,5717
108000002	Toyooka	Toyooka Tokai Village	36,4790	140,6022
108000003	Funaishikawa	Funaishikawa Tokai	36,4676	140,5544
108000004	Yokobori	City Yokobori Naka	36,4654	140,5200
108000005	Oshinobe	Oshinobe Tokai Village	36,4501	140,5694
108000006	Muramatsu	Muramatsu Tokai-mura	36,4496	140,5961
108000007	Mawatari	Mawatari Hitachinaka City	36,4115	140,5714
108000008	Onuki	Town Ooarai Onuki	36,3085	140,5525
108000009	Hiroura	Hiroura town Ibaraki	36,2932	140,5108
108000010	Tsukuriya	Tsukuriya Hokota City	36,2385	140,5108
108000011	Araji	Araji Hokota City	36,2304	140,5470
108000012	Hitachinaka	Hitachinaka Hitachinaka City	36,3968	140,5925

*Авария на АЭС «Фукусима-1»: оперативный прогноз
и оценка радиационных и радиологических последствий*

Таблица 14. Окончание

Индекс точки мониторинга	Краткое название	Полное название	Координаты, град	
			с. ш.	в. д.
108000013	Ajigaura	Ajigaura Hitachinaka City	36,3873	140,6075
108000014	Ishikawa	Ishikawa, Mito	36,3921	140,4258
108000015	Horiguchi	Horiguchi, Hitachinaka City	36,3865	140,5150
108000016	Kuji	Kuji Hitachi City	36,5029	140,6111
108000017	Isobe	Isobe Hitatoota City	36,5162	140,5383
108000018	Kadobe	Kadobe Naka City	36,4887	140,4842
108000019	Sugaya	Sugaya Naka City	36,4446	140,5000
108000020	Oba	Oba Mito City	36,3298	140,5195
108000021	Ebisawa	Ebisawa town Ibaraki	36,2590	140,4595
108000022	Sawa	Sawa Hitachinaka City	36,4393	140,5300
108000023	Yanagisawa	Sawa Yanagi Hitachinaka City	36,3576	140,5697
108000024	Motokomezaki	Motokomezaki Naka City	36,4823	140,5472
108000025	Nukada	City Nukata Naka	36,4912	140,5197
108000026	Kounosu	City Kounosu Naka	36,4687	140,4633
108000027	Godai	Godai Naka City	36,4248	140,4745
108000028	Onuma	Onuma Hitachi City	36,5337	140,6292
108000029	Mayumi	Mayumi Hitatoota City	36,5240	140,5697
108000030	Uridura	City Uridura Naka	36,4998	140,4436
108000031	Nemoto	Nemoto Hitachioomiya City	36,5270	140,4353
108000032	Kume	Kume Hitatoota City	36,5373	140,4772
108000033	Isohama	Isohama Oarai Town	36,3176	140,5783
108000034	Tasaki	Tasaki Hokota City	36,2551	140,5208
108000035	Momiyama	Momiyama Hokota City	36,2004	140,5508
108000036	Yatabe	Yatabe Ibaraki town	36,2915	140,4464
108000037	Yoshizawa	Sawa Yoshi Mito City	36,3332	140,4622
108000038	Kamitoda	Kamitoda Hokota City	36,2085	140,4722
108000039	Tokushuku	Tokushuku Hokota City	36,1868	140,5061
108000035	Momiyama	Momiyama Hokota City	36,2004	140,5508
108000036	Yatabe	Yatabe Ibaraki town	36,2915	140,4464
108000037	Yoshizawa	Sawa Yoshi Mito City	36,3332	140,4622
108000038	Kamitoda	Kamitoda Hokota City	36,2085	140,4722
108000039	Tokushuku	Tokushuku Hokota City	36,1868	140,5061

Для последующих оценок доз внешнего излучения от облака выброса и радиоактивных выпадений сначала для каждой точки мониторинга определялся уровень природного радиационного фона. Как правило, для этих целей использовались данные измерений мощности дозы с 00:00 по 23:50 10 марта 2011 г. (всего 144 измерения). Для двух точек контроля (24 и 34) этот расчет проводился по данным за 1 марта, поскольку 10 марта эти датчики не работали. Пример типичной картины изменения мощности дозы гамма-излучения во времени на территории префектуры Ибараки для точки мониторинга 08_15 (Horiguchi, Hitachinaka City, строка 15 в табл. 14, выделена полужирным шрифтом) представлен на рис. 31.

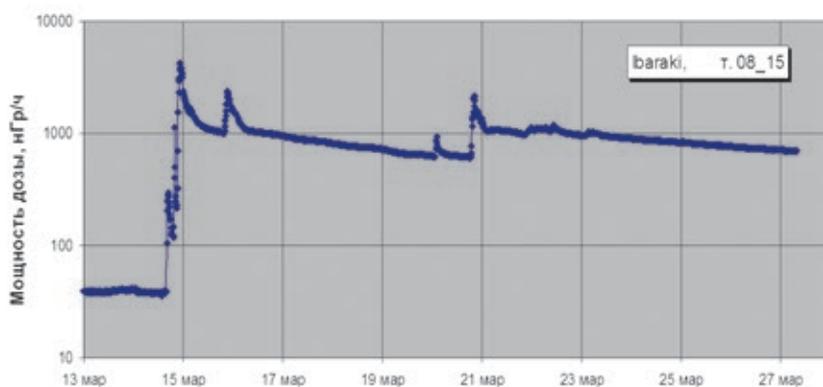


Рис. 31. Динамика изменения мощности дозы в точке 08_15 префектуры Ибараки в период с 13 по 27 марта 2011 г.

Из этого рисунка видно, что в середине дня 14 марта (UTC) произошло резкое возрастание мощности дозы гамма-излучения, связанное с приходом в район размещения датчика загрязненных радиоактивными веществами воздушных масс. Можно отметить 5 таких пиков на этом графике, после каждого из которых наблюдается достаточно ровный спад мощности дозы, обусловленный радиоактивным распадом выпавших на поверхность земли радионуклидов (компьютерная обработка спектра дает 7 пиков).

Компьютерная обработка таких графиков для всех 39 точек радиационного мониторинга позволила определить величину дозы от облака (как площадь в пределах фотопика за вычетом подложки), а также суммарную дозу внешнего излучения после вычета природного фона. Результаты этих расчетов представлены в табл. 15.

**Таблица 15. Оценка мощности дозы от облака и радиоактивных выпадений
для контрольных точек префектуры Ибараки, мкГр**

Индекс точки мониторинга	Мощность дозы природного фона, нГр/ч	Число об-работанных пиков	Доза внешнего излучения, мкГр		
			от облака	от выпадений	суммарная (без фона)
1080000001	45	6	3,76	160,4	164,2
1080000002	49	6	5,86	116,4	122,3
1080000003	46	8	5,28	55,8	61,0
1080000004	44	7	1,92	78,3	80,2
1080000005	44	7	6,84	93,1	99,9
1080000006	49	8	7,39	86,0	93,3
1080000007	48	7	6,65	112,6	119,3
1080000008	39	7	5,94	111,3	117,2
1080000009	39	6	5,55	144,0	149,6
1080000010	43	6	4,80	126,2	131,0
1080000011	46	6	5,31	100,7	106,0
1080000012	42	5	7,88	153,6	161,5
1080000013	46	6	6,88	97,5	104,4
1080000014	47	7	1,88	69,1	71,0
1080000015	39	7	6,03	261,7	267,7
1080000016	41	6	8,01	187,7	195,8
1080000017	45	5	4,39	103,4	107,7
1080000018	37	4	4,69	146,9	151,6
1080000019	44	7	1,72	64,5	66,2
1080000020	47	6	5,62	57,3	62,9
1080000021	45	6	5,09	82,2	87,2
1080000022	36	5	4,49	164,6	169,1
1080000023	30	6	6,03	102,2	108,2
1080000024	32	—	—	—	—
1080000025	41	5	0,79	66,3	67,0
1080000026	30	5	3,46	100,2	103,7
1080000027	23	6	2,07	109,7	111,8
1080000028	38	6	6,54	155,8	162,3
1080000029	38	4	2,69	73,0	75,7
1080000030	41	5	0,35	50,6	51,0
1080000031	38	3	1,47	69,6	71,1
1080000032	40	2	0,00	40,1	40,1
1080000033	39	5	2,70	84,3	87,0
1080000034	33	—	—	—	—
1080000035	39	7	4,92	191,6	196,6
1080000036	40	6	4,26	62,4	66,6
1080000037	40	8	4,48	55,8	60,3
1080000038	41	6	3,41	63,5	66,9
1080000039	36	6	4,91	70,1	75,0

Пропуски данных для точек 24 и 34 связаны с тем, что датчики системы контроля в этих точках мониторинга не работали с период с 9 по 25 марта 2011 г. Из материалов таблицы следует, что до аварии уровни природного радиационного фона в данном районе Японии были очень низки (23—49 нГр/ч). Радиоактивное загрязнение местности после 14 марта происходило многократно (число обработанных пиков в некоторых точках достигало 8). Дозы внешнего облучения от радиоактивного облака не превышали 8 мкГр, а дозы от радиоактивных выпадений за период с 14 по 27 марта находятся в диапазоне 40—260 мкГр. Пока еще мощность дозы гамма-излучения от выпавших на местность радиоактивных веществ определяется изотопами йода, в первую очередь ^{131}I . Это объясняет достаточно быстрый спад мощности дозы во времени, наблюдаемый до настоящего момента. Поэтому дать надежный прогноз возможных доз внешнего излучения за год, т. е. до середины марта 2012 г., пока невозможно.

Заключение

В результате серии аварийных выбросов радионуклидов в окружающую среду на японской АЭС «Фукусима-1» произошло загрязнение части территории Японии и части акватории Тихого океана. За пределами АЭС сформировалось два радиоактивных следа: северо-западный и южный.

Максимальная плотность радиоактивного загрязнения на оси северо-западного следа протяженностью около 15 км и шириной до 0,5 км за пределами 20-километровой зоны могла составлять:

- по ^{131}I — 24 МБк/м²;
- по ^{137}Cs — 2 МБк/м².

На северном следе дозы внешнего облучения по консервативным предварительным оценкам (без учета защитных свойств зданий и возможных мероприятий по снижению облучения) на оси радиоактивного следа составили за 14 дней с момента загрязнения:

- на удалении 30 км — 50 мГр;
- на удалении 40 км — 6 мГр;
- на удалении 60 км — 2 мГр.

На этом же северном следе максимальные дозы внутреннего облучения от бесконтрольного потребления загрязненной растительной и молочной продукции могли составить:

- индивидуальная поглощенная доза на щитовидную железу ребенка — 30 мГр;
- индивидуальная поглощенная доза на щитовидную железу взрослого человека — 7 мГр.

Максимальная плотность радиоактивного загрязнения на южном следе за пределами 20-километровой зоны могла составлять:

- по ^{131}I — 1,5 МБк/м²;
- по ^{137}Cs — 0,3 МБк/м².

На южном следе дозы внешнего облучения по консервативным предварительным оценкам (без учета защитных мероприятий) на оси радиоактивного следа составили за 14 дней с момента загрязнения:

- на удалении 20 км — 4 мГр;
- на удалении 40 км — 1 мГр;
- на удалении 60 км — 0,5 мГр;
- на удалении 100—130 км — 0,2 мГр.

На южном следе максимальные дозы внутреннего облучения от бесконтрольного потребления загрязненной растительной и молочной продукции представляют собой величины того же порядка, что и на северном. Однако реализация этих доз весьма сомнительна, если учесть строгий контроль и дисциплину японского населения. Консервативно можно предположить реализованные дозы на уровне 0,1 максимально возможной.

Согласно рекомендациям МКРЗ (Публикация № 103) при аварийном реагировании при оцененных дозах в острый период аварии в пределах от 20 до 100 мЗв необходимо проводить оптимизационные мероприятия по снижению доз облучения населения. При ожидаемых дозах более 100 мЗв защитные мероприятия обязательны. В какой мере эти рекомендации будут имплементированы японским правительством при ликвидации последствий аварии, сейчас крайне трудно прогнозировать, но в целом можно отметить, что на большей части территории Японии при уже существующем уровне загрязнения необходимость защитных мер отсутствует.

Хотя уровни загрязнения воды в Тихом океане в периоды максимальных выпадений и превышали контрольные значения, в настоящее время угрозы морской фауне они не создают, а прогнозируемые максимальные уровни загрязнения морской продукции ниже действующих санитарно-гигиенических нормативов.

Загрязнение территории Российской Федерации не прогнозируется. Наши оценки для самого пессимистического сценария, выполненные 11 марта и направленные в адрес генерального директора Госкорпорации «Росатом» Сергея Кириенко по запросу 12 марта, на настоящий момент полностью подтверждаются (рис. 33).

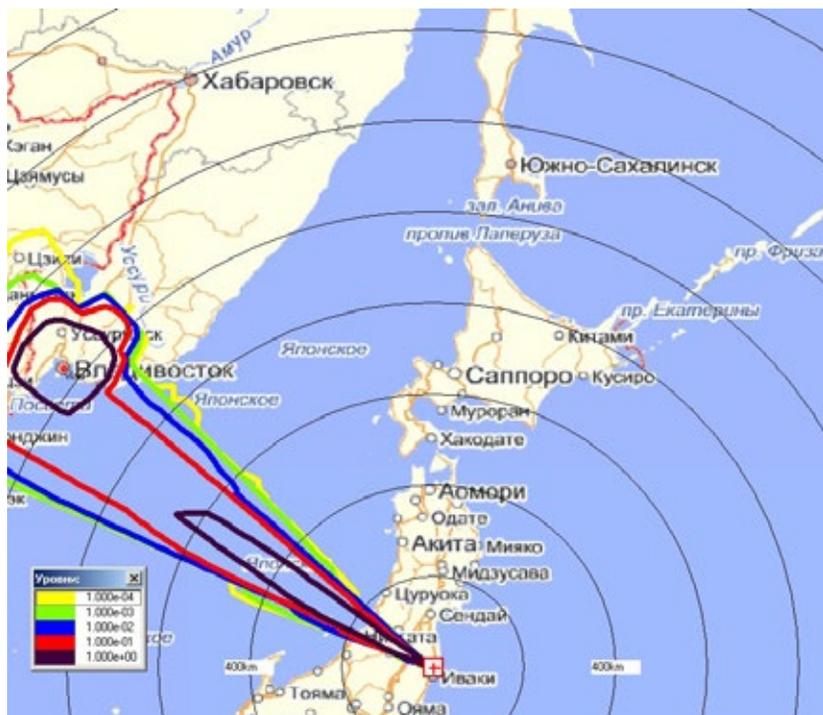


Рис. 33. Полная эффективная годовая доза (дети, 1—2 года)
для жителей Владивостока, мЗв

Для расчета выбраны наилучшие (маловероятные) метеоусловия: скорость ветра — 10 м/с, направление ветра — 115°, категория устойчивости атмосферы — Е, локальные осадки в районе Владивостока интенсивностью 10 мм/ч. Однако даже в этом случае максимальные дозы облучения детей в районе Владивостока не превысят 10 мЗв, т. е. осуществления мер по переселению жителей этого города и его окрестностей не потребуется.

Результаты экспресс-расчетов тяжелой аварии на АЭС «Фукусима-1» при помощи кода СОКРАТ

*К. С. Долганов, А. В. Капустин, А. Е. Киселев, Н. А. Мосунова,
В. Д. Озрин, Д. Ю. Томащук, В. Ф. Стрижов, С. В. Цаун, Т. А. Юдина*

При любой аварии на АЭС, тем более тяжелой, требуется оперативный анализ технических специалистов на всех этапах развития и ликвидации последствий. Расчетно-аналитические оценки необходимы как для поддержки технических кризисных центров данными по текущему состоянию энергоблока, так и для прогнозирования развития аварийной ситуации и в дальнейшем для анализа причин и последствий аварии с целью обобщения этого опыта в рамках повышения безопасности действующих и проектируемых АЭС.

С самого начала развития аварийных процессов на АЭС «Фукусима-1» Госкорпорация «Росатом» сформировала экспертную группу из специалистов ИБРАЭ РАН, НИЦ «Курчатовский институт», ОАО «СПбАЭП», ОАО «Атом-энергопроект», ОАО «ОКБ Гидропресс», ГНЦ РФ ФЭИ. Целью этой группы был сбор информации из открытых источников и моделирование основных событий с использованием имеющихся в ее распоряжении расчетных средств анализа тяжелых аварий. Следует отметить, что поступавшая информация была крайне противоречива, а технические детали японская сторона не передавала. Тем не менее экспертной группе удалось с использованием отечественного тяжелоаварийного кода СОКРАТ достаточно точно описать основные события, происходившие на энергоблоках № 1—4 АЭС «Фукусима-1». Некоторые результаты этой работы представлены ниже.

Полное обесточивание энергоблоков, произошедшее 11 марта 2011 г. на АЭС «Фукусима-1», — один из самых опасных аварийных сценариев по возможным последствиям для всех действующих АЭС с легководным теплоносителем. Авария была инициирована внешними событиями — землетрясением и последовавшим за ним цунами. Землетрясение привело к потере внешних источников энергоснабжения, а цунами — к отказу дизель-генераторов. Хотя вероятность такой последовательности отказов оценивается как крайне низкая, для реакторов BWR она вносит наибольший вклад в частоту повреждения активной зоны (а. з.) [1; 2]. Поэтому для таких аварий проектами предусматриваются технические средства и разрабатываются стратегии по

управлению, направленные на максимальное смягчение негативных последствий. Основная цель разрабатываемых средств и мер на начальном этапе развития аварии состоит в том, чтобы обеспечить охлаждение а. з., в которой длительное время сохраняется остаточное тепловыделение.

В условиях потери всех источников переменного тока основным техническим средством охлаждения а. з. являются пассивные системы безопасности. На АЭС «Фукусима-1» использовались активные системы безопасности, не зависящие от источников переменного тока: на энергоблоке № 1 (ПУ BWR/3) — так называемые аварийные конденсаторы изолированного реактора — Isolation Condenser (IC), на энергоблоках № 2 и 3 (ПУ BWR/4) — системы высоконапорной подпитки активной зоны RCIC и HPCI. Функционально системы предназначены для обеспечения теплоотвода от а. з. в так называемом режиме изолирования реактора, когда реактор отсечен от основного стока тепла — конденсаторов турбины. Что касается остальных систем аварийного расхолаживания реакторов BWR/3 и BWR/4 (LPCI, RHR, Core Spray), для их работы необходимо питание переменным током, и они при аварии на АЭС «Фукусима-1» после полного обесточивания не работали.

Важной особенностью систем IC, RCIC и HPCI является зависимость их работоспособности от параметров пара в реакторе. Теплоотвод от а. з. осуществляется до тех пор, пока не снизятся параметры первого контура. Кроме того, работоспособность системы IC ограничивается запасами воды во внешнем теплообменнике и накоплением неконденсирующихся газов (например, водорода) в трубном пучке теплообменника, снижающем его конденсационную мощность.

На всех трех энергоблоках АЭС «Фукусима-1» все системы теплоотвода от активной зоны, две из которых (IC и RCIC/HPCI) разнотипны, отказали в разное время. Сам по себе отказ этих систем заслуживает отдельного рассмотрения, но в канве аварийных событий он мог бы и не оказать решающего влияния на разрушение а. з., поскольку пассивные системы обеспечили значительный запас времени до восстановления электроснабжения, необходимого для запуска активных систем охлаждения а. з. Однако восстановить электроснабжение систем безопасности на энергоблоках к моменту отказа пассивных систем не удалось. Интуитивно понятно, что вероятность возникновения такого количества отказов и, напротив, ненаступления ожидаемых событий (восстановления энергоснабжения) крайне низка, но это произошло, и наиболее очевидной мерой по срочному восстановлению те-

плоотвода от а. з. была организация подачи воды в реакторы при помощи внешних насосов.

Стационарное температурное состояние а. з. (отсутствие разогрева) можно получить при условии, если вся мощность остаточного энерговыделения в а. з. отводится подаваемой водой. На рис. 1 показано изменение мощности остаточного тепловыделения на энергоблоке № 3 в первые 30 сут аварии, а также требуемый расход подпитки реактора водой для случая, когда поступающая вода подогревается до температуры кипения и испаряется. Таким образом, расход воды в реактор, который необходимо было бы обеспечивать японским специалистам в первые сутки аварии, должен был составлять 15—25 т/ч, а через несколько суток после аварии — около 10 т/ч. Однако такой расход обеспечить не удалось.

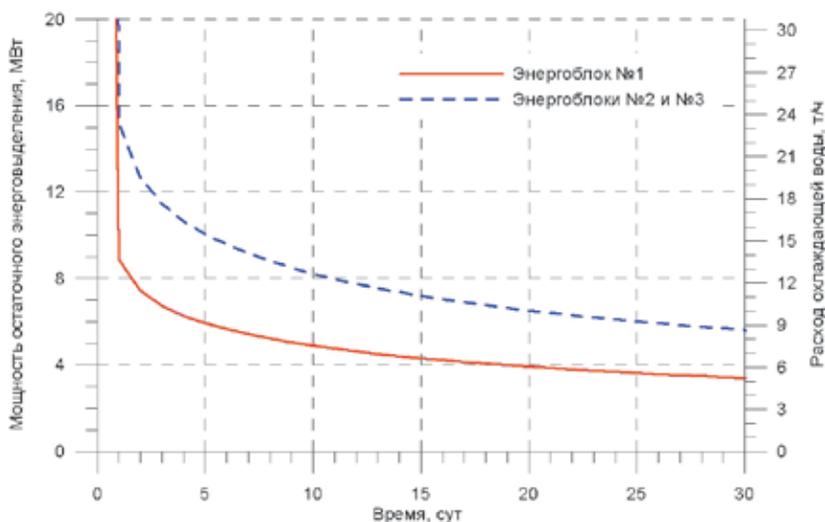


Рис. 1. Изменение мощности остаточного тепловыделения и потребного расхода подпитки в первые 30 сут аварии

Выполнение полноценного моделирования тяжелой аварии на АЭС «Фукусима-1» в соответствии с практикой анализа безопасности сразу после аварии было невозможно ввиду отсутствия достаточной информации как о конструктивных особенностях аварийных энергоблоков и состоянии оборудования после землетрясения, так и о предпринимавшихся персоналом действиях. Однако на основе официальных сообщений TEPCO, JAIF и NISA уже в первые сутки аварии были сделаны предварительные качествен-

ные оценки текущего состояния активной зоны, количества выделившегося водорода и даны прогнозы по дальнейшему развитию аварии. Ниже приведены результаты количественных оценок протекания аварий на каждом энергоблоке, выполненных с использованием отечественного расчетного кода СОКРАТ в первую неделю после начала аварии. В расчетах нулевой момент времени соответствует моменту отказа систем безопасности (потере конечного стока тепла). Начальные условия были приняты в соответствии с данными измерений уровня и давления в реакторах.

На энергоблоке № 1 потеря теплоносителя через предохранительный клапан (SRV), открытый для снижения давления в реакторе, привела к снижению уровня в реакторе (рис. 2). К 19-му часу аварии давление в реакторе снизилось до уровня 0,7 МПа. В соответствии с расчетным представлением о ходе аварии с 20-го часа начался разогрев твэлов, и к 23-му часу температура оболочек достигла 1200°C. Еще примерно через 30 мин началось плавление оболочек в верхней и средней части а. з. На рис. 3 пунктирная линия показывает степень разрушения а. з. К моменту начала стекания расплава оболочек твэлов выделилось около 500 кг водорода, который практически полностью вышел в контейнмент через предохранительные клапаны SRV.

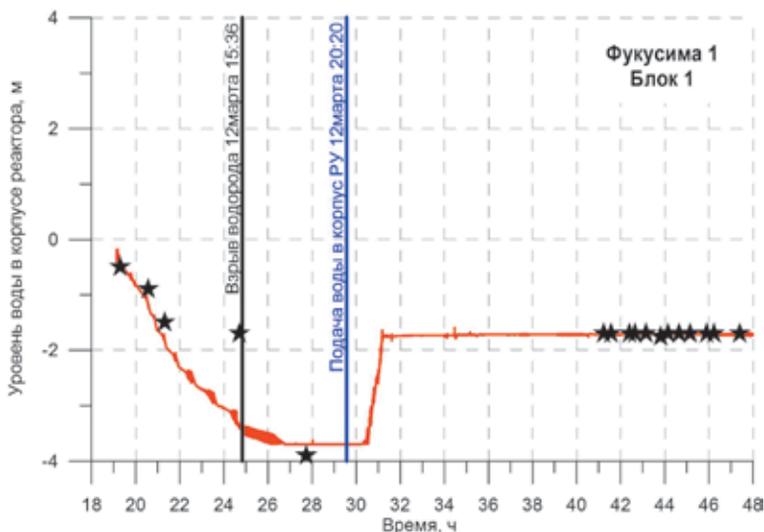


Рис. 2. Уровень теплоносителя в корпусе реактора относительно верха а. з. на энергоблоке № 1

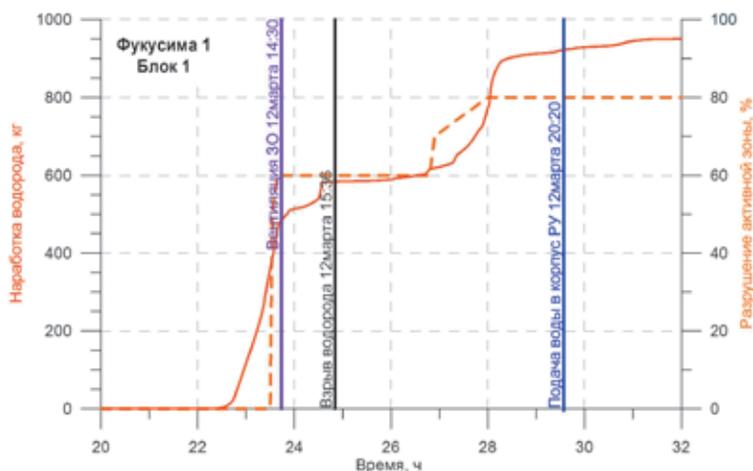


Рис. 3. Интегральная генерация водорода и степень разрушения а. з. на энергоблоке № 1

Поскольку давление в контейменте превышало проектный предел, на 24-м часе было выполнено его вентилирование путем открытия клапана для сброса среды из контеймента в обстройку (конфайнмент). В результате при открытии клапанов сдувки паро-азотно-водородная смесь начала поступать в верхнюю часть конфаймента. Приблизительно через 60 мин после начала вентилирования объемная доля водорода достигла 10% (объемных) и создались условия для его самопроизвольной детонации через 24 ч 40 мин с начала аварии (рис. 4). Расчетный пик давления показывает, что верхняя часть конфаймента должна быть повреждена. В соответствии с имеющимися данными взрыв произошел через 24 ч 50 мин.

Продолжавшееся плавление а. з. сопровождалось перемещением части расплава на уровень воды в районе опорной плиты а. з. К 28-му часу с начала аварии степень разрушения а. з. увеличилась с 60% до 80%.

После подачи морской воды в реактор (через 29 ч 35 мин с начала аварии) начал подниматься уровень воды в корпусе реактора, к 31-му часу он установился примерно на половине высоты а. з. При этом расплав а. з. затвердел не полностью, а образовал жидкое ядро, удерживаемое тугоплавкой коркой на границе с теплоносителем. Из-за достаточно высокой степени окисления расплавленного циркония значительного выделения водорода в ходе залива не произошло.

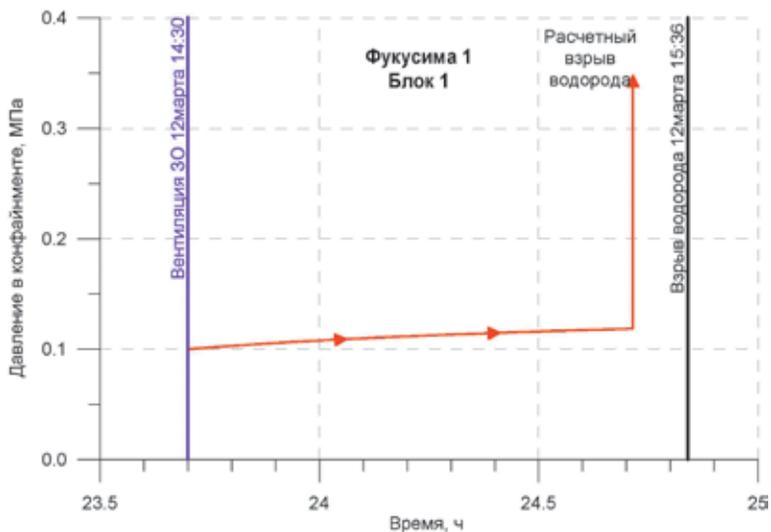


Рис. 4. Изменение давления в конфайменте на энергоблоке № 1

Также для энергоблока № 1 был выполнен расчет с более консервативными условиями, исключавшими теплоотвод от активной зоны сразу после потери дизель-генераторов. Полученные результаты представлены в табл. 1.

Таблица 1. Хронология событий при аварии «полное обесточивание» в предположении отсутствия теплообмена через систему Isolation Condenser на энергоблоке № 1 АЭС «Фукусима-1»

Время	Событие
0	Полное обесточивание энергоблока с отказом всех систем аварийного расхолаживания, включая пассивные
2 часа 20 мин	Начало бурной пароциркониевой реакции
2 часа 30 мин	Начало плавления оболочек твэлов
3 часа 30 мин	Срабатывание системы сброса давления по низкому уровню в активной зоне, переход на сценарий с низким давлением в первом контуре
5 часов	Начало плавления топлива
7 часов	Выход расплава на днище корпуса реактора, начало выпаривания воды в поддонном пространстве, частичное охлаждение расплава
12 часов	Полное осушение корпуса реактора, повторный разогрев расплава, взаимодействие с корпусом реактора
13 часов	Разрушение стенки корпуса реактора, выход расплава в бетонную шахту, начало взаимодействия с бетонным основанием шахты
7 дней	Сквозное проедание расплавом бетона, стальной стенки сухого бокса контейнента (drywell), бетонного основания конфайнмента (всего примерно 6 м), выход расплава за пределы конфайнмента

На энергоблоке № 3 в отличие от энергоблока № 1 охлаждение а. з. осуществлялось сначала при помощи системы RCIC, а затем — системы NPCI.

На 36-м часе произошло автоматическое отключение системы NPCI. В результате функция подпитки реактора была потеряна. На момент времени 42 часа с начала аварии уровень воды в реакторе находился примерно на 2 м выше верха а. з.

В интервале 42—43 часа было выполнено вентилирование контейнента и стравливание давления в реакторе за счет открытия предохранительных клапанов на паропроводах сброса пара под уровень воды в торе.

Это привело к постепенному снижению уровня воды в реакторе вплоть до верха обогреваемой части а. з. на 44-м часе аварии (рис. 5). Вскоре после снижения давления в реакторе (рис. 6) была начата подача борированной воды через систему пожаротушения (система пожаротушения была соединена с линией подпитки). В результате к 48-му часу уровень стабилизировался примерно на отметке половины а. з. Температура а. з. при этом возросла незначительно и не превышала 700°C (рис. 8). Дальнейший разогрев твэлов начался на 60-м часе, когда уровень в а. з. снова стал снижаться. Видимо, это было вызвано сообщавшимся ТЕРСО фактом прекращения подачи морской воды, которое продолжалось 2 ч. Возобновление подачи морской воды позволило восстановить уровень воды в а. з. через 3,5 ч после отключения подпитки (63 часа с начала аварии). За это время твэлы разогрелись до температуры свыше 2000°C, в основном за счет реакции окисления, и за 3 ч произошла генерация 1000 кг водорода (рис. 7 и 8).

Спустя 6 ч после восстановления уровня в а. з. произошла детонация водорода в реакторном зале конфайнмента. Попадание в него водорода из контейнента может быть связано с негерметичностью линии сдувки из контейнента.

Вызывает вопросы отсутствие на станционных данных ожидаемого пика давления в районе 63—64 часов, когда в разогретую а. з. была подана вода (уровень вырос минимум на 2 м, см. рис. 5 и 6).

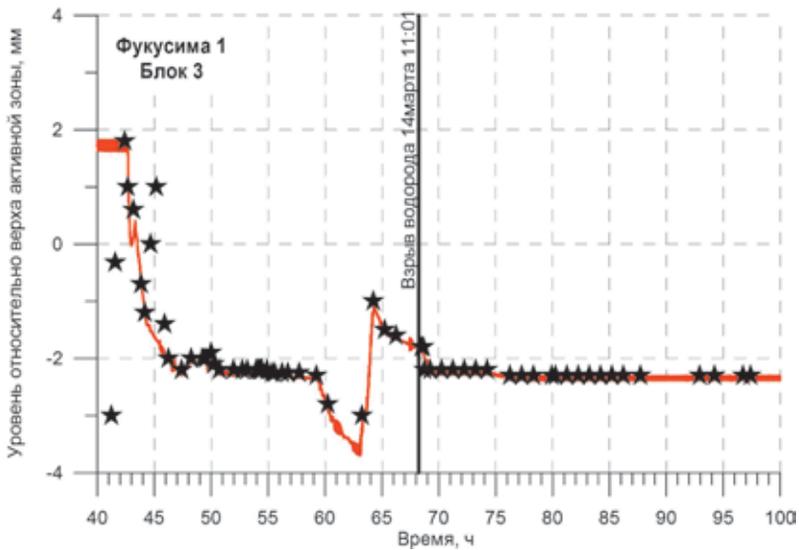


Рис. 5. Уровень теплоносителя в корпусе реактора относительно верха а. з. на энергоблоке № 3

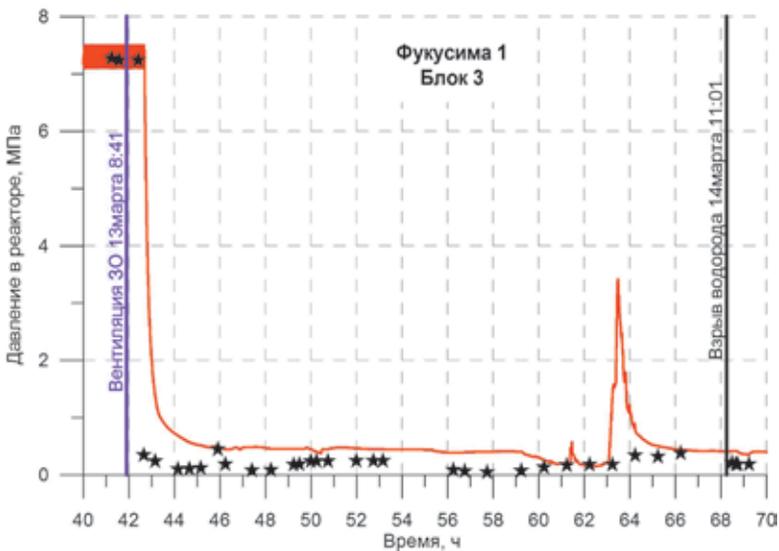


Рис. 6. Изменение давления в реакторе на энергоблоке № 3

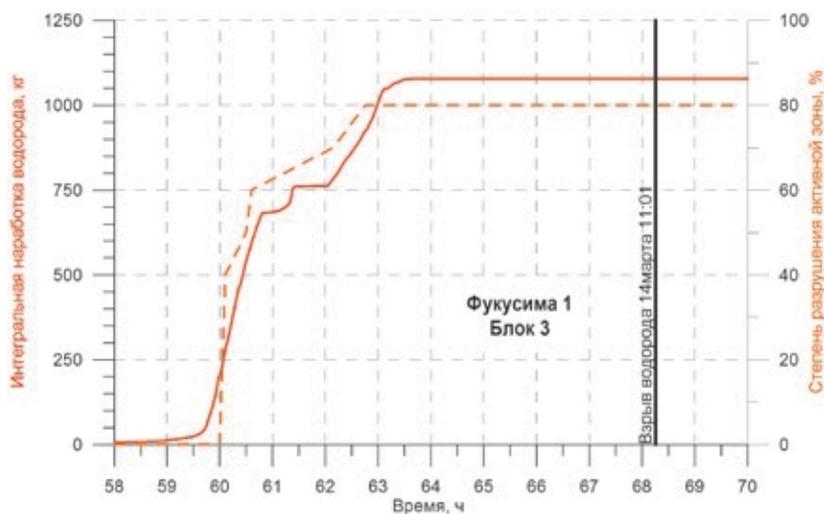


Рис. 7. Интегральная генерация водорода и степень разрушения а. з. на энергоблоке № 3

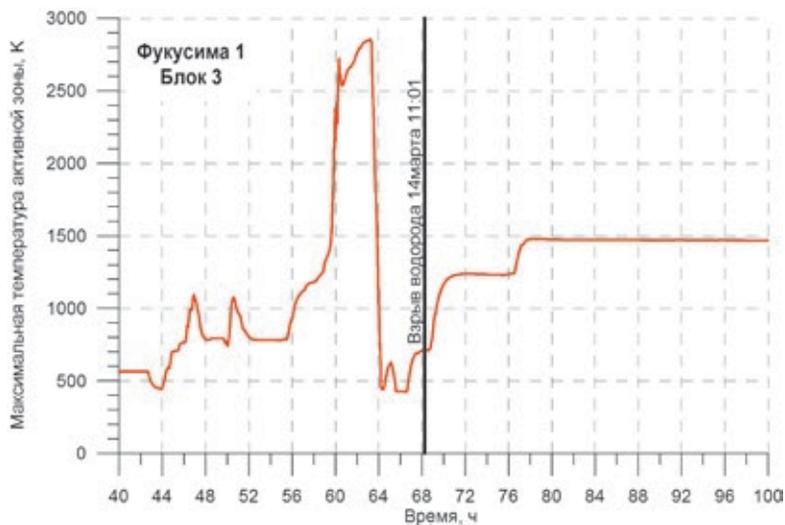


Рис. 8. Максимальная температура в а. з. на энергоблоке № 3

На энергоблоке № 2 после отказа системы RCIC на 69-м часе аварии снижение уровня и разогрев а. з. происходили при высоком давлении при периодическом срабатывании ПК (SRV). После открытия предохранительных клапанов давление первого контура начало снижаться (рис. 10). В расчетах вода в корпус реактора подавалась таким образом, чтобы обеспечить залив на 80-м часе с начала аварии и далее до 86-го часа удержание уровня на отметке $-3,7$ м от верха обогреваемой части а. з.

В протекании аварии отчетливо прослеживаются два пика давления первого контура (см. рис. 10). Первый пик (примерно через 78—79 ч с начала аварии) связан с началом плавления элементов а. з. и попаданием легкоплавких компонентов в область опорной решетки, где сохраняется уровень воды. Второй пик (на 80—82-м часе) скорее всего связан с поступлением воды в а. з. через систему пожаротушения. В это же время возникла необходимость вентилирования газового пространства тора из-за накопления водорода и повышения давления в торе. После вентилирования контейнента выделившийся к этому моменту в а. з. водород (около 1050 кг), по-видимому, не скапливался в помещениях конфайнмента, а поступал в окружающую среду из-за своевременно принятых мер по вентиляции конфайнмента (удаления части панелей обстройки реакторного здания).

Восстановление уровня в а. з. началось после 86-го часа с начала аварии и из-за интенсивного парообразования при заливе привело к частичному разрушению контейнента в области тора. Также не исключен и взрыв части водорода, выброшенного из контейнента вместе с паром в нижние помещения конфайнмента.

Степень разрушения а. з., которая в расчете определяется по достижению оболочками твэлов температуры плавления ZrO_2 ($2250^\circ C$), составила 90% (рис. 11). В интервале 86—87 часов была достигнута температура плавления топлива (рис. 12). Примерно 25% всего топлива находилось в жидкой фазе. В результате образовалось ядро расплава.

Как следует из рис. 9, в интервале 80—81 ч измеренный уровень в а. з. может быть вызван не подачей воды из внешнего источника, а сквозным проплавлением опорной решетки а. з. и выходом расплава в нижнюю часть корпуса реактора с одновременным застыванием и образованием значительного количества пара.

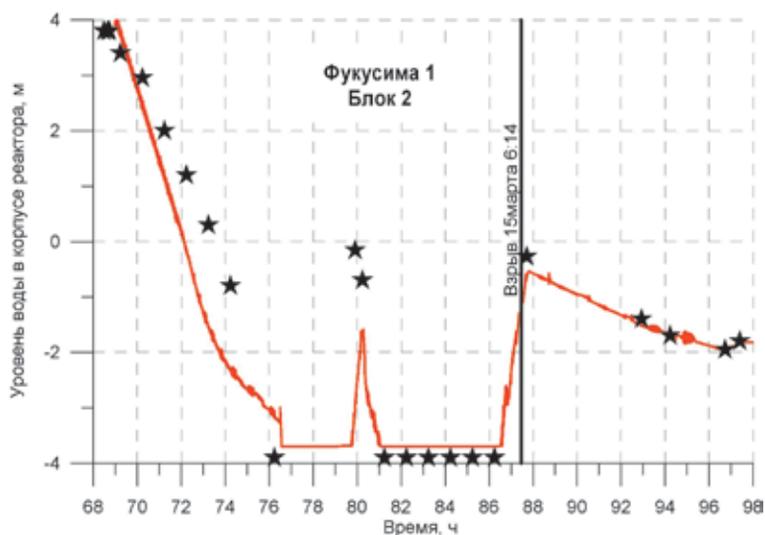


Рис. 9. Уровень теплоносителя в корпусе реактора относительно верха а. з. на энергоблоке № 2

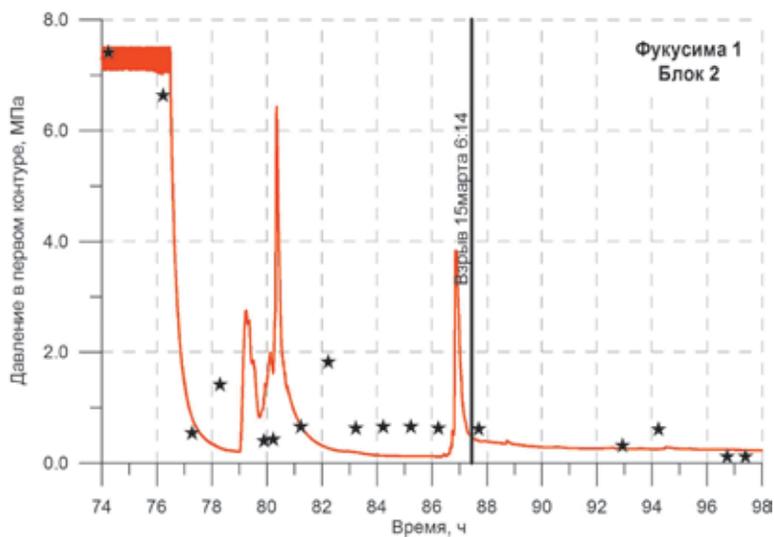


Рис. 10. Изменение давления в реакторе на энергоблоке № 2

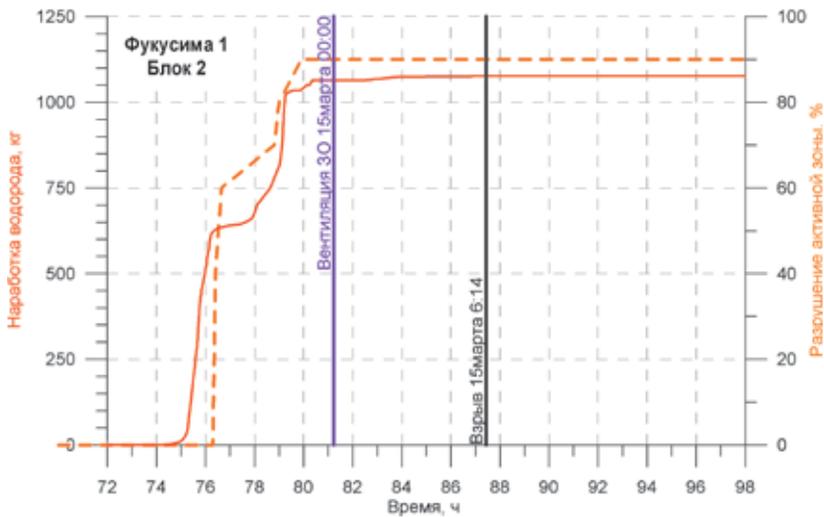


Рис. 11. Интегральная наработка водорода и степень разрушения активной зоны на энергоблоке № 2

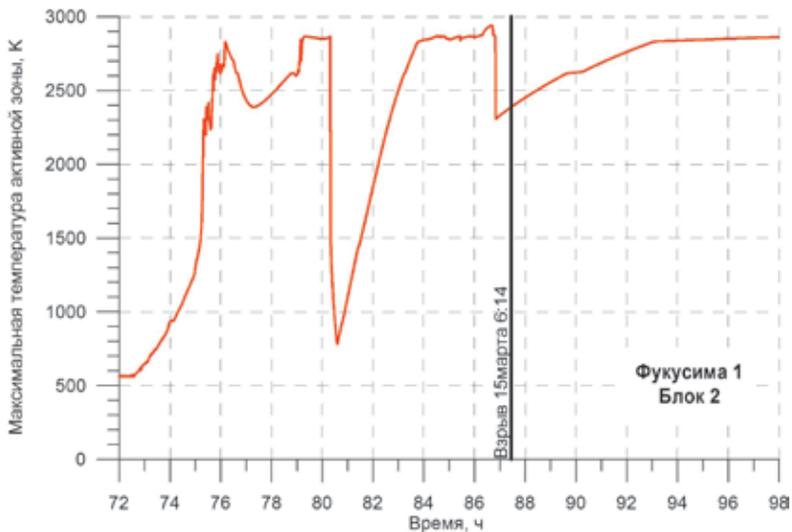


Рис. 12. Максимальная температура в активной зоне энергоблока № 2

Восстановить работу активных систем безопасности, с помощью которых можно было организовать охлаждение активной зоны в замкнутом цикле, не удавалось еще несколько недель, несмотря на предпринимаемые японскими специалистами меры. Поступавшая информация о ходе работ на аварийной АЭС показывала, как непросто давались оператору станции каждое решение и каждый шаг, направленные на ликвидацию аварии и смягчение ее последствий. Очевидно, что масштабы аварии (три аварийных энергоблока и шесть аварийных бассейнов выдержки) требовали повышенной концентрации специальной техники и человеческих ресурсов, комплексных усилий государства при технической и методической поддержке международных организаций в области использования атомной энергии.

Те огромные трудности, с которыми столкнулись ликвидаторы аварии, снова возвращают нас к анализу событий, сыгравших ключевую роль в развитии аварии. Маловероятное землетрясение высокой магнитуды, маловероятное цунами высокой амплитуды, последовавшие затем многочисленные отказы систем и оборудования, отсутствие возможности восстановления внешнего энергоснабжения в течение недели, все это вместе — невероятное, но реально случившееся стечение обстоятельств.

Литература

1. *Hodge S. A., Ott L. J.* BWRSAR Calculations of reactor vessel debris pours for Peach Bottom short-term station blackout // *Nuclear Engineering and Design*. — 1990. — 121. — P. 327—339.
2. *Hodge S. A., Petek M.* Assessment of two BWR accident management strategies // *Nuclear Engineering and Design*. — 1994. — 148. — P. 185—203.

Анализ работы систем безопасности во время аварии на энергоблоках № 2 и 3 АЭС «Фукусима-1» и пути совершенствования подходов к анализу тяжелых аварий

К. С. Долганов, А. Е. Киселев, Д. Ю. Томащук, Т. А. Юдина

С 1992 г. в Японии реализовывалась программа по внедрению процедур управления тяжелыми авариями и соответствующей модернизации энергоблоков с целью снижения риска от тяжелых запроектных аварий. К 2002 г. эти изменения были выполнены на 52 энергоблоках японских АЭС, включая «Фукусима-1».

Модернизация была направлена на обеспечение выполнения основных функций безопасности (подкритичности, охлаждения активной зоны (а. з.), удержания радиоактивных продуктов деления, работы обеспечивающих систем) и применительно к реакторной установке (РУ) ВВР включала следующие меры [1—3]:

- Организацию альтернативной подпитки активной зоны за счет соединения разных систем подачи воды. Так, система пожаротушения была соединена с системой подпитки реактора, что позволило использовать в качестве источника воды не только бак с запасом фильтрованной воды (FWST), но и бак с запасом осветленной воды (CWST). Подача воды из этих источников осуществляется автономными дизельными насосами в реактор и в сухой бокс контейнента через спринклерную систему. Кроме того, была добавлена линия подачи воды внутрь бетонной опоры шахты реактора для охлаждения расплава а. з. на внекорпусной стадии тяжелой аварии.
- Введение сигнала на автоматический сброс давления в реакторе (ADS) по уставке «низкий уровень в реакторе» с целью снижения давления до уровня, позволяющего подать воду от низконапорных насосов.
- Внедрение дополнительных независимых уставок срабатывания аварийной защиты (АЗ) и отключения рециркуляционных насосов с целью обеспечения подкритичности.
- Добавление прочноплотного вентиляционного трубопровода, соединяющего контеймент (тор) с вентиляционной трубой, с целью отвода энергии от контейнента.

- Разработку и внедрение аварийных процедур, направленных на восстановление функций системы отвода остаточного тепла (RHR), с целью обеспечения надежного охлаждения контеймента.
- Установка специальных аварийных дизель-генераторов на АЭС «Фукусима-1», подключение энергоблоков к шинам 6,9 кВ и 480 В смежных энергоблоков, разработка и внедрение аварийных процедур по восстановлению дизель-генераторов.

Реализация этих мер на энергоблоках № 1—3 АЭС «Фукусима-1» позволила снизить расчетную частоту повреждения активной зоны реактора в 1,5—2 раза, частоту повреждения контеймента — в 5—20 раз [1, 4].

Таким образом, к моменту аварии имелась обоснованная в проекте и технически реализованная на АЭС «Фукусима-1» возможность подпитки реактора и залива нижней части контеймента дизельными насосами через пожарную систему, а также значительные запасы подпиточной воды, системы резервирования энергоснабжения, системы вентилирования контеймента непосредственно в атмосферу через прочноплотный вентиляционный газопровод. Однако все эти системы оказались неработоспособными по общей причине или неэффективны в условиях, сложившихся в ходе развития аварии. В результате, как показали результаты расчетов по коду СОКРАТ [16], на энергоблоках № 1—3 имело место длительное осушение и плавление активных зон реакторов, сопровождавшееся детонацией водородосодержащих смесей в помещениях центрального зала на энергоблоках № 1 и 3.

Несмотря на крайне сложные условия, на энергоблоках № 2 и 3 длительно (70 и 37 ч соответственно) сохранялось надежное охлаждение активной зоны за счет работы систем безопасности, не относящихся к пассивным системам [14] и формально для тяжелых аварий не предназначенных. Авария на АЭС «Фукусима-1» показала необходимость реалистической оценки работоспособности оборудования в условиях тяжелых аварий, в том числе при разработке руководств по управлению тяжелыми авариями. Предметом настоящей работы является анализ возможных причин, которые привели к отказу систем теплоотвода от активной зоны RCS и HRSI, и определение путей совершенствования современных подходов к анализу тяжелых аварий с учетом фукусимского опыта. В качестве референтных использовались открытые данные для АЭС США с РУ BWR/4 и контейментом «Mark I», подобных энергоблокам № 2 и 3 АЭС «Фукусима-1» по годам ввода в эксплуатацию.

Средства предотвращения и смягчения последствий тяжелых запроектных аварий «полное обесточивание» на РУ BWR-3 и BWR-4

Стратегия предотвращения или смягчения последствий тяжелой запроектной аварии (ЗПА) с «полным обесточиванием» на РУ BWR-4 (энергоблоки № 2, 3 АЭС «Фукусима-1») основывается:

- на начальной стадии аварии (при высоком давлении в реакторе) — на работе систем подпитки реактора (RCIC, HPCI) и предохранительных клапанов (ПК, SRV);
- на второй стадии аварии (при низком давлении в реакторе, обеспечиваемом автоматически или действиями оператора) — на охлаждении активной зоны реактора водой от внешних источников при помощи низконапорных дизельных насосов.

Система теплоотвода от изолированного (относительно основного стока тепла — конденсатора турбины) реактора RCIC и система подачи воды высокого давления HPCI технологически и функционально подобны, однако в проекте предпочтение отдается системе RCIC, а HPCI используется в качестве резерва. Это связано с тем, что расход подпитки HPCI существенно превышает расход от RCIC, и регулирование уровня в реакторе проще выполнять при помощи менее мощной системы. Система RCIC работоспособна в широком диапазоне давлений в реакторе — от 1,239 до 8,064 МПа.

Отвод тепла от реактора осуществляется за счет циклической согласованной работы систем RCIC/HPCI и предохранительных клапанов SRV. Рост давления в реакторе ограничивается открытием предохранительных клапанов, а при понижении уровня в реакторе до соответствующей уставки происходит закрытие клапанов, и в работу включается система RCIC (или HPCI). После восстановления уровня в реакторе до определенной отметки система подпитки отключается, рост давления в реакторе снова приводит к открытию предохранительных клапанов, и цикл повторяется.

Так, после отказа дизель-генераторов ограничение роста давления в первом контуре и отвод тепла от а. з. на энергоблоках № 2 и 3 АЭС «Фукусима-1» осуществлялись за счет согласованной работы системы RCIC и предохранительных клапанов SRV. Система RCIC включилась в работу автоматически по уставке снижения уровня воды в корпусе реактора после потери дизель-генераторов, отсечения реактора от турбины и открытия предохранительных клапанов. После останова RCIC на энергоблоке 3 некоторое время функция

отвода тепла обеспечивалась работой системы подпитки высокого давления НРСІ.

Временные характеристики работы системы RCIC в ходе аварии «полное обесточивание энергоблока» могут быть оценены из геометрических параметров РУ и проектных характеристик систем безопасности. Объем корпуса реактора BWR/4 между высотными отметками включения и отключения RCIC составляет около 50 м^3 (с учетом объема внутрикорпусных устройств, в отсутствие точных данных по РУ, принятого равным 20%). Проектный расход пара из реактора на турбину RCIC составляет около $3,5 \text{ кг/с}$ ($17 \text{ м}^3/\text{ч}$), а проектный расход подпитки RCIC — $136,5 \text{ м}^3/\text{ч}$ [7; 15]. Для заполнения этого объема водой требуется примерно $50/(136,5 - 17) \approx 1600 \text{ с}$.

Поскольку залив реактора производится в области между сепараторами (циклонами) и фактически в опускной участок, объем пара можно не учитывать. На стадии осушения до уставки срабатывания RCIC пар сбрасывается через предохранительные клапаны в тор с эффективным расходом около 10 кг/с , или $48,6 \text{ м}^3/\text{ч}$. То есть уставка включения RCIC достигается через 1 ч. Таким образом, среднее время работы RCIC составляет примерно 30 мин, а время ожидания — 1 ч. При этом по мере снижения мощности остаточного тепловыделения время ожидания возрастает, а время работы снижается.

В условиях полного обесточивания время работы RCIC/НРСІ в таком режиме ограничено. Циклический режим требует многократного открытия предохранительных клапанов, клапанов на линии RCIC/НРСІ, что в конечном счете сокращает время разрядки аккумуляторных батарей, требует поддержания давления в газовой системе клапанов и предъявляет жесткие требования к надежности систем, особенно в условиях тяжелых аварий (высокая температура, влажность, наличие неконденсирующихся газов в паре).

Основным источником воды для систем RCIC/НРСІ является бак запаса конденсата (CST).

После осушения баков CST происходит автоматическое переключение на забор воды из тора, и далее системы RCIC/НРСІ работают в замкнутом цикле «реактор — тор». Поскольку тор находится на более низкой высотной отметке, чем бак CST, температура воды в нем не должна превышать определенного проектом предела из условия сохранения напора на всасывающей линии насосов RCIC/НРСІ, достаточного для исключения кавитации при работе системы в замкнутом режиме.

Необходимо отметить, что элементы системы RCIC/НРСІ (клапаны, регуляторы частоты вращения турбины, насосы отвода конденсата, сдувки не-

конденсирующихся газов и пр.) используют источники постоянного тока, поэтому время их работы в проектом режиме при авариях с полным обесточиванием энергоблока ограничено временем разряджения аккумуляторных батарей. Однако, как показал опыт «Фукусимы-1», после исчерпания запаса аккумуляторов они продолжали работу, хотя, видимо, в ином режиме. Согласно официальной хронологии событий время работы системы RCIC на энергоблоке № 2 составило 70 ч, а на энергоблоке № 3 вместе с HPCI — 37 ч.

Анализ условий, в которых системы RCIC/HPCI могли сохранять работоспособность в течение столь долгого времени, представляет интерес с точки зрения подхода к анализу тяжелых аварий, учитывающего данные о квалификации оборудования АЭС, которое обеспечивает основные функции безопасности при авариях.

Работа систем подпитки реактора неразрывно связана с работой предохранительных клапанов (ПК), обеспечивающих функцию контроля за давлением в реакторах BWR/4. По выполняемым функциям ПК делятся на две группы: клапаны контроля давления (relief) и декомпрессии или аварийные (safety). Кроме того, все ПК разделяются на четыре группы по уставкам открытия/закрытия. Типовая РУ BWR/4 имеет 11 ПК, из которых 7 входят в систему автоматического сброса давления (ADS) и, соответственно, выполняют функцию аварийной декомпрессии. В случае полного обесточивания эти клапаны открываются либо автоматически по уставке «высокое давление и низкий уровень теплоносителя в реакторе», либо принудительно оператором с блочного щита управления (БЩУ). Для их открытия необходимы наличие достаточного давления в газовой системе и источники постоянного тока. Оператор имеет возможность удаленного открытия/закрытия любого из 11 ПК. В случае бездействия оператора или невозможности открытия группы ПК работают в пассивном режиме под действием давления в реакторе в соответствии с уставками на открытие/закрытие.

Анализ работы системы ограничения и снижения давления в реакторе в ходе аварии на энергоблоках № 2 и 3 АЭС «Фукусима-1»

В ходе аварии «полное обесточивание» в период, когда сохраняется питание от аккумуляторных батарей, в промежутках между включениями подпиточной линии RCIC оператор регулирует очередность открытия контрольных

ПК так, чтобы сброс пара в тор происходил по разным линиям — на противоположных сторонах тора, обеспечивая таким образом равномерный нагрев воды в торе. Управление работой клапанов требуется также в связи с необходимостью более глубокого сброса давления, чем предусмотрено уставками закрытия клапанов, с целью уменьшения числа циклов срабатывания ПК.

Аварийные инструкции BWROG требуют от операторов сброса давления в реакторе в случае частичного осушения активной зоны вследствие потери функции подпитки [7]. Для этого с БЩУ открываются аварийные предохранительные клапаны, входящие в состав системы автоматического сброса давления (ADS). Необходимость этого шага объясняется следующими причинами:

- снижение давления позволяет использовать системы подпитки низкого давления (в том числе дизельные и пожарные насосы);
- существенно интенсифицируется охлаждение активной зоны паром;
- исключается прямой нагрев контейнента при разрыве корпуса реактора внутренним давлением и выбросе диспергированной массы расплава в контеймент;
- снижается скорость выхода массы и энергии расплава в контеймент после разрушения корпуса реактора (вытекание расплава под действием силы тяжести вместо мгновенного выброса за счет перепада давлений);
- снижается температура воды в реакторе, что увеличивает эффективность охлаждения первых порций кориума, поступающего на опорную плиту после начала плавления а. з.

Эффективность аварийного сброса давления с точки зрения охлаждения а. з. крайне чувствительна к моменту начала этой процедуры. Раннее открытие клапанов (до начала осушения а. з.) приводит к выбросу теплоносителя из реактора без эффективного охлаждения твэлов, позднее открытие клапанов, уже на стадии осушения а. з., — к интенсификации пароциркуляционной реакции. Поэтому в аварийных инструкциях BWROG момент начала сброса давления определяется снижением уровня в а. з. до значения, при котором парообразование в смоченной части а. з. достаточно для предупреждения роста температуры в осушенной части свыше 982°С [7].

После потери источников постоянного тока оператор лишается возможности управления ПК. Если клапан открыт, обесточивание соленоидов приводит к прекращению подачи газа к ПК, и происходит его закрытие [15; 7].

В дальнейшем уровень давления в реакторе ограничивается периодическим срабатыванием контрольных ПК, причем сброс пара из реактора в топ происходит через один и тот же клапан. Это приводит к локальному нагреву воды в торе вблизи перфорированного концевика паросбросной линии (T-quencher) и возникновению осциллирующих нагрузок на конструкцию тора. При критическом истечении пара в нагретую воду нагрузки могут достигать значений, при которых тор разрушается. Подобная авария произошла в 1972 г. на АЭС «Вюргассен» в ФРГ [8], когда в результате отказа в открытом положении сбросного клапана и продолжительного сброса пара из реактора в конденсационный бак (аналог тора в контейнентах проекта «Mark I») произошло разрушение стенки бака и более 1000 м³ радиоактивной воды попало в окружающую среду (в том числе в реку Везер). Длительная потеря теплоносителя едва не привела к плавлению активной зоны.

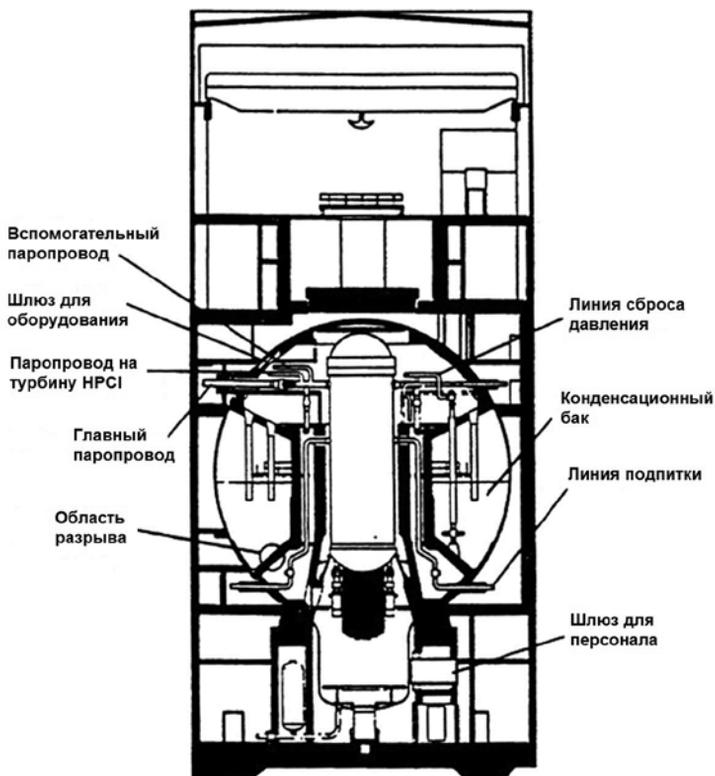


Рис. 1. Повреждение контейнента на АЭС «Вюргассен» [8]

Декомпрессия реактора в условиях полного обесточивания целесообразна, только если у оператора имеется возможность длительного сохранения источников постоянного тока и обеспечена подпитка реактора от внешних источников воды при помощи низконапорных насосов. При снижении давления в реакторе системы RCIC/НРСІ отключаются. Если после декомпрессии реактора источники тока будут потеряны, закрытие клапанов приведет к повторному росту давления в реакторе до уставок срабатывания ПК (т. е. до номинального давления РУ), прекращению подпитки реактора водой, осушению и плавлению активной зоны на высоком давлении в реакторе. Таким образом, если нет уверенности, что источники постоянного тока удастся поддерживать достаточно долго, декомпрессия реактора теряет смысл. В сложившейся ситуации невыполнение операторами АЭС «Фукусима-1» аварийного снижения давления в реакторе может объясняться нежеланием терять последнюю стабильно работающую систему отвода тепла от а. з. (RCIC) при отсутствии достаточных источников тока для поддержания аварийных клапанов в открытом положении.

В общем случае потеря возможности управления ПК в условиях аварии «полное обесточивание» может произойти и в период, когда аккумуляторы работоспособны, и связана со снижением давления в газовой системе клапанов. Время, в течение которого сохраняется необходимое противодавление в клапанах, ограничено, но, судя по открытым публикациям [5], составляет не меньше 24 ч (АЭС «Хоуп Крик»). Противодавление газа обеспечивает от 3 до 5 срабатываний каждого клапана. Рост давления в сухом боксе контейнента (СБК, drywell) в ходе аварии приводит к повышенному расходу сжатого азота и электроэнергии для открытия клапанов, а после достижения предельного перепада давления между средой в контейненте и в газовой системе клапанов может привести к их закрытию. При давлении в реакторе 6—7 МПа область давлений внутри контейнента, в которой открытие клапанов становится невозможно, начинается примерно с 600 кПа (изб.). Например, на АЭС «Хоуп Крик» (США) давление в газовой системе составляет 620 кПа (изб.), а предельный перепад давления с контейнентом 138 кПа [5]. Поскольку давление в контейненте энергоблока № 2 АЭС «Фукусима-1» до момента отключения RCIC не превышало 350 кПа (изб.), то перепад давления, достаточный для принудительного открытия клапанов SRV и декомпрессии реактора, сохранялся достаточно долго. Однако расход газа для привода ПК и потеря источников постоянного тока по меньшей мере ограничивали возможность длительного управления клапанами.

Важно отметить, что ручное открытие клапанов невозможно, поскольку они расположены вне зоны доступа (внутри контейнмента). В настоящее время на ряде АЭС с BWR установлены отдельные дизель-генераторы и резервные емкости со сжатым азотом, предназначенные специально для обеспечения длительного управления ПК ADS с БЩУ.

Еще одним важным аспектом декомпрессии реактора является то, что ее эффективность существенно зависит от давления в контейнменте. В [5] приводятся данные по предельной декомпрессии реактора после открытия ПК ADS: 0,34—0,62 МПа. Однако при длительной работе РУ в условиях полного обесточивания конденсационные возможности тора теряются, и конечное давление в реакторе после декомпрессии может остаться на достаточно высоком уровне, что препятствует подаче воды в реактор от дизельных насосов. Именно это произошло на энергоблоке № 2, когда к моменту завершения работ по соединению линии низконапорной подпитки реактора (системы пожаротушения) с источниками морской воды давление в контейнменте уже достигло 0,45 МПа [10]. Поэтому для подачи воды в реактор от низконапорных насосов предварительно требовалось осуществить вентилирование контейнмента, что было сложно осуществить из-за невозможности ручного открытия вентиляей.

Анализ работы систем подпитки реактора на энергоблоках № 2 и 3 в ходе аварии на АЭС «Фукусима-1»

Надежное функционирование систем подпитки реактора RCIC/HPCI при полном обесточивании сопряжено со множеством факторов. Их влияние достаточно подробно изучалось в рамках анализа безопасности РУ BWR США. В [5] был выполнен анализ наиболее важных параметров, определяющих пределы работы RCIC/HPCI (табл. 1).

Падение давления в реакторе непосредственно вызывает отключение RCIC/HPCI, поскольку эти системы сохраняют работоспособность лишь при высоком давлении пара (не менее 1,239 МПа). Соответственно надежность ПК является важным фактором, влияющим на работоспособность RCIC при авариях с полным обесточиванием. Для АЭС «Пич Боттом 2» число срабатываний ПК до отказа в открытом положении задается равным 187 [13].

**Таблица 1. Параметры, приводящие к отключению систем RCIC/НРСИ
при полном обесточивании АЭС**

Параметр	Комментарий
Время разрядки аккумуляторных батарей	По разным оценкам от 4 до 8 ч
Предельное давление в сухом боксе контейнента — 193 кПа (изб.)	Требуется аварийный сброс давления в реакторе, означающий отключение RCIC/НРСИ вследствие низкого давления пара
Предельная температура в сухом боксе контейнента — 171°C	Требуется аварийный сброс давления в реакторе, время достижения предельной температуры — около 24 ч
Предельное давление на выхлопе турбины RCIC — 345 кПа (изб.) или 303 кПа (изб.) в сухом боксе контейнента	Автоматическое отключение турбины RCIC
Уставка NCTL предельной теплоемкости воды в торе — предельная температура воды в торе при текущем давлении в реакторе, например, 85°C при давлении в реакторе 6,9 МПа	Требуется аварийный сброс давления в реакторе во избежание дальнейшей эскалации давления в контейненте и его разрушения
Уставка NPSH предельного напора на всасе турбонасосов RCIC/НРСИ — предельная температура воды в торе 60°C	Автоматическое отключение RCIC во избежание кавитации турбонасоса
Надежность предохранительных клапанов SRV	Отказ клапана в открытом положении приводит к снижению давления в реакторе и отключению RCIC
Герметичность уплотнений рециркуляционных насосов	Течь пара через уплотнения вызывает рост давления и температуры в помещениях с оборудованием RCIC
Объем воды в баке CST	После осушения бака CST и переключения на забор воды из тора ограничивающим фактором становится время прогрева воды в торе (см. п. 5 и 6)
Температура воздуха в помещениях с оборудованием RCIC/НРСИ, на БЩУ и в помещении распределительных устройств	Проект систем RCIC/НРСИ предусматривает длительную работу при окружающей температуре 64,4°C. При температуре 71°C происходит автоматическое отключение

Запас аккумуляторных батарей

Главным фактором, сокращающим время начала осушения а. з. при полном обесточивании энергоблока, является время разрядки аккумуляторных батарей. По разным оценкам, приводящимся в открытых публикациях, оно составляет от 4 до 8 ч.

Потребителями постоянного тока в ходе аварии «полное обесточивание» являются элементы систем высокого давления RCIC/НРСІ (клапаны, вакуумные и конденсатные насосы, регуляторы частоты вращения турбин), средства измерения, предохранительные клапаны SRV.

На энергоблоке № 3 разряжение аккумуляторных батарей произошло примерно через 36 ч. Как видно, это время гораздо больше сведений из открытых публикаций. На момент подготовки настоящей статьи было неясно, является ли время разряжения аккумуляторов на энергоблоке № 3 реалистичным, а вопрос времени надежной работы аккумуляторных батарей является актуальным для всех энергоблоков вообще, включая ВВЭР, и требует детального исследования.

Отдельного рассмотрения требует процедура оптимального расходования заряда батарей для увеличения времени их разряжения.

На энергоблоке № 2 аккумуляторные батареи были затоплены, и либо осуществлялась подпитка элементов систем от мобильных источников тока (соединенных автомобильных аккумуляторов, судя по последним данным для энергоблока № 2), либо системы выполняли функцию охлаждения активной зоны в ином (непроектном) режиме сразу после затопления батарей, что требует специального изучения. В качестве возможного варианта развития аварии можно предположить, что после потери тока клапаны системы RCIC, регулирующие расход на турбину, остались в текущем открытом положении, обеспечивая уже нерегулируемый сброс пара по открытой линии реактор — турбина — тор и поддерживая постоянное давление в реакторе. Подобный режим работы RCIC ранее не рассматривался.

Запасы подпиточной воды

С учетом оцененного среднего времени работы RCIC (примерно 30 мин) и времени ожидания (1 ч) можно определить время осушения основного источника воды — бака запаса конденсата (CST). Принимая проектный расход подпитки RCIC равным $136,5 \text{ м}^3/\text{ч}$ [15], начальный объем воды в баках на момент аварии 67% на энергоблоке №2 [18] и 66,1% на энергоблоке № 3 [19], воды в баках CST энергоблоков № 2 и 3 (каждый по 2500 м^3 [11]) теоретически хватило бы примерно на 12 ч непрерывной работы RCIC, или, с учетом времени ожидания между циклами включения/выключения RCIC, примерно на 36 ч аварии. Помимо баков CST могли также использоваться баки запаса обессоленной воды (около 300 м^3). Однако в любом случае RCIC на энергоблоках № 2 и 3 должны были переключиться на забор воды

из тора значительно раньше фактического времени их отключения. После переключения RCIC в замкнутый режим работы должен был существенно увеличиться нагрев воды в торе.

Нагрев воды в торе

Опасность нагрева воды в торе связана с достижением предельного значения конденсационной мощности тора, когда сбрасываемый из реактора пар перестает конденсироваться и происходит эскалация давления в контейнменте, что в конечном счете приводит к отключению систем высоко-го давления по уставке «противодавление на выхлопе турбины». Поэтому используется так называемая уставка NCTL отключения систем HPCI/RCIC, направленная на ограничение температуры воды в торе при данном давлении. При подаче воды из бака CST и сбросе пара в тор вода в нем нагревается до 100°C за время $4200 \cdot 2,5 \cdot 10^6 \cdot (100 - 30) / (15 \cdot 10^6) \approx 13,6$ ч, однако к этому времени давление в торе также вырастает. В соответствии с результатами расчетов для АЭС «Хоуп Крик» недогрев 10—15°, определяющий пределы эффективной конденсации, сохраняется примерно до 14 ч [5]. Аналогичные оценки верны и для РУ АЭС «Фукусима-1», т. е. после 14-го часа скорость роста давления в контейнменте должна была увеличиться. Согласно аварийным инструкциям на АЭС США, выход за пределы проектной кривой NCTL требует от оператора действий по вентилированию реактора для сохранения целостности контейнмента. Судя по официальным сообщениям ТЕРСО, эти действия на энергоблоках № 2 и 3 операторы не выполняли, и после превышения уставки NCTL давление в торе продолжило расти.

Длительная работа систем RCIC и HPCI в разомкнутом цикле с забором воды из бака CST и сбросом пара из реактора в тор приводит к увеличению уровня воды в торе как за счет увеличения ее массы, так и за счет нагрева в процессе конденсации пара. Согласно аварийным инструкциям (BWROG EOP) существенный рост уровня воды в торе недопустим. Поэтому логика работы систем HPCI включает автоматическое переключение на забор воды из тора при повышении уровня в нем на 0,180 м [6]. Работа системы HPCI в ходе аварии «полное обесточивание» приводит к выполнению этой уставки еще до исчерпания запасов воды в баке CST. В отношении системы RCIC автоматического переключения с бака CST на тор не предусмотрено [6], поскольку производительность системы значительно меньше по сравнению с HPCI, однако оператор в случае необходимости может выполнить переключение вручную. Видимо, данная процедура была реализована операторами на энергоблоках № 2 и 3. На РУ BWR/4 «Фукусима-1» внутренний объем тора

составляет около 6140 м³ [9; 10], примерно половина его заполнена водой. За 14 ч, в течение которых сохраняется конденсация при барботаже пара в торе, рост уровня воды составил 0,74 м, что не привело к его заполнению (малый радиус тора 4,5 м [12]) даже с учетом того, что часть свободного объема тора занята металлоконструкциями, но требовало переключения RCIC в замкнутый режим работы. Если данная процедура была реализована операторами на энергоблоках № 2 и 3, на момент переключения баки CST не были полностью осушены.

В случае аварии с полным обесточиванием переключение систем RCIC/НПСИ в замкнутый режим работы (с забором воды из тора) приводит к быстрому нагреву воды в торе. Поскольку охлаждение смазочного масла в подшипниках насосов RCIC/НПСИ осуществляется потоком части забираемой воды, температура воды в торе ограничивается предельным значением (85°С). В условиях отсутствия охлаждения воды в торе раннее переключение систем RCIC и тем более НПСИ в замкнутый режим сокращает общее время работы. С целью увеличения этого времени в аварийные инструкции на АЭС США была внесена поправка, позволяющая оператору блокировать переключение систем НПСИ на забор воды из тора. На энергоблоках № 2 и 3 сразу после переключения в замкнутый режим системы RCIC должны были автоматически отключиться. Возможно, этого не произошло из-за отсутствия тока для генерации сигнала.

Если переключения по высокому уровню в торе не было выполнено, оно в любом случае произошло после 36 ч с момента полного обесточивания, когда осушились баки CST. В любом варианте начиная с 14—18 ч обесточивания системы RCIC продолжали работу с превышением кавитационного предела. Это должно было привести к останову турбонасосов (разрушению вследствие кавитации), однако система RCIC отключилась на обоих энергоблоках лишь спустя десятки часов. Данный факт требует отдельного изучения.

Более того, за это время давление в торе должно было превысить уставку отключения турбины RCIC. Продолжение работы RCIC означает, что могла иметь место разгерметизация кожуха тора, сопровождавшаяся истечением пара в соответствующее помещение. Это ограничивало рост давления в торе. Определенный вклад в охлаждение воды в торе могло внести также вентилирование контейнента, однако и на энергоблоке № 2, и на энергоблоке № 3 оно было выполнено намного позднее 14 ч — через 42 и 44 ч после начала аварии соответственно.

Нагрев атмосферы контейнента (сухого бокса)

При полном обесточивании АЭС происходит отключение системы охлаждения атмосферы контейнента, и тепловые потери с корпуса реактора и паропроводов (по нашим оценкам — около 0,7 МВт) вызывают ее постепенный нагрев. Учитывая, что часть оборудования, находящегося в СБК, не рассчитана на работу в условиях повышенной температуры, величина этой температуры ограничивается 138°C [6; 7; 17]. В [6] приводятся оценки предельных температур для металлического кожуха СБК, проходок в контейненте, соленоидов предохранительных клапанов, изоляции электрокабелей. В качестве общей предельной температуры используется значение 148,9°C. Работа энергоблока № 2 в течение почти трех суток без охлаждения атмосферы контейнента должна была привести к превышению предельной температуры газовой среды контейнента и к сопутствующему отказу предохранительных клапанов, а также к потере герметичности СБК. Нагрев среды в СБК свыше 204°C [6] приводит к повреждению материалов уплотнений и образованию неплотностей в местах проходок. При превышении температуры 260°C [6] уплотнения полностью разрушаются и выбрасываются из стенки контейнента, вызывая течи в помещения реакторного здания [7]. Образование неплотностей в контейненте могло привести к выходу смеси пара, азота и водорода в помещения реакторного здания.

Нагрев контейнента до 171°C требует от оператора аварийного снижения давления в реакторе, однако на энергоблоках № 2 и 3 этого сделано не было и, соответственно, система RCIC продолжала работать.

Рост давления в контейненте

Нагрев атмосферы контейнента (сухого бокса контейнента, СБК) также приводит к росту давления в нем и в сообщающемся с ним торе. Это вызывает повышение давления на выхлопе турбины RCIC. Уставка ее отключения (345 кПа изб.) была достигнута на энергоблоке № 2 примерно к 60 часам с начала аварии, а на энергоблоке № 3 — к 40 часам (согласно данным измерений, опубликованным в [10]), поэтому в данном случае достижение предельного противодействия можно рассматривать в качестве причины останова RCIC при условии, что имелось питание для автоматического формирования сигнала на останов.

В американских расчетах отмечается, что нагреву и нагружению давлением контейнента способствует также образование течи из первого контура в объем СБК через уплотнения циркуляционных насосов. Оцененный расход

составляет от 0,0080 м³/с (большая течь) до 0,0008 м³/с (малая течь). Согласно расчетам PSEG, время превышения предельного давления в контейнменте составляет для АЭС «Хоуп Крик» (BWR/4 «Mark I», 1067 МВт (эл.)) 6—13 ч в зависимости от размера течи. Из-за высокой температуры в СБК на поздней стадии аварии на АЭС «Фукусима-1» нельзя исключить разрушение уплотнений и течи пара в СБК.

Нагрев воздуха в помещениях с оборудованием RCIC/НРСИ

При долговременной работе RCIC/НРСИ в отсутствие принудительной вентиляции температура в помещениях, где расположено оборудование этих систем, возрастает вследствие теплопотерь от паропроводов, нагрева токопроводящих частей оборудования и, возможно, протечек пара из сальниковых уплотнений в случае их разрушения. Поскольку рост температуры свидетельствует также о наличии течи из паропровода, при достижении определенного значения (71°С для АЭС «Хоуп Крик», 93,3°С для АЭС «Браунс Ферри») предусмотрено автоматическое отключение RCIC/НРСИ. В условиях аварии «полное обесточивание» блокировка RCIC/НРСИ по температуре в помещении является ложным сигналом. Поэтому аварийными процедурами предусмотрены действия оператора по его блокированию. В технических отчетах NRC отмечается отсутствие необходимости охлаждения воздуха в помещениях, где размещено оборудование (насосы) RCIC/НРСИ, в течение 4 ч, однако позже продолжающийся нагрев воздуха может привести к перегреву насосов. Поэтому для длительной работы этих систем на энергоблоках № 1—3 требовалось вентилирование соответствующих помещений.

В отсутствие источников постоянного тока единственным механизмом снижения температуры воздуха в помещениях с оборудованием RCIC/НРСИ являлась циркуляция воздуха в системе связанных помещений реакторного здания за счет естественной конвекции. Остается открытым вопрос об эффективности охлаждения оборудования RCIC/НРСИ в данных условиях.

Нагрев воздуха в помещении БЩУ

Согласно [5] при авариях с полным обесточиванием рост температуры воздуха на БЩУ и в помещении распределительных устройств не исключает работоспособности персонала или оборудования, поскольку вентиляция этих помещений реализуется естественным образом при выполнении мер, предусмотренных аварийными процедурами (открытие дверей, удаление потолочных панелей). Без реализации этих мер по консервативным оценкам

в случае сохранения в работе аккумуляторных батарей постоянного тока (с нагрузкой 45 кВт) нагрев воздуха за 8 ч аварии должен составить 16°. Однако, учитывая потерю всех (энергоблок № 2) или большинства (энергоблок № 3) источников постоянного тока на АЭС «Фукусима-1», тепловыделение от электрических источников было мало, поэтому нагрев БЩУ не был значительным.

Доступные оператору средства измерения и контроля

Отдельного рассмотрения требует вопрос о средствах измерения на БЩУ, сохранявшихся в процессе аварии на энергоблоках № 1—3 АЭС. Согласно [6], после полного обесточивания энергоблока с РУ BWR/4 оператор на БЩУ имеет возможность контролировать уровень и давление в реакторе, параметры систем RCIC/НРСИ, уровень воды в баке CST, давление в СБК, уровень в торе. За пределами БЩУ имеется возможность измерения температуры среды в СБК и помещении тора. Сохраняется аварийное освещение помещения БЩУ. Контроль за работой ПК ограничен измерением температуры концевиков сбросных линий ADS, давления в концевиках и сигнализацией подачи напряжения на соленоиды ПК.

Диапазон измерения уровня воды в торе весьма узок (от $-0,63$ до $+0,63$ м), т. е. после выхода за пределы шкалы исчезает прямая возможность его контроля. Кроме того, уровень воды в реакторе измеряется путем сравнения веса столбов воды в опускном участке реактора и в референтном канале, расположенном в СБК. Нагрев атмосферы СБК приводит к расширению воды в референтном канале и, следовательно, к завышенным показаниям уровня. При нагреве атмосферы контейнента с 60°С до 170°С вносимая погрешность составит +760 мм [6]. Нижняя отметка уровнемера соответствует примерно 300 мм над тепловыделяющей частью активной зоны. Поэтому даже если уровень снижается до этой отметки, вносимая погрешность не критична для оценки состояния активной зоны.

После исчерпания источников постоянного тока теряются все средства контроля параметров РУ на БЩУ и освещение. Единственным способом контроля состояния РУ являются обход помещений и визуальное наблюдение измерительных приборов (уровнемеров, манометров), что, вообще говоря, в отсутствие освещения и неопределенного состояния реактора требует наличия у персонала готовности к действиям в подобных условиях.

Выводы

Исходя из анализа доступных данных, можно предполагать, что на энергоблоках № 2 и 3 в процессе развития аварии образовалась негерметичность контейнента в результате его переопрессовки, нагрева и разрушения уплотнений, проходок и пр. В результате могла иметь место утечка водорода в помещения реакторного здания еще до начала вентилирования контейнента. На энергоблоке № 2, возможно, произошло механическое разрушение кожуха тора вследствие продолжительного сброса горячего пара в насыщенную воду («эффект Вюргассен»).

Системы подпитки реактора RCIC/НРСИ на обоих блоках отключились, вероятно, по причине достижения предельного противодавления на выхлопе турбин из-за роста давления в контейненте или вследствие кавитации турбонасосов. Этому способствовали нагрев воды в торе, особенно после переключения RCIC на работу через тор, тепловые потери первого контура и возможные течи из уплотнений ГЦН. Работа предохранительных клапанов, обеспечивавших работу RCIC и ограничивавших давление в реакторе, продолжалась без заметных отказов. Учитывая отсутствие источников постоянного тока на обоих энергоблоках после выхода из строя аккумуляторных батарей, длительная работа систем безопасности (70 и 37 ч) может быть объяснена действиями персонала АЭС (использование альтернативных источников тока и сжатого газа для управления клапанами) и работой систем RCIC/НРСИ в непроектных режимах, ранее не рассматривавшихся при оценке безопасности энергоблоков.

Несмотря на то что на энергоблоках № 2 и 3 АЭС «Фукусима-1» частично продолжали действовать источники постоянного тока (сохранение аккумуляторных батарей первые 36 ч аварии на энергоблоке № 3, а также использование мобильных генераторов и автомобильных аккумуляторов на энергоблоке № 2 подтверждается официальными данными [20]), их недостаточная мощность ограничивала возможности контроля и оценки состояния РУ и действия по управлению аварией. Также реализации мер по управлению аварией мешали остаточные землетрясения, последствия цунами и взрывы на соседних энергоблоках. В этой связи авария на АЭС «Фукусима-1» уникальна, поскольку до сих пор при анализе тяжелых аварий энергоблоки рассматривались взаимно изолированно, т. е. не анализировались случаи возникновения аварий одновременно на нескольких энергоблоках. В расчетах тяжелых аварий вследствие полного обесточивания АЭС, проводившихся в 1980—1990-х годах для американских АЭС с BWR/4 [13], кон-

сервативно предполагался отказ систем RCIC/НРСИ после потери источников постоянного тока. Поэтому в расчетах начало осушения активной зоны в условиях протекания аварии, аналогичных сложившимся на энергоблоке № 2 АЭС «Фукусима-1», происходило значительно раньше (3,3 ч с момента полного обесточивания) и определялось временем разрядки аккумуляторных батарей. Из опыта аварии на АЭС «Фукусима-1» видно, что системы RCIC сохраняли работоспособность на энергоблоке № 2 даже после потери штатных источников постоянного тока и прогрева источника воды до насыщения, что требует специального изучения. Применительно к современным РУ ВВЭР также необходим анализ работоспособности систем безопасности, включая пассивные при частичной или полной потере источников постоянного тока. Например, как это произошло на энергоблоке № 1, отключение системы безопасности (Isolation Condenser) может происходить вследствие закрытия клапанов при потере постоянного тока.

Как показывает авария на блоке № 3, время работы аккумуляторных батарей (36 ч) может быть гораздо больше времени, обычно указываемого по результатам квалификационных испытаний (4—8 ч). Этот факт следует учитывать при анализе тяжелых аварий «малая течь» или «обесточивание» на АЭС с ВВЭР, стратегия управления которыми включает действия оператора, направленные на снижение давления в первом контуре. Момент снижения давления, как правило, выбирается достаточно консервативно, исходя из условия надежной работы аккумуляторных батарей.

Анализ тяжелых аварий должен учитывать такие явления, как нагрев помещений и его влияние на работоспособность оборудования, сохранение возможности удаленного контроля состояния РУ (показания контрольно-измерительных приборов на БЩУ) и надежность показаний при тяжелых авариях. До аварии на АЭС «Фукусима-1» столь подробный и системный анализ тяжелых аварий не проводился.

Применительно к аварии на АЭС «Фукусима-1» примечателен тот факт, что в течение 70 ч в условиях повышенной температуры, радиационного фона и влажности после десятков срабатываний каждого предохранительного клапана не произошел их отказ. В США проводились широкие исследования надежности предохранительных клапанов, используемых на АЭС с PWR и BWR [20], однако условия, в которых тестировались клапаны, отличались от условий, характерных для поздних стадий тяжелых аварий. Для более точной оценки надежности клапана требуется его квалификация в условиях,

соответствующих тяжелой аварии (сбрасываемая среда — пар, вода, пароводяная смесь, температура, присутствие неконденсируемых газов и пр.).

Для АЭС с РУ ВВЭР также необходимо выполнение углубленного анализа работоспособности импульсного предохранительного устройства компенсатора давления (ИПУ КД) в подобных условиях, поскольку при авариях с потерей теплоотвода ко второму контуру без учета действия оператора по управлению аварией число открытий ИПУ КД может достигать сотен [21], а отказ клапана в открытом или закрытом положении кардинально меняет ход развития аварии.

Квалификация оборудования, используемого при тяжелых авариях (аккумуляторные батареи, ИПУ КД, клапаны системы аварийного газоудаления, контрольно-измерительные приборы, рекомбинаторы водорода), или оборудования, способного прямо или косвенно повлиять на развитие аварии (разрушение уплотнений, изоляции кабелей, возгорание масел и пр.), должна выполняться в максимально представительных условиях.

При анализе тяжелых аварий необходимо учитывать возможные ложные сигналы, связанные, например, с повышением температуры в помещениях, которое интерпретируется как образование течи теплоносителя.

Ход развития аварии на АЭС «Фукусима-1» показывает, что существенную роль играло наличие достаточных запасов обессоленной воды, прежде всего в баках CST, являющихся основным источником подпитки при работе систем RCIC/HRIC. По сравнению с АЭС «Пич Боттом» на АЭС «Фукусима-1» имеется больший запас воды в баках CST (примерно в 3,3 раза), однако на момент аварии они были заполнены на две трети объема, а главное, их расположение между машинным залом и океаном делает их уязвимыми для цунами. С учетом опыта аварии на АЭС «Фукусима-1» необходимо определять для действующих и проектируемых АЭС подобные уязвимые места, а при анализе тяжелых аварий рассматривать потери источников воды, если для этого создаются условия (образование течей вследствие землетрясений, терактов, замерзание или нагрев вследствие климатических аномалий, повреждение оболочки вследствие взрыва на соседнем энергоблоке и пр.).

В первые месяцы после аварии основная неопределенность в оценках ее развития на энергоблоках № 1—3 заключалась в отсутствии данных о содержании аварийных инструкций и руководств по управлению тяжелыми авариями РУТА, принятых на АЭС Японии. Несмотря на то что для всех членов сообщества операторов РУ BWR (BWROG) разработаны единые аварийные инструкции, каждая страна адаптирует их с учетом местных законов и

подходов к обеспечению безопасности. Аварийные инструкции на АЭС США требуют от оператора выполнения вентилирования контейнента при превышении определенного давления. Основная задача — сохранить общую целостность последнего барьера на пути продуктов деления в окружающую среду за счет организации контролируемого фильтруемого истечения. Применительно к РУ ВВЭР вопрос вентилирования защитной оболочки требует отдельного изучения. Вентилирование позволяет не только снизить давление в защитной оболочке, но и удалить из нее массы водорода, в целом обеспечивая ее целостность. Однако для снижения радиоактивного выброса требуется надежная система фильтрации, обеспечивающая длительное (в течение часов) улавливание продуктов деления без необходимости замены фильтров и создания значительного сопротивления истечению.

Уроки аварии на АЭС «Фукусима-1» должны быть использованы для определения направлений совершенствования отечественных методик анализа тяжелых аварий на АЭС. Современные методики должны включать не только численное моделирование при помощи расчетных кодов, но и технологические аспекты развития аварий, работоспособность всех систем и оборудования в условиях тяжелых аварий, доступность и надежность контрольно-измерительных приборов, возможность работы на БЦУ на основании результатов численного моделирования и данных об условиях гарантированной работоспособности оборудования.

Литература

1. *Haruo Fujimoto, Keisuke Kondo, Tomomichi Ito et al. Circumstances and Present Situation of Accident Management Implementation in Japan // OECD/NEA Workshop «Implementation of Severe Accident Management (SAM) Measures»: ISAMM2009. — Böttstein, Switzerland, Oct. 26—28, 2009.*
2. *Severe Accident and Accident Management // JNES. — [S. 1.], July 2009.*
3. *NSCRG: L-AM-II.01 «Accident Management for Severe Accidents at Light Water Power Reactor Installations» / Nuclear Safety Commission of Japan. — [S. 1.], 1992.*
4. *Kajimoto M. et al. Evaluation of Technological Appropriateness of the Implemented Accident Management Measures for BWR by Level 1 and Level 2 PSA Methods // Workshop on the Implementation of Severe*

- Accident Management Measures / OECD/CSNI/NEA, WGAMA, Paul Scherrer Inst. — [S. 1.], 2001.
5. Response to Request for Additional Information — License Amendment Request: Emergency Diesel Generators (EDG) A and B Allowed Outage Time (AOT) Extension. — Attachment 6-1 «Excerpt from Hope Creek Loss of Offsite Power and Station Blackout Event Tree Notebook», ADAMS ML102870101. — PSEG Nuclear LLC, NRC, USA, 30.09.2010.
 6. NUREG/CR-2182 Station Blackout at Browns Ferry Unit One—Accident Sequence Analysis, ORNL/NUREG/TM-455/V1, ORNL. — [S. 1.], Nov. 1981.
 7. Reactor Safety Course / USNRC Technical Center, NUREG/CR-6042 Rev. 2. — NRC/ORNL/SNL. — [S. 1.], 2002.
 8. *Hulkower S. D.* The Effects Of Regulation On The Performance Of Nuclear Power In The United States And The Federal Republic Of Germany: M.Sc. Thesis / MTI. — [S. 1.], 1986.
 9. Report of the Japanese Government to the IAEA Ministerial Conference on Nuclear Safety — The Accident at TEPCO's Fukushima Nuclear Power Stations. — Attachment IV-1, Nuclear Emergency Response Headquarters / Government of Japan. — [S. 1.], June 2011.
 10. Examination of Accident at Tokyo Electric Power Co., Inc.'s Fukushima Daiichi Nuclear Power Station and Proposal of Countermeasures / JNTI, Examination Committee on Accident at Fukushima Daiichi NPP. — [S. 1.], Jan. 25 2012.
 11. <http://www.nisa.meti.go.jp/english/files/en20110403-3-2.pdf>.
 12. Assessment and Management of Ageing of Major Nuclear Power Plant Components Important to Safety: Metal components of BWR containment systems. — Vienna, 2000. — IAEA-TECDOC-1181.
 13. NUREG—1953 Confirmatory Thermallyhydraulic Analysis To Support Specific Success Criteria In The Standardized Plant Analysis Risk Models — Surry And Peach Bottom Draft Report for Comment. — [S. 1.], Nov. 2010.
 14. Safety Of Nuclear Power Plants: Design, Safety Standards Series No. Ns-R-1, Safety Requirements / Intern. Atomic Energy Agency. — Vienna, 2000.

15. NUREG/CR-5869 Identification and Assessment of BWR In-Vessel Severe Accident Mitigation Strategies / ORNL. — [S. 1.], Oct. 1992
16. Технический экспресс-отчет: Предварительные оценки протекания аварии с полным обесточиванием на энергоблоках № 1—3 и потери охлаждения бассейна выдержки на энергоблоке № 4 АЭС «Фукусима-1» / ИБРАЭ РАН. — М., март 2011.
17. NUREG/CR-4942 Equipment Operability During Station Blackout Events / U.S. NRC SNL. — [S. 1.], 1987.
18. Operator Logs — Operator Task Handover Journal, Mar. 11, 2011 / TEPCO // http://www.tepco.co.jp/en/nu/fukushima-np/plant-data/fl_4_Nisshi1_2.pdf.
19. Operator Logs — Operator Task Handover Journal, Mar. 11, 2011 / TEPCO // http://www.tepco.co.jp/en/nu/fukushima-np/plant-data/fl_4_Nisshi3_4.pdf.
20. NUREG/CR-7037 Industry Performance of Relief Valves at U.S. Commercial Nuclear Power Plants through 2007 / U.S. NRC INL. — [S. 1.], Mar. 2011.
21. Долганов К. С., Томащук Д. Ю., Киселев А. Е. и др. Анализ возможности массового разрушения теплообменных труб ПГ при тяжелых авариях на РУ ВВЭР-1200/491 // *Вопр. атомной науки и техники. Сер. Обеспечение безопасности АЭС.* — 2011. — № 29.

Зависимость от выгорания накопления ^{134}Cs и ^{137}Cs в активной зоне блока № 2 АЭС «Фукусима-1»

*Р. И. Бакин, А. Е. Киселев, В. И. Тарасов, С. В. Панченко, С. В. Цаун,
А. В. Шикин*

Введение

При аварии на АЭС или иных объектах с ядерными реакторами разработка мер защиты населения в России базируется на положениях норм радиационной безопасности (НРБ 99/2009), регламентирующих дозовые нагрузки за 2, 10, 30 сут и за первый год после аварии. Оперативность выполнения оценок возможных доз облучения за указанные периоды предопределяет эффективность защитных мероприятий как с точки зрения медицинских последствий для здоровья населения, так и с точки зрения минимизации ущерба для экономики региона и государства.

Оперативный анализ дозовых полей вокруг аварийного объекта опирается на результаты измерений постоянно действующей сети наблюдений в локальных точках пространства, оценке мощности и качественного состава источника, а также прогноза распространений радиоактивных веществ в окружающей среде. Эти три составляющие взаимно дополняют друг друга и являются фундаментальной основой современной системы аварийного реагирования при радиационных авариях.

Наиболее трудной в оперативном плане является задача реконструкции источника радиоактивного загрязнения. Эти трудности обусловлены сложным и во многом непредсказуемым характером развития событий на объекте, большим количеством освобождаемых радионуклидов, степени радиационной опасности которых могут различаться в десятки тысяч раз.

Для значительного числа уже произошедших аварий значимая роль в формировании дозовых нагрузок принадлежит изотопам йода, цезия и теллура (как материнского изотопа для изотопов йода). При этом в первые часы и сутки основной вклад в облучение дают изотопы йода, а впоследствии все большую роль начинают играть изотопы цезия. Количество наиболее биологически значимого из них — ^{137}Cs , определяющего среднесрочные и долгосрочные последствия аварии, в первые часы трудно определить сред-

ствами традиционных мониторинговых сетей, непросто это сделать и по пробам внешней среды. Более удобным маркером является ^{134}Cs , поскольку этот изотоп сравнительно легко можно идентифицировать в окружающей среде. В этом случае для повышения точности всех последующих оценок необходимо знать, в каких отношениях изотопы цезия находились в топливе (источнике) на момент аварии. Анализ предшествующих аварий показал, что используемые в начальный период консервативные предположения об отношении $^{134}\text{Cs}:^{137}\text{Cs}$ в реакторах различных типов и с разной степенью выгорания топлива заметно отличаются от наблюдаемых величин в объектах внешней среды [1—3].

Учитывая важность вклада радионуклидов цезия в формирование дозовых нагрузок на население, подвергшееся радиационному воздействию вследствие аварии на ядерном реакторе, проблеме оценки отношений двух изотопов цезия в топливе в период топливного цикла уделяется заметное внимание во всех странах с развитой ядерной энергетикой. В данной работе приведены результаты расчета с помощью кода СОКРАТ/ВЗ активностей ^{134}Cs и ^{137}Cs , накопленных перед аварией на блоке № 2 АЭС «Фукусима-1», и сравнение относительных активностей различных изотопов, накопленных в активной зоне энергоблока и рассчитанных с помощью кода СОКРАТ/ВЗ, с измеренными отношениями активностей этих изотопов, выпавших в Европе после аварии.

Уточненная методика расчета накопления ^{134}Cs в активной зоне РУ ВВЭР с помощью кода СОКРАТ/ВЗ

Для расчета накопления продуктов деления во время нормальной эксплуатации реакторной установки ВВЭР в коде СОКРАТ/ВЗ используется модуль БОНУС (Быстрая Оценка Нуклидного Состава). Методика расчетов накопления приведена в [4]. Описание и результаты верификации модуля в составе кода СОКРАТ/ВЗ приведено в [5; 6]. Для уточнения расчетов активности накопленного в активной зоне изотопа ^{134}Cs концентрации ^{134}Cs и ^{137}Cs будем определять с помощью формул:

$$c_{134} \approx C\gamma_{133}\lambda_{\Phi} \frac{e^{-\lambda_{134}t} + \lambda_{134}t - 1}{\lambda_{134}^2},$$

$$c_{137} \approx C\gamma_{137}t,$$

где C — постоянная, зависящая от выбора единиц; $\gamma_{133} = 6,2$ и $\gamma_{137} = 6,7$ — кумулятивные выходы изотопов ^{134}Cs и ^{137}Cs ; $\lambda_{134} = 1,07 \cdot 10^{-8} \text{ с}^{-1}$ и $\lambda_{137} = 7,28 \cdot 10^{-10} \text{ с}^{-1}$ — их постоянные распада; λ_{Φ} — постоянная захвата нейтронов ядром изотопа ^{133}Cs , являющегося родительским для ^{134}Cs :

$$\lambda_{\Phi} = (\sigma + \gamma I)\Phi.$$

В этой формуле $\sigma = 30$ барн и $I = 460$ барн — сечение и резонансный интеграл реакции нейтронов для ядра ^{133}Cs ; $\gamma \approx 0,5$ — жесткость нейтронного спектра. Для типичного значения потока нейтронов $\Phi \sim 10^{17} \text{ м}^{-2} \text{ с}^{-1}$ величина λ_{Φ} близка к $2,5 \cdot 10^{-9} \text{ с}^{-1}$.

Отношение концентраций

$$\frac{c_{134}}{c_{137}} \approx \frac{\gamma_{133}}{\gamma_{137}} \lambda_{\Phi} \frac{e^{-\lambda_{134}t} + \lambda_{134}t - 1}{t\lambda_{134}^2}.$$

При малых временах это отношение стремится к нулю, при больших — к величине

$$\frac{c_{134}}{c_{137}} \approx \frac{\gamma_{133}}{\gamma_{137}} \frac{\lambda_{\Phi}}{\lambda_{134}} \approx 0,2,$$

т. е. концентрация ^{134}Cs всегда меньше концентрации ^{137}Cs .

Что касается отношения активностей $a_{134} = \lambda_{134}c_{134}$ и $a_{137} = \lambda_{137}c_{137}$, то по-прежнему

$$\frac{a_{134}}{a_{137}} \xrightarrow{t \rightarrow 0} 0,$$

однако при больших временах

$$\frac{a_{134}}{a_{137}} \rightarrow \frac{\gamma_{133}}{\gamma_{137}} \frac{\lambda_{\Phi}}{\lambda_{137}} \approx 3,2 > 1.$$

Таким образом, активность ^{134}Cs меньше активности ^{137}Cs в начале облучения топлива в реакторной установке (РУ), а в ходе работы РУ сравнивается с ней и далее превосходит ее. Момент сравнения активностей зависит от режима работы реактора (фактически от плотности потока нейтронов). Расчет активностей накопленных изотопов продемонстрируем на приме-

ре кампании реактора ВВЭР-1000, рассмотренной в [7]. В этой работе для различных глубин выгорания топлива рассчитывались активности изотопов, накопленных во время нормальной эксплуатации в активной зоне РУ ВВЭР-1000 с основными параметрами: тепловая мощность — 3200 МВт, загрузка диоксида урана — 79,6 т, загрузка урана — 70 т, среднее обогащение — 4,4%. Аналогичный сценарий накопления изотопов был рассчитан с помощью кода СОКРАТ/ВЗ. Заметим, что останов реактора на перегрузку топлива не учитывался. На рис. 1 показаны временные зависимости активностей (Бк) накопленных изотопов ^{134}Cs (черная кривая) и ^{137}Cs (красная кривая). До 500 сут работы реактора активность накопленного ^{134}Cs меньше активности ^{137}Cs , после 500 сут активность ^{134}Cs больше активности ^{137}Cs . Результаты расчетов, приведенные в [7], показаны маркерами: черные круги — активность изотопов ^{134}Cs , красные квадраты — активность изотопов ^{137}Cs . Видно, что простая модель накопления изотопов, используемая в коде СОКРАТ/ВЗ, совпадает с прецизионными расчетами активности ^{134}Cs с точностью не хуже, чем 22%, а ^{137}Cs — с точностью не хуже 8%. На рис. 2 показано число атомов изотопов ^{134}Cs и ^{137}Cs , накопленных в активной зоне. Видно, что всегда число атомов (соответственно концентрация) ^{134}Cs меньше числа атомов (концентрации) ^{137}Cs .

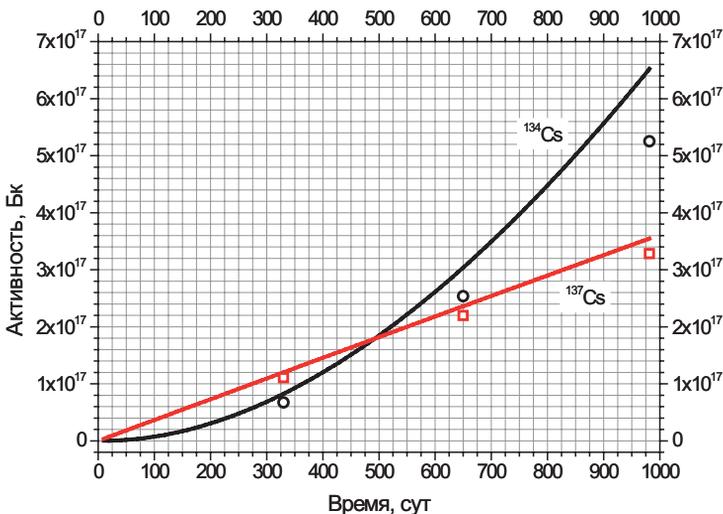


Рис. 1. Временные зависимости накопления активностей (Бк) изотопов ^{134}Cs и ^{137}Cs в активной зоне ВВЭР-1000. Кривые — результаты расчетов по коду СОКРАТ/ВЗ, маркеры — результаты, приведенные в [7]

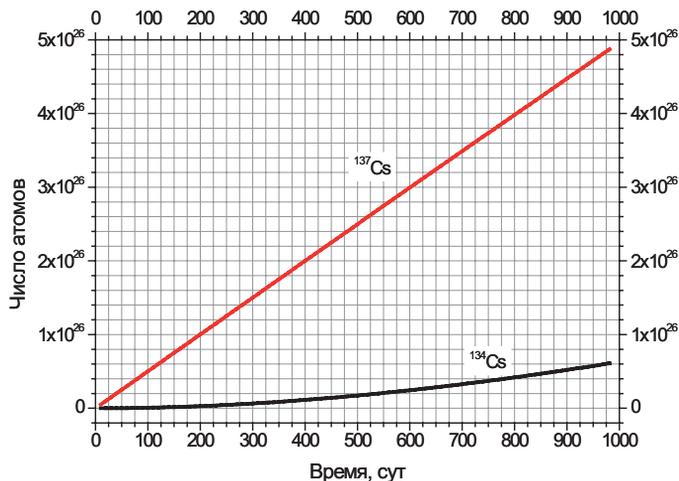


Рис. 2. Временные зависимости накопления числа атомов изотопов ^{134}Cs и ^{137}Cs в активной зоне ВВЭР-1000

В руководящем документе [8] показано, что отношение активностей изотопов ^{134}Cs и ^{137}Cs сильно зависит от выгорания, и приведены эти зависимости для различных обогащений топлива в ВВЭР-1000. Так для тепловыделяющих сборок с обогащением 4,4% рекомендуется использовать формулу

$$\frac{A^{134}\text{Cs}}{A^{137}\text{Cs}} = 0,0409B_U, \quad (1)$$

где B_U — выгорание урана, МВт·сут/кг.

На рис. 3 показана зависимость отношения активностей изотопов цезия от выгорания топлива для ВВЭР-1000: черная кривая — расчет по коду СОКРАТ/ВЗ, красная кривая — расчет по формуле (1), синие маркеры — данные из [6]. Видно, что модели, используемые в коде СОКРАТ/ВЗ приводят к переоценке отношения активностей по сравнению с данными работ [7; 8], однако максимальное отличие не превышает 13%.

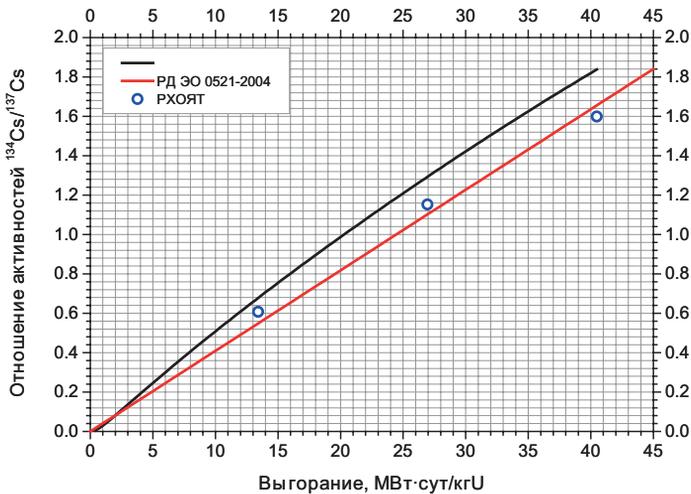


Рис. 3. Зависимость отношения активности от выгорания для ВВЭР-1000.
Черная кривая — расчет по коду СОКРАТ/ВЗ, красная кривая — формула (1),
маркеры — данные из [7]

Итак, показано, что модели кода СОКРАТ/ВЗ позволяют рассчитывать накопление изотопов ^{134}Cs с точностью не хуже 22%, накопление изотопов ^{137}Cs с точностью меньше 8% и отношение активностей с точностью не хуже 13%.

Расчет активностей изотопов ^{134}Cs и ^{137}Cs , накопленных в блоке № 2 АЭС «Фукусима-1»

Сразу после аварии на АЭС «Фукусима-1» с помощью кода СОКРАТ/ВЗ было рассчитано накопление изотопов на всех блоках и бассейнах выдержки станции. Приведем результаты расчета накопления изотопов цезия в блоке № 2 АЭС «Фукусима-1». В работе приводятся результаты расчетов для параметров активной зоны, которые были известны на середину марта 2011 г. Официальных источников данных практически не было, информация бралась в основном из Интернета. В табл. 1 приведены параметры активной зоны блока № 2, при которых проводились расчеты. Параметры взяты из базы данных МАГАТЭ Power Reactor Information System (PRIS) — <http://www.iaea.org/pris/>.

В настоящее время появились работы, посвященные расчетам накопления изотопов на АЭС и измерениям активности различных изотопов в различных

странах. Для сравнения данных удобно пользоваться работой [9], поскольку в ней для расчетов накопления изотопов использовались параметры активной зоны, близкие по значениям к тем, которые использовались нами.

Таблица 1. Основные характеристики активной зоны, используемые при расчетах накопления изотопов

Характеристика	Значение
Номинальная тепловая мощность, ГВт	2,35
Масса урана в активной зоне, кг	94 000
Среднее обогащение, %	3,8
Среднее выгорание урана, МВт·сут/кг	45,0

На рис. 4 показаны зависимости отношения активностей изотопов ^{134}Cs и ^{137}Cs от глубины выгорания топлива в АЭС, рассчитанные с помощью кода СОКРАТ/ВЗ и приведенные в [9]. Как и при сравнении с данными [7; 8], СОКРАТ/ВЗ переоценивает отношение активностей, но теперь максимальное отличие между кривыми составляет 31%, что заметно больше, чем на рис. 3. Последнее обстоятельство может быть связано не только с погрешностями методик кода СОКРАТ/ВЗ, но и с неопределенностью в выборе исходных данных для расчетов, например, при моделировании режима работы реактора.

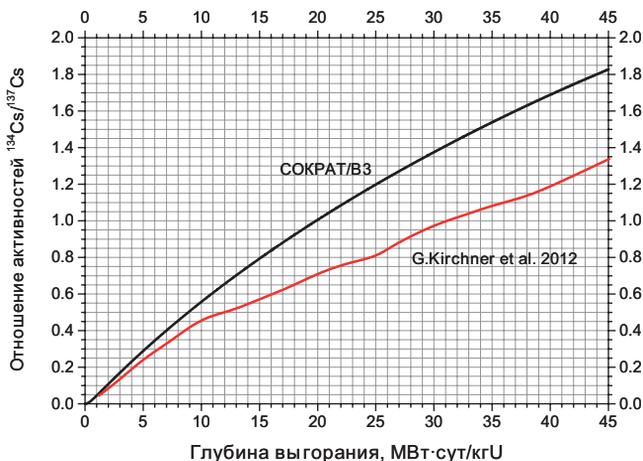


Рис. 4. Зависимость отношения активностей изотопов ^{134}Cs и ^{137}Cs от глубины выгорания топлива во время стационарной кампании на блоке № 2 АЭС «Фукусима-1», рассчитанная с помощью кода СОКРАТ/ВЗ (черная кривая) и приведенная в [9] (красная кривая)

В [9] измерялось отношение активности ^{134}Cs и ^{137}Cs 20 марта в атмосфере Европы. Полученная величина 0,874 позволила авторам утверждать, что основной выход изотопов во время аварии на АЭС был в момент, когда величина среднего выгорания топлива равнялась 26,7 МВт-сут/кг U. Наши расчеты показывают, что среднее выгорание топлива при таких отношениях активности изотопов ^{134}Cs и ^{137}Cs должно быть порядка 16,8 МВт-сут/кг U. Отличие на 44,4%. Будем сравнивать результаты расчетов накопления активностей по коду СОКРАТ/ВЗ с результатами работы [9] при примерно одинаковых отношениях активностей ^{134}Cs и ^{137}Cs

$$\frac{A^{134}\text{Cs}}{A^{137}\text{Cs}} = 0,874.$$

В табл. 2 показаны удельные активности (Бк/т U) изотопов, приведенные в работе [9] и рассчитанные с помощью кода СОКРАТ/ВЗ.

Таблица 2. Удельные активности (Бк/т U) изотопов, накопленные в активной зоне АЭС, приведенные в работе [9] и рассчитанные с помощью кода СОКРАТ/ВЗ

Изотоп	[9]	СОКРАТ/ВЗ	Погрешность, %
^{89}Sr	$2,5 \cdot 10^{16}$	$2,73 \cdot 10^{16}$	8,80
^{90}Sr	$2,5 \cdot 10^{15}$	$1,65 \cdot 10^{15}$	41,0
^{95}Zr	$4,3 \cdot 10^{16}$	$4,36 \cdot 10^{16}$	1,39
^{103}Ru	$3,6 \cdot 10^{16}$	$3,23 \cdot 10^{16}$	10,8
^{106}Ru	$1,1 \cdot 10^{16}$	$7,56 \cdot 10^{15}$	37,1
^{129}I	$7,3 \cdot 10^8$	$5,6 \cdot 10^8$	26,4
^{131}I	$2,5 \cdot 10^{16}$	$2,37 \cdot 10^{16}$	5,34
$^{129\text{m}}\text{Te}$	$1,2 \cdot 10^{15}$	$1,19 \cdot 10^{15}$	0,837
^{132}Te	$3,5 \cdot 10^{16}$	$3,70 \cdot 10^{16}$	5,56
^{134}Cs	$2,8 \cdot 10^{15}$	$1,74 \cdot 10^{15}$	46,7
^{136}Cs	$1,0 \cdot 10^{15}$	$4,71 \cdot 10^{14}$	71,9
^{137}Cs	$3,2 \cdot 10^{15}$	$2,04 \cdot 10^{15}$	44,3
^{140}Ba	$4,5 \cdot 10^{16}$	$4,37 \cdot 10^{16}$	2,93
^{140}La	$4,8 \cdot 10^{16}$	$4,37 \cdot 10^{16}$	9,38
^{144}Ce	$3,3 \cdot 10^{16}$	$3,05 \cdot 10^{16}$	7,87
^{235}U	$1,2 \cdot 10^9$	$1,73 \cdot 10^9$	36,2
^{238}U	$1,2 \cdot 10^{10}$	$1,18 \cdot 10^{10}$	1,68
^{239}Np	$4,1 \cdot 10^{17}$	$4,41 \cdot 10^{17}$	7,29
^{239}Pu	$9,7 \cdot 10^{12}$	$1,11 \cdot 10^{13}$	13,5
^{240}Pu	$1,4 \cdot 10^{13}$	$8,08 \cdot 10^{12}$	53,6
^{241}Pu	$2,8 \cdot 10^{15}$	$2,44 \cdot 10^{15}$	13,7

Из табл. 2 видно, что отличия между расчетными значениями активностей различных изотопов не очень велики.

В [9] даются отношения активностей различных изотопов, измеренных в атмосфере Европы 20 марта 2011 г. В табл. 3 приведены результаты измерений и расчетов по коду СОКРАТ/ВЗ. Видно, что рассчитанные по коду СОКРАТ/ВЗ относительные активности хорошо совпадают с экспериментальными данными.

Таблица 3. Сравнение отношения активностей различных изотопов, измеренных в атмосфере Европы 20 марта 2011 г. и рассчитанных с помощью кода СОКРАТ/ВЗ

Изотопы	Результаты измерений из [9]		Отношение активностей СОКРАТ/ВЗ	Модуль относительной ошибки, %	
	Отношение активностей	Границы доверительного интервала			
		5%			95%
$^{134}\text{Cs} : ^{137}\text{Cs}$	0,874	0,840	0,907	0,843	3,61
$^{136}\text{Cs} : ^{137}\text{Cs}$	0,132	0,099	0,164	0,144	8,70
$^{132}\text{Te} : ^{137}\text{Cs}$	2,45	2,21	2,75	2,71	10,08
$^{129\text{m}}\text{Te} : ^{132}\text{Te}$	0,46	0,30	0,73	0,179	87,95
$^{89}\text{Sr} : ^{90}\text{Sr}$	11,2	8,9	12,2	14,734	27,25

Соответствующие результаты вычислений отношений активностей в [9] даны в виде графиков в логарифмическом масштабе, что неудобно для сравнения. Если пересчитать данные по накоплению на 9-е сутки после аварии из [9], то получим результаты, приведенные в табл. 4.

Таблица 4. Сравнение отношения активностей различных изотопов, измеренных в атмосфере Европы 20 марта 2011 г. и рассчитанных по данным [9]

Изотопы	Результаты измерений из [9]	Отношения активностей, рассчитанные по данным [9] на 20 марта 2011 г.	Модуль относительной ошибки, %
$^{134}\text{Cs} : ^{137}\text{Cs}$	0,874	0,868	0,69
$^{136}\text{Cs} : ^{137}\text{Cs}$	0,132	0,195	38,53
$^{132}\text{Te} : ^{137}\text{Cs}$	2,45	1,629	40,25
$^{129\text{m}}\text{Te} : ^{132}\text{Te}$	0,46	0,191	82,64
$^{89}\text{Sr} : ^{90}\text{Sr}$	11,2	8,844	23,51

Из представленных в табл. 4 данных видно, что точность расчета отношений активностей для ряда нуклидов с помощью кода СОКРАТ/ВЗ не хуже, чем в [9].

Заключение

Для улучшения точности оперативной оценки накопления изотопов в активной зоне РУ АЭС «Фукусима-1» в коде СОКРАТ/ВЗ был модифицирован модуль БОНУС. В работе приведен улучшенный алгоритм расчета активности изотопов цезия. Сравнение расчетов с другими расчетными кодами [7] показало хорошую точность вычислений. Код СОКРАТ/ВЗ применялся для оперативных расчетов накопления изотопов в активных зонах и бассейнах выдержки четырех блоков АЭС «Фукусима-1» сразу после аварии 11 марта 2011 г. Сравнение расчетных данных, полученных в марте 2011 г., с результатами измерений, представленных в [9], показало хорошую точность проделанных сразу после аварии расчетов активностей накопленных продуктов деления с помощью кода СОКРАТ/ВЗ.

Литература

1. Ермилов А. П., Зиборов А. М. Радиоактивные соотношения в топливной компоненте радиоактивных выпадений в ближней зоне ЧАЭС // Бюл. «Радиация и риск». — Вып. 3. — Москва; Обнинск, 1993. — С. 134—138.
2. Израэль Ю. А., Вакуловский С. М., Ветров В. А. и др. Чернобыль: радиоактивное загрязнение природных сред. — Л.: Гидрометеоздат, 1990. — 295 с.
3. Belyev S. T., Borovoy A. A., Demin V. F. et al. The Chernobyl source term // Proceedings of a seminar on comparative assessment of the environmental impact of radionuclides released during major nuclear accidents: Kyshtym, Windscale, Chernobyl. Luxemburg; EUR: Report EUR 13574. — [S. 1.], 1991. — P. 71—91.
4. Тарасов В. И. Моделирование диффузионного выхода радиоактивных продуктов деления из топлива UO_2 // Атом. энергия. — 2009. — Т. 106. — С. 319—328.
5. Аввакумов А. В., Киселев А. Е., Митенкова Е. Ф. и др. Верификация модуля БОНУС в составе интегрального кода СОКРАТ // Атом. энергия. — 2009. — Т. 106. — С. 250—257.
6. Киселев А. Е., Тарасов В. И., Цаун С. В. Верификация обновленного модуля расчета наработки продуктов деления в составе отраслевого кода СОКРАТ // Атом. энергия. — В печати.

7. Колобашкин В. М., Рубцов П. М., Ружанский П. А., Сидоренко В. Д. Радиационные характеристики облученного ядерного топлива: Справочник. — М.: Энергоатомиздат, 1983.
8. Руководящий документ «Сборки тепловыделяющие ядерных реакторов типа ВВЭР-1000. Типовая методика контроля герметичности оболочек тепловыделяющих элементов». — РД ЭО 0521-2004.
9. Kirchner G., Bossew P., De Cort M. Radioactivity from Fukushima Dai-ichi in air over Europe. — Pt. 2: What can it tell us about the accident? // J. of Environmental Radioactivity. — 2012. — doi:10.1016/j.jenvrad.2011.12.016.

Некоторые результаты по моделированию радиационной обстановки и оценке источника аварийного выброса на АЭС «Фукусима-1» с учетом трехмерных полей метеоданных

Р. В. Арутюнян, Р. И. Бакин, Л. А. Большов, Д. В. Дзама, Д. А. Припачкин, В. Н. Семенов, О. С. Сороковикова, А. Л. Фокин, С. В. Цаун, А. В. Шикин, Р. М. Вильфанд, Р. Ю. Игнатов*, К. Г. Рубинштейн*, М. М. Смирнова**

Введение

Произошедшее 11 марта 2011 г. землетрясение в Японии с эпицентром в Тихом океане привело к образованию цунами с высотой волны на побережье около 15 м. Волна стала причиной возникновения аварийной ситуации на целом ряде АЭС в Японии. При этом на АЭС «Фукусима-1» сложилась наиболее тяжелая обстановка. Развитие аварии на этой АЭС стало следствием сбоев в нормальной работе систем и барьеров безопасности, что привело к выбросу радиоактивных веществ в атмосферу, масштабы которых достаточно значимы и составляют десятки процентов от выбросов при аварии на Чернобыльской АЭС.

В соответствии с регламентом функционирования Технического кризисного центра (ТКЦ) ИБРАЭ РАН на основе соглашения о научно-технической поддержке Национального центра по управлению в кризисных ситуациях (НЦУКС) МЧС России и Ситуационно-кризисного центра (СКЦ) «Росатома» и по поручению Правительства РФ в ТКЦ ИБРАЭ РАН был организован круглосуточный всесторонний мониторинг обстановки, сложившейся вокруг аварийной АЭС «Фукусима-1». В процессе мониторинга в ТКЦ решался ряд задач аварийного реагирования: оценка и прогноз основных характеристик источников радиоактивных выбросов на АЭС «Фукусима-1», прогноз загрязнения окружающей среды с учетом данных радиационного мониторинга, оценка и прогноз доз облучения населения Японии и Дальнего Востока России, выработка рекомендаций по защите населения и объектов

* Сотрудники Гидрометцентра России.

окружающей среды, оценка эффективности защитных мероприятий и их оптимизация для конкретных условий с учетом радиологических, экономических и социальных условий. Кроме того, проводились анализ поступавшей информации о реальных данных измерений радиационной обстановки и корректировка на основе этих данных расчетных оценок интенсивности и нуклидного состава источников. Информацию о метеорологической ситуации обеспечивал ФГБУ «Гидрометцентр России» и НПО «Тайфун» Росгидромета.

При оценке мощности и состава выброса при аварии на АЭС «Фукусима-1» были использованы разработанные в ИБРАЭ РАН программные средства для моделирования переноса радиоактивных веществ как на аварийной АЭС, так и за ее пределами.

Для расчета выхода радионуклидов за пределы контура циркуляции на аварийной АЭС использовался аттестованный расчетный код СОКРАТ [1], адаптированный к условиям реактора типа BWR и бассейнов выдержки отработавшего ядерного топлива, учитывающий температурный режим и выход продуктов деления из топлива. Рассчитанный выброс радионуклидов в атмосферу содержит неопределенности, связанные с отсутствием достоверных данных по аварийным мерам управления на блоках № 1—4 АЭС «Фукусима-1». Эти неопределенности можно снять на основе моделирования распространения радионуклидов в атмосфере и сравнением с поступающими данными мониторинга радиационной ситуации.

Моделирование переноса радиоактивных веществ в атмосфере проводилось на основе современной лагранжевой стохастической модели дисперсии радионуклидов в атмосфере [2; 3]. Модель позволяет рассчитывать распространение, выпадение радионуклидов от источника произвольного нуклидного состава с учетом цепочек распада в соответствующих метеорологических условиях. Она входит как составная часть в программное средство (ПС) НОСТРАДАМУС, разработанное в ИБРАЭ РАН, верифицированное на международных экспериментах [2] и аттестованное [3] для моделирования переноса радиоактивных веществ в атмосфере и оценки радиационных последствий для населения. Моделирование радиационной обстановки и оценка источника на территории выполнялась с помощью расчетного кода НОСТРАДАМУС. В расчетах учитывалась динамика метеоусловий над территорией Японии. Изменение атмосферных условий воспроизводилось с помощью региональной гидродинамической модели WRF-ARW: Weather (погода), Research (исследование), Forecast (прогноз) (США) с пространственным разрешением 10 км [4].

Данные радиационного мониторинга показали, что основное радиоактивное загрязнение территории Японии произошло в течение 15 марта. В остальное время радиоактивное облако сносилось ветром главным образом в направлении Тихого океана.

Основной задачей данной статьи является оценка источника аварийных выбросов на основе моделирования переноса радиоактивных веществ, выброшенных в атмосферу в течение 15 марта 2011 г. при аварии на АЭС «Фукусима-1».

Подготовка метеорологических данных для моделирования распространения выбросов радиоактивных веществ в атмосферу при аварии на АЭС «Фукусима-1» над территорией Японии

В связи с аварией на АЭС «Фукусима-1» в Гидрометцентре России была создана система гидродинамического прогноза метеорологических полей для территории Японии и Дальнего Востока России. В рамках данной работы для прогноза метеорологических полей была создана конфигурация региональной негидростатической гидродинамической модели WRF-ARW с пространственным разрешением 10 км. Эта модель свободно распространяется через Интернет, достаточно хорошо описана и внедрена в Гидрометцентре России для решения большого числа прикладных метеорологических задач и оперативной работы. На рис. 1 представлена область моделирования и орография местности, которые использовались в прогнозах модели WRF-ARW.

Это область ограничивается координатами 130—151° в. д., 32 29° с. ш. и несколько меньше области расчетов для уменьшения влияния граничных условий. По вертикали атмосфера была разбита на 40 слоев, из них около 15 слоев в планетарном пограничном слое. Шаг по времени составлял 1 мин. Частота выдачи метеорологических полей для расчета с помощью кода НОСТРАДАМУС варьировалась от 1 ч до 10 мин.

В качестве начальных данных использовался анализ, а для граничных условий — прогноз NCEP (Национального центра прогнозирования поведения окружающей среды, США) с пространственным разрешением 0,5° по горизонтали, 27 уровней по вертикали с временным шагом 6 ч. Кроме орографии в расчетах учитывался тип подстилающей поверхности (океан и типы подстилающей поверхности на суше).

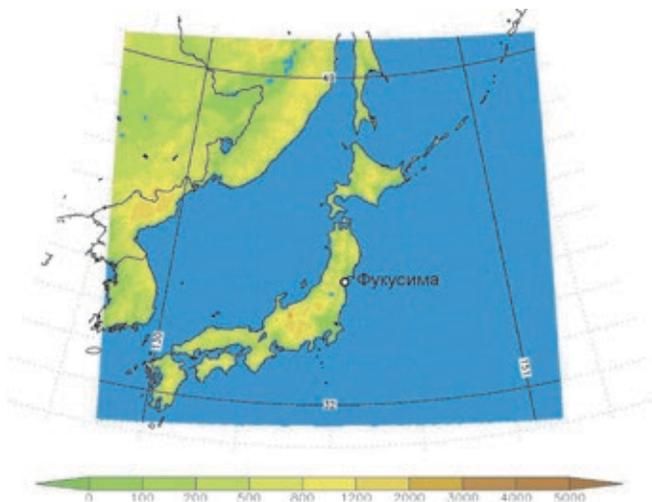


Рис. 1. Область прогнозирования для территории Японии и Дальнего Востока России и ее орография

Расчеты для территории Японии и Дальнего Востока России проводились два раза в сутки — в 0 и 12 часов среднего времени по Гринвичу (СГВ).

Анализ результатов локальных прогнозов атмосферных условий в точке с координатами АЭС «Фукусима-1» основе использования модели WRF-ARW

В оперативном режиме сразу после взрыва на АЭС в предварительных прогнозах для оценки переноса радиоактивных веществ с помощью ПС НОСТРА-ДАМУС были использованы расчеты по модели WRF-ARW, интерполированные в точку с координатами АЭС «Фукусима-1». Даты и время прогнозов соответствуют данным табл. 1, в которой приведены основные события на АЭС с 11 по 16 марта 2011 г.

На основе прогностических данных по вертикальному градиенту температуры на высотах 2—300 м и данных о ветре были оценены классы устойчивости. Для этого была использована методика оценки класса устойчивости по типовым значениям разности температур и ветра [5]. Вертикальный профиль температуры и векторы скорости ветра приведены на рис. 2 и 3.

Таблица 1. Хронология событий на АЭС «Фукусима-1» с 12 по 16 марта

Номер события	Блок	Дата и время (по Японии)	Событие	Примечание
1	1	12 марта, 15:36	Взрыв	Возможен барботаж
2	3	14 марта, 11:01	Взрыв	Возможен барботаж
3	2	15 марта, 06:10	Взрыв	Возможен прямой выход
4	4	15 марта, 06:00	Взрыв	Возможен прямой выход
5	2	15 марта, 08:25	Белый дым	Источник неизвестен
6	4	15 марта, 09:38	Пожар	Прямой выход
7	4	16 марта, 05:45	Пожар	Прямой выход
8	3	16 марта, 08:34	Белый дым	Источник неизвестен
9	3	16 марта, 10:00	Белый дым	Источник неизвестен

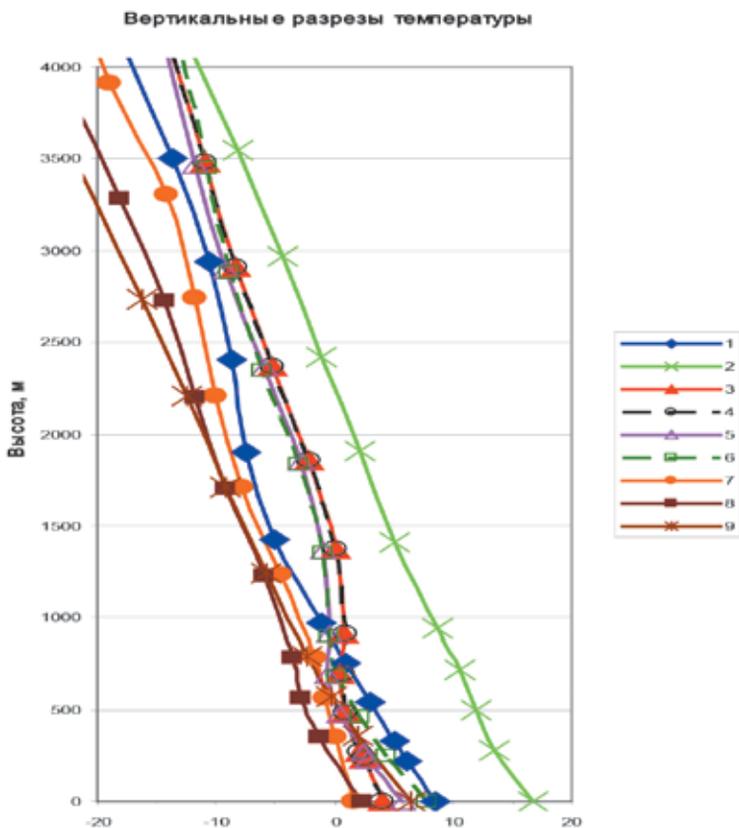


Рис. 2. Вертикальные профили прогностических температур воздуха в точке с координатами АЭС «Фукусима-1» с 11 по 16 марта 2011 г.

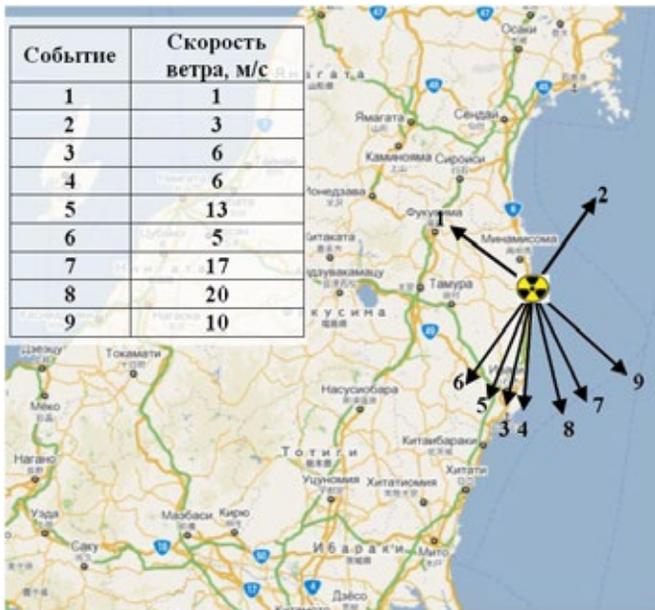


Рис. 3. Направления и скорости прогностического ветра в точке с координатами АЭС «Фукусима-1» с 11 по 16 марта 2011 г.

Можно видеть, что в случаях событий 1—4 и 6 направление ветра было крайне переменчивым. На графиках вертикальных профилей температуры можно видеть, что за это время наблюдались и значительные изменения приземной температуры (от 0°C до 18°C). На основе грубых локальных оценок погодных условий были проведены расчеты по предварительному прогнозу радиационной обстановки, возможному загрязнению территории Японии в консервативном предположении, что все вышедшие из топлива продукты деления попали в атмосферу. Метеорологическая ситуация в эти дни была очень сложной, изменчивой. Предварительный прогноз переноса радионуклидов на основе локальной атмосферной ситуации показал, что возможно радиационное загрязнение территории Японии к югу от АЭС «Фукусима-1» и к северо-западу. Таким образом, на основе предварительного анализа метеорологических данных в районе АЭС «Фукусима-1» были установлены основные направления возможного распространения выбросов на АЭС, соответствующих событиям, представленным в табл. 1.

Эта информация была подтверждена данными радиационного мониторинга. Образовался радиационный след в направлении на юг и северо-запад. Но

датчики показали, что основные выпадения на территории Японии произошли в течение 15 марта. В этот день по предварительному прогнозу модели WRF-ARW ветер, соответствующий сформировавшемуся северо-западному следу, не наблюдался.

Для повышения точности оценки движения газоаэрозольных облаков и учета особенностей местности были использованы детальные дополнительные прогнозы метеорологических полей с 11 по 18 марта 2011 г. С 11 по 26 марта 2011 г. над районом АЭС «Фукусима-1» преобладал главным образом перенос воздушных масс на восток, и радиоактивные продукты сносились в основном в Тихий океан. Однако были интервалы, когда ветер менял направление и дул в сторону территории Японии.

В течение 11 марта преобладал западный слабый ветер. 12 марта наблюдался практически штиль. Направление ветра в течение этих суток менялось то в сторону моря, то в сторону суши. Первую половину суток 13 марта над АЭС восстановился западный перенос, однако после 12 часов ветер снова ослабел и подул в сторону суши. К 0 часам 14 марта западный перенос восстановился и продержался до 12 часов. Затем ветер ослабел, к 15 марта повернул на юг и подул в сторону суши. При этом 15 марта в связи с подходом с юго-запада циклона начались интенсивные дожди. Это в сочетании с ветром в сторону суши могло быть крайне неблагоприятно, так как способствовало осаднению с дождем радиоактивных продуктов на суше. Перенос в сторону моря восстановился только к 20 часам 15 марта. Далее вплоть до 20 марта над АЭС дул умеренный западный ветер. При этом возможные выбросы радиоактивных веществ выносились в сторону Тихого океана.

Проведено сравнение прогностических полей ветра, полученных по описанной выше версии WRF-ARW с разрешением 10 км с анализом NCEP, на те же моменты времени с разрешением около 50 км. Некоторые результаты этого сравнения приведены на рис. 4—6, где представлены поля ветра на высоте 10 м 15 марта в 0, 6 и 12 часов СГВ. Видно, что в некоторые моменты поля ветра по обеим моделям близки. Но в модели NCEP нет имевшего место юго-восточного ветра, сформировавшего след загрязнения 15 марта в северо-западном направлении от АЭС «Фукусима-1».

В модельных результатах юго-восточный ветер стал проявляться явно. Это связано не только с увеличением пространственного разрешения, но и с тем, что была использована процедура замешивания данных синоптических и аэрологических станций в расчетную сетку на момент анализа «3dvar».

С 15 марта в связи с подходом с юго-запада циклона начались интенсивные дожди. Некоторые карты прогностических осадков приведены на рис. 7.

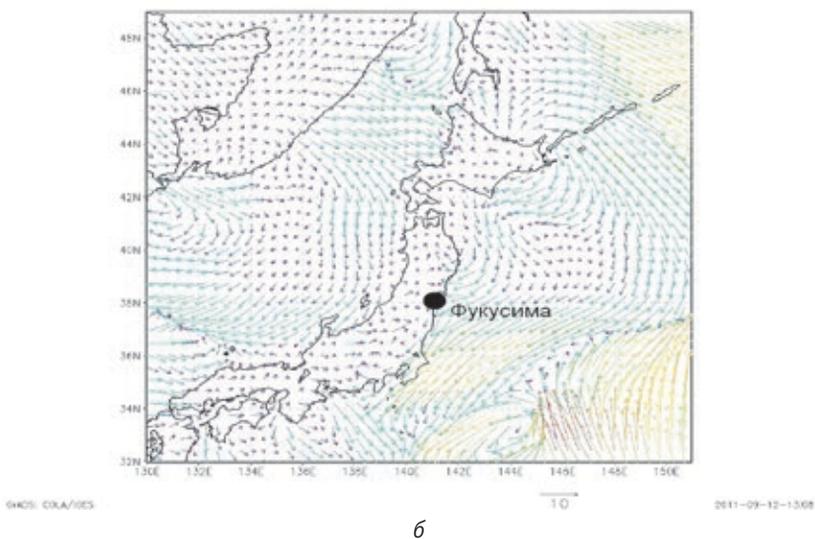
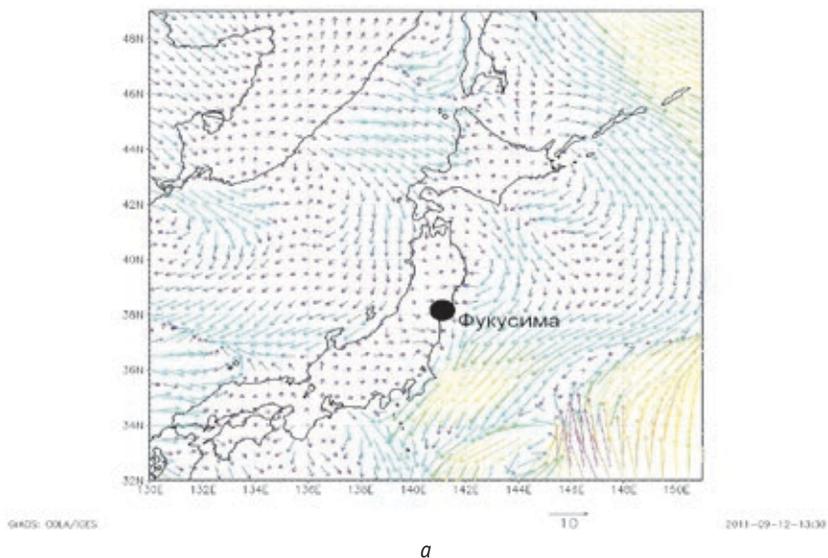
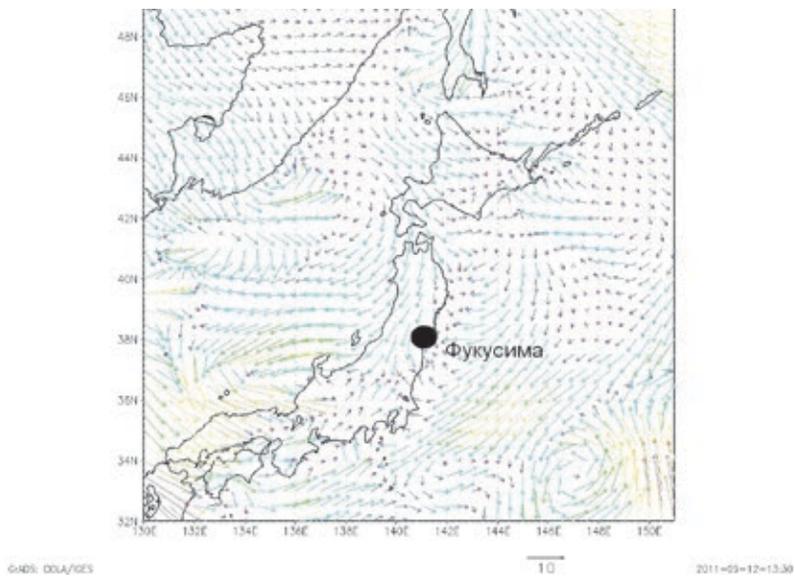
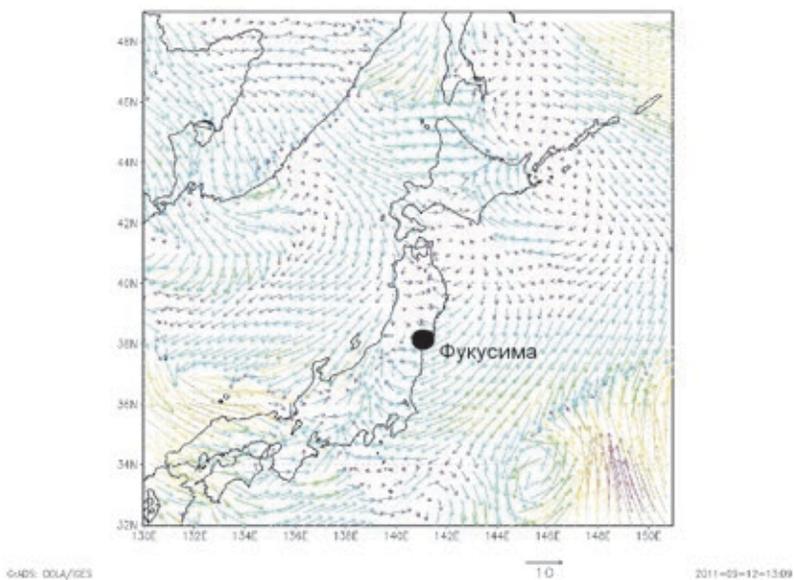


Рис. 4. Карты ветра на высоте 10 м за 0 часов 15 марта 2011 г. (СГВ) из анализа NCEP (а) с разрешением 50 км и прогноза по WRF (б) с разрешением 10 км

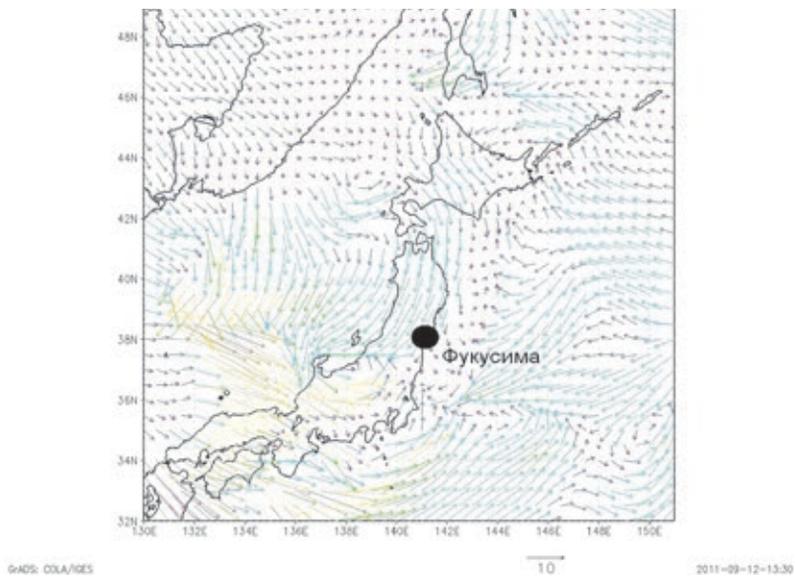


а

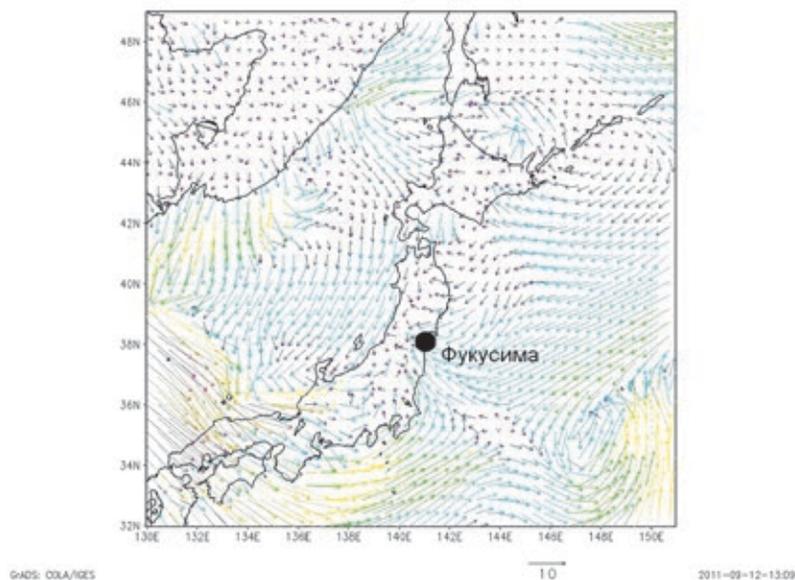


б

Рис. 5. Карты ветра на высоте 10 м за 6 часов 15 марта 2011 г. (СГВ) из анализа NCEP (а) с разрешением 50 км и прогноза по WRF (б) с разрешением 10 км



а



б

Рис. 6. Карты ветра на высоте 10 м за 12 часов 15 марта 2011 г. (СГВ) из анализа NCEP (а) с разрешением 50 км и прогноза по WRF (б) с разрешением 10 км

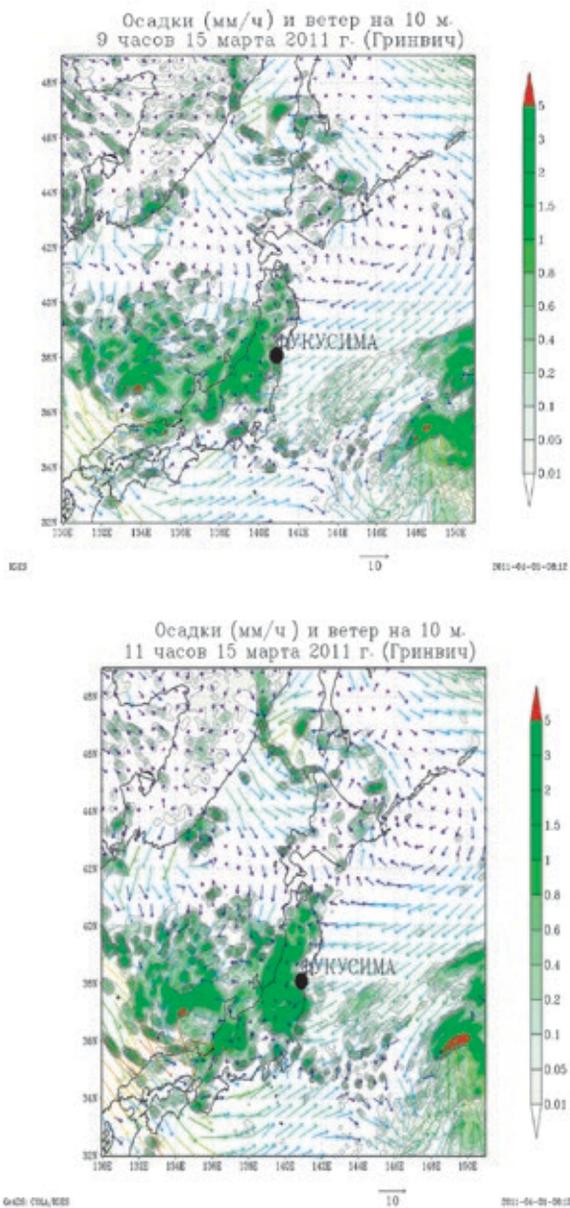


Рис. 7. Карты прогностических осадков над Японией в 9 и 11 часов 15 марта 2011 г. (СГВ)

Сопоставление результатов моделирования с данными мониторинга радиационной обстановки, результатами аэрогаммасъемки и оценкой выпадений в районах расположения точек контроля

По данным мониторинга радиационной обстановки, на территории Японии до 15 марта 2011 г. существенного превышения радиационного фона за пределами промплощадки АЭС «Фукусима-1» не зарегистрировано. Исключение составляют данные о превышении радиационного фона на территории АЭС «Онагава» (по данным NISA, Япония). Однако из-за того, что нет достоверных данных о динамике мощности дозы на промплощадке АЭС «Онагава», можно утверждать, что территория Японии до 15 марта не подвергалась существенному радиационному загрязнению за пределами промплощадки АЭС «Фукусима-1». В течение 15 марта датчики мониторинга радиационной обстановки зарегистрировали значительное превышение радиационного фона в префектурах Фукусима, Ибараки, Канагава и в ряде других префектур.

При этом на аварийной АЭС в период с 00:00 до 10:00 за 15 марта 2011 г. были зарегистрированы следующие события:

00:00 — начало вентилирования на блоке № 2;

05:45 — замечено возгорание на блоке № 4;

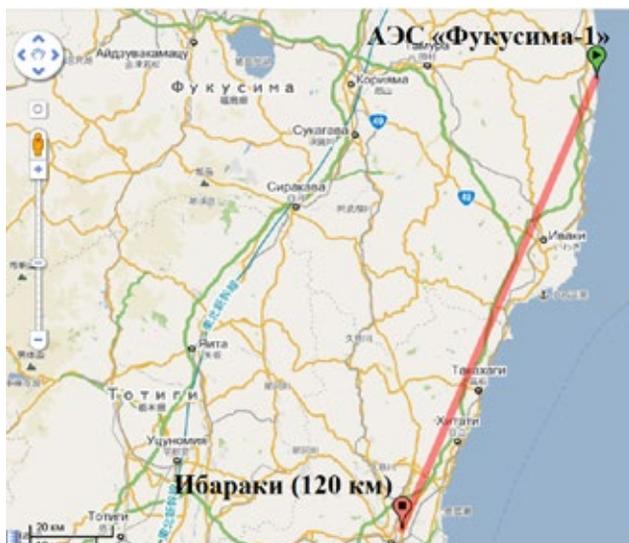
06:00 — громкий звук внутри защитной оболочки на блоке № 2;

09:40 — потушен пожар на блоке № 4.

Кроме того, установлено, что на датчиках мониторинга радиационной обстановки (рис. 8) на промплощадке АЭС «Фукусима-2», расположенной в 12 км к югу от АЭС «Фукусима-1», мощность дозы в 04:00 15 марта составляла 145 мкЗв/ч, а на датчиках в префектуре Ибараки на расстоянии 120 км к юго-западу от АЭС «Фукусима-1» мощность дозы в 7:00 15 марта составляла 4,2 мкЗв/ч.

На рис. 9 представлена динамика изменения мощности дозы за 15 марта 2011 г. на промплощадке АЭС «Фукусима-2» и в префектуре Ибараки. При этом можно констатировать, что наблюдалось преимущественно южное направление распространения выброса в первой половине дня 15 марта.

Некоторые результаты по моделированию радиационной обстановки и оценке источника аварийного выброса на АЭС «Фукусима-1» с учетом трехмерных полей метеоданных



а



б

Рис. 8. Расположение точек мониторинга радиационной обстановки

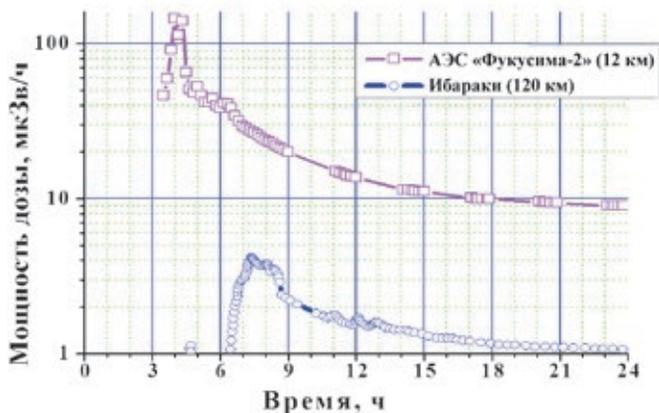


Рис. 9. Показания датчиков мониторинга радиационной обстановки

Сопоставление показаний датчиков мониторинга радиационной обстановки за 15 марта с хронологией событий на АЭС за тот же период позволяет с высокой долей вероятности утверждать, что поступление в окружающую среду радионуклидов может быть обусловлено событиями на АЭС, связанными с выбросом на блоке № 2 и возгоранием на блоке № 4.

Результаты моделирования с разными вариантами предположений о выходе в атмосферу продуктов деления и сопоставление их с данными мониторинга позволили предположить, что в ночное и утреннее время 15 марта в окружающую среду поступило 5—6% радиоактивных благородных газов, 0,5% йода и 0,3% цезия от топлива, находящегося в реакторе блока № 2 и в здании блока № 4. Аварийный источник, вероятнее всего, определяется радионуклидами из газового зазора твэлов на блоке № 2 и воздушного объема помещений на блоке № 4. Однозначного ответа относительно причин происхождения радионуклидов в выбросе из здания блока № 4 пока нет, однако существуют версии, что радионуклиды, поступившие в атмосферу при частичном разрушении здания блока № 4, попали в воздушный объем помещений блока № 4 при вентилировании блока № 3 [6]. Использованный для расчетов нуклидный состав источника выброса приведен в табл. 2.

На основе подробных данных о состоянии атмосферы ночью и утром 15 марта с учетом полей скорости ветра в слое до 2—3 км были выполнены расчеты мощности дозы в точках мониторинга с помощью модели из ПС НОСТРАДАМУС. Существенную неопределенность в результаты расчетов наряду с погодными условиями вносит оценка высоты выброса.

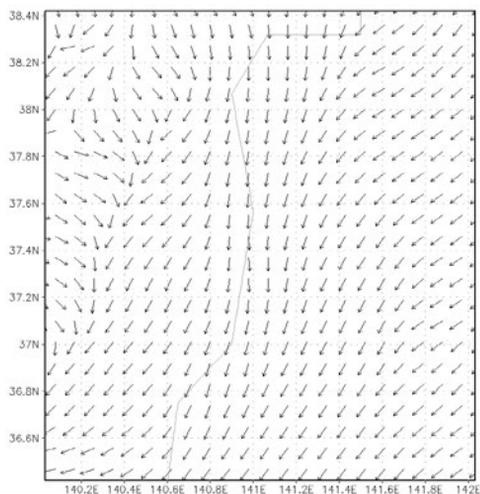
Таблица 2. Выброс в окружающую среду в первой половине дня 15 марта

Нуклид	Выход, Бк
⁸⁵ Kr	$2,7 \cdot 10^{15}$
¹³³ Xe	$1,7 \cdot 10^{17}$
¹³⁵ Xe	$2,3 \cdot 10^{15}$
¹³¹ I	$7,5 \cdot 10^{15}$
¹³² I	$8,0 \cdot 10^{15}$
¹³³ I	$1,7 \cdot 10^{15}$
¹³² Te	$7,8 \cdot 10^{14}$
¹³⁴ Cs	$2,2 \cdot 10^{15}$
¹³⁷ Cs	$1,4 \cdot 10^{15}$

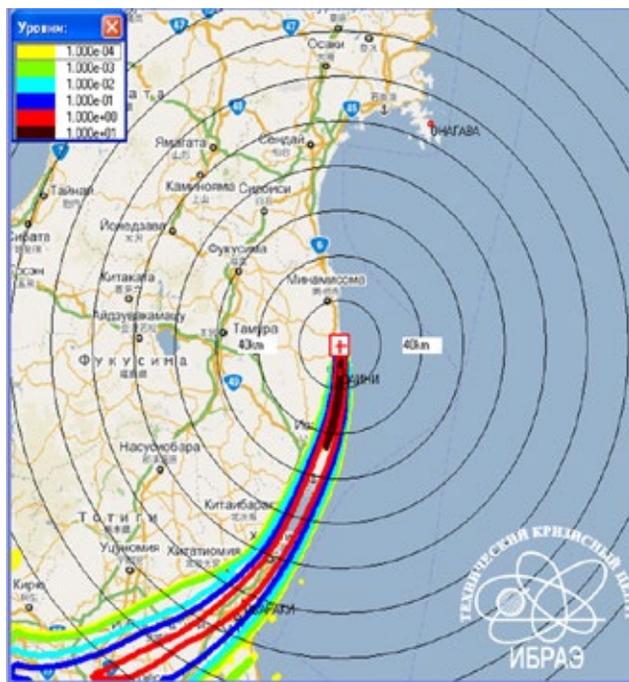
Как известно, высота выброса складывается из высоты точки фактического выброса над уровнем земли и дополнительного теплового подъема над этой точкой. Высота точки фактического выброса определяется на основе предположений о технологических процессах внутри зданий блоков АЭС. На формирование же теплового подъема струи выброса влияют как скоростной напор, так и температура выбрасываемых веществ [7]. При этом неопределенности факторов, влияющих на оценку высоты выброса, приводят к использованию экспертного подхода к оценке высоты выброса, основанного на разбиении выбросов по высотным диапазонам. Использованный здесь подход к оценке высоты выбросов на АЭС «Фукусима-1» близок к описанному в [8]. Для снижения неопределенностей необходим дополнительный многофакторный анализ. В наших расчетах предполагалось следующее:

- высота выброса может варьироваться от 50 до 100 м при возможном взрыве водорода на блоке № 2 (принята высота выброса 50 м) и от 200 до 300 м при возможном пожаре на блоке № 4 (принята высота выброса 200 м);
- выброс при взрыве водорода распределен во времени — 10% суммарной активности выброса в течение 1—2 мин и 90% в течение 60 мин;
- длительность выброса при пожаре — 4 ч (240 мин);
- скорость сухого осаждения для аэрозольных частиц (цезий) предполагалась равной 0,8 см/с, для изотопов йода — 2 см/с.

На рис. 10 приведены поле приземного ветра 15 марта в 06:00 (по Японии) в районе аварийной АЭС, показания датчиков мониторинга радиационной обстановки на АЭС «Фукусима-2» и в префектуре Ибараки, а также мощность дозы (мкЗв/ч) от поверхности земли после прохождения радиоактивного облака.



а



б

Рис. 10. Поле приземного ветра (а), мощность дозы на территории Японии (б) 15 марта 2011 г. (первая половина дня)

Анализ результатов моделирования показал, что в районе площадки АЭС «Фукусима-2» мощность дозы после прохождения облака составляла 10—20 мкЗв/ч, а в префектуре Ибараки — 1—2 мкЗв/ч. Это соответствует уровню мощности дозы, измеренной датчиками мониторинга радиационной обстановки в данных точках контроля. На рис. 11 и 12 представлены результаты расчета мощности дозы с помощью ПС НОСТРАДАМУС и измерений мощности дозы на промплощадке АЭС «Фукусима-2» и в префектуре Ибараки.

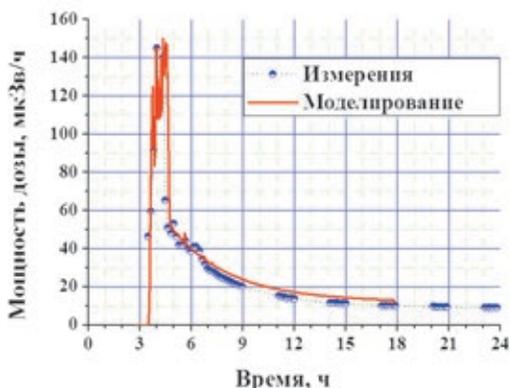


Рис. 11. Мощность дозы на промплощадке АЭС «Фукусима-2»

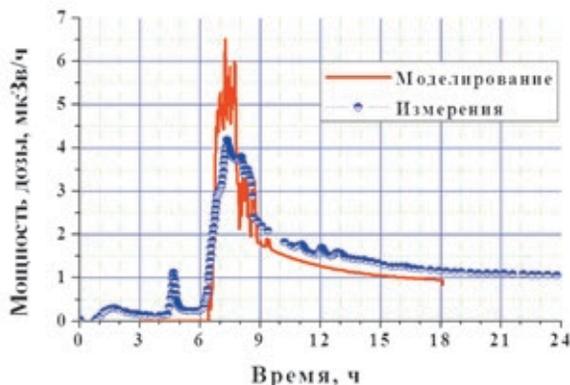


Рис. 12. Мощность дозы в префектуре Ибараки

Из рис. 11 и 12 следует, что результаты расчета мощности дозы в точках контроля практически совпадают с измерениями. При этом видно, что расчетное время прихода радиоактивного облака в точки контроля в точности соответствует времени, когда был зарегистрирован существенный рост мощности дозы. Результаты расчета мощности дозы для площадки АЭС «Фукусима-2» лучше совпадают с измерениями, чем в префектуре Ибараки. Это может быть связано с особенностями поведения физико-химических форм йода и цезия в атмосфере. В моделях, используемых в наших расчетах, не учитывается эволюция физико-химических форм соединений йода и цезия. Как известно, превращение одного типа соединения в другое носит химический характер, а время протекания таких реакций достаточно велико (десяtkи минут). Поэтому предположение о неизменности физико-химических форм соединений йода и цезия справедливо только на таких расстояниях от источника выброса, для которых время доставки облака меньше времени изменения физико-химической формы. Следовательно, чем дальше точка контроля от источника выброса, тем больше величина ошибки при прогнозировании мощности дозы.

Кроме подтвержденных событийно выбросов в первой половине 15 марта (см. табл. 1) результаты измерений радиационной обстановки и анализ состояния атмосферы показывают, что на аварийной АЭС «Фукусима-1» были выбросы и во второй половине 15 марта, причем количество радиоактивных веществ, выброшенное в атмосферу, существенно превосходило выброс в первой половине дня. Причем официально не сообщалось о каких-либо происшествиях на АЭС в данный период. Возможно, это связано с частичной или полной эвакуацией персонала АЭС из-за существенного ухудшения радиационной обстановки на ее территории. Ухудшение радиационной обстановки подтверждается измерениями мощности дозы на промплощадке аварийной АЭС. К этому времени также относятся заявления об эвакуации персонала, масштаб которой неизвестен (по данным ТЕРСО, Япония). По анализу полей приземного ветра можно видеть, что во второй половине дня 15 марта после 12:00 преимущественное направление ветра у земли поменялось на северо-западное. В этом направлении от АЭС стационарных датчиков контроля радиационной обстановки нет (по данным МЕХТ, Япония). Поэтому долгое время (в течение 2—3 сут) не было достоверных данных о прохождении радиационного облака и формировании выпадений на поверхность земли в этом направлении. Ближайшей точкой, где проводился непрерывный мониторинг с 12:00 15 марта с повторяемостью два раза в час, был город Фукусима, расположенный в 60 км к северо-западу от АЭС

«Фукусима-1». Данные о мощности дозы в остальных точках мониторинга появлялись позже с повторяемостью раз в сутки. Поскольку информации о мощности дозы во время выбросов радиоактивных веществ и переноса их в северо-западном направлении от АЭС было недостаточно, для оценки источника выброса за вторую половину дня 15 марта использовался спад мощности дозы в точках мониторинга радиационной обстановки. В качестве опорных точек были выбраны: точка контроля № 32, расположенная на расстоянии 30 км от АЭС на оси северо-западного следа и точка контроля в городе Фукусима. Кроме того, было проведено сравнение расчетных значений мощности дозы в опорных точках контроля радиационной обстановки с измерениями мощности дозы с помощью аэрогаммасъемки местности (по данным Министерства энергетики США) [9].

По нашим оценкам, во второй половине дня 15 марта в окружающую среду в северо-западном направлении было выброшено не более 10—15% радиоактивных благородных газов, йода, теллура и цезия от находящегося в топливе реактора № 2 (табл. 3). Официально подтверждается разрушение мокрой части контейнента на блоке № 2 (данные JAIF, Япония). Поэтому на выход йода и цезия за пределы блока оказывала влияние только динамика температуры топлива, к этому моменту времени оболочки твэлов полностью потеряли герметичность, дополнительной задержки в защитной оболочке реактора № 2 не было.

Таблица 3. Выброс в окружающую среду во второй половине дня 15 марта

Нуклид	Выход, Бк
^{85}Kr	$3,7 \cdot 10^{15}$
^{133}Xe	$2,4 \cdot 10^{17}$
^{135}Xe	$3,3 \cdot 10^{15}$
^{131}I	$1,8 \cdot 10^{17}$
^{132}I	$2 \cdot 10^{17}$
^{133}I	$3 \cdot 10^{17}$
^{132}Te	$1,3 \cdot 10^{17}$
^{134}Cs	$4,8 \cdot 10^{16}$
^{137}Cs	$2,9 \cdot 10^{16}$

При моделировании распространения выброса в атмосфере с помощью ПС НОСТРАДАМУС предполагалось, что длительность выброса составляла 3 ч (180 мин). Из-за неопределенностей с целостностью здания блока высота выброса варьируется от 20 до 100 м. Анализ полей приземных скоростей ветра показал, что основной выброс для формирования радиационной обстановки, подтвержденной результатами измерений, должен был про-

изойти 15 марта не раньше 15:00 и не позднее 18:00. В противном случае распространение радиоактивных веществ в северо-западном направлении от АЭС было бы невозможно по атмосферным условиям. При этом предполагалось, что выброс распределен по времени — 50% суммарной активности выброса в течение 2 ч и 50% в течение последующих 60 мин.

При моделировании с помощью ПС НОСТРАДАМУС распространения выброса в атмосфере во второй половине дня 15 марта предполагалось следующее:

- высота выброса — 50 м;
- длительность выброса — около 3 ч (180 мин);
- скорость сухого осаждения для аэрозольных частиц (цезия) — 0,8 см/с, для изотопов йода — 2 см/с.

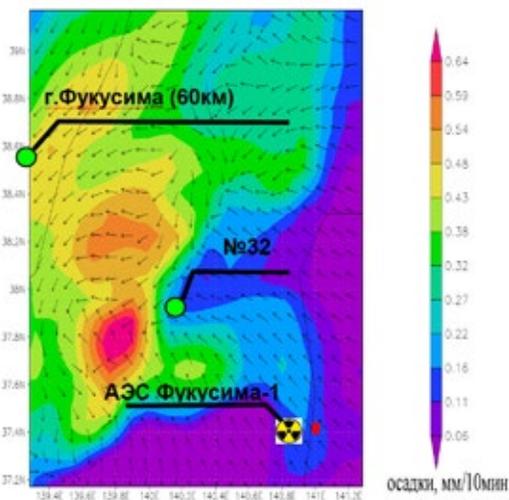
На рис. 13 показано поле приземного ветра 15 марта в 16:00 (по Японии) в северо-западном направлении от аварийной АЭС, около города Фукусима и точки № 32, а также представлена мощность дозы (мкЗв/ч) от поверхности земли после прохождения радиоактивного облака.

Анализ результатов моделирования показал, что в точке № 32 мощность дозы после прохождения облака составляла 170 мкЗв/ч, а через 24 ч — 160 мкЗв/ч. В районе города Фукусима мощность дозы после прохождения облака составляла 8 мкЗв/ч, а через 24 ч — 7,5 мкЗв/ч. Это соответствует уровню мощности дозы измеренной датчиками мониторинга радиационной обстановки в данных точках контроля. На рис. 14 и 15 представлены результаты расчета мощности дозы с помощью ПС НОСТРАДАМУС и измерений мощности дозы в точке № 32 и в городе Фукусима за 20 дней с 15 марта по 3 апреля.

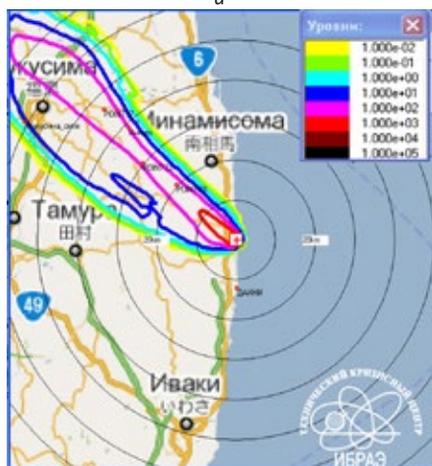
Из рис. 14 и 15 следует, что результаты расчета мощности дозы с помощью ПС НОСТРАДАМУС в пределах порядка величины совпадают с данными измерений мощности дозы в контрольных точках (по данным МЕХТ) и измерениями, полученными при аэрогаммасъемке местности (по данным Министерства энергетики США). Если в течение первых суток результаты расчета отличаются от измерений в два-три раза, то к 20-м суткам (т. е. к 3—4 апреля) разница не превышала 5—20%. Это свидетельствует о том, что источник недооценен по короткоживущим нуклидам.

При этом недооценка не влияет на радиационную обстановку в долгосрочной перспективе, а с учетом неопределенностей в радионуклидном составе выброса можно считать, что результаты расчета с помощью ПС НОСТРАДАМУС приемлемы для оценки источника выброса. В долгосрочной перспективе радиационная обстановка на территории Японии, загрязненной вслед-

ствии аварии на АЭС «Фукусима-1», будет определяться нуклидами цезия. Об уровне выпадений цезия можно судить по мощности дозы после распада короткоживущих нуклидов (через 30—40 сут после выброса).



а



б

Рис. 13. Поле приземного ветра с осадками (а), мощность дозы на территории Японии (б) 15 марта 2011 г. (вторая половина дня)

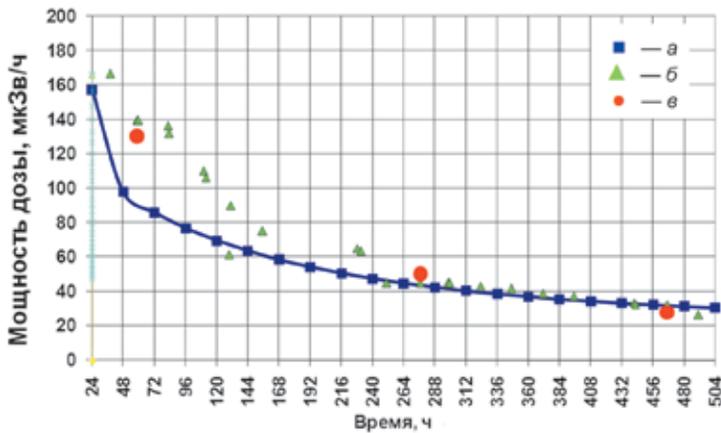


Рис. 14. Мощность дозы в точке № 32. Расчет с помощью ПО НОСТРАДАМУС (а), измерение по данным МЕХТ (б), результаты аэрогаммасымки, данные Министерства энергетики США (в)

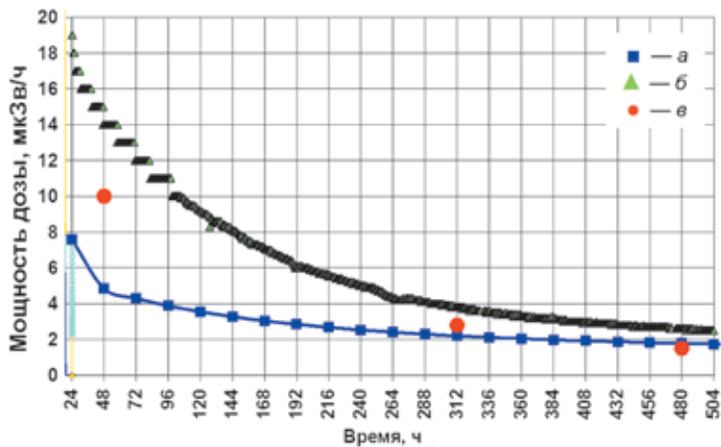


Рис. 15. Мощность дозы в городе Фукусима. Расчет с помощью ПО НОСТРАДАМУС (а), измерение по данным МЕХТ (б), результаты аэрогаммасымки, данные Министерства энергетики США (в)

Для подтверждения полученной нами оценки аварийного выброса кроме сравнения результатов моделирования с данными измерений мощности дозы были выполнены расчеты выпадений ^{137}Cs в районах размещения точек контроля радиационной обстановки. В табл. 4 представлены результаты расчетов выпадений ^{137}Cs , полученные с помощью ПО НОСТРАДАМУС, осно-

ванные на измерениях мощности дозы по данным МЕХТ и оценки выпадений ^{137}Cs по данным Министерства энергетики США. Сравнение результатов расчета выпадений ^{137}Cs показывает, что оценки совпадают по порядку величины во всех точках контроля, расположенных как на южном, так и на северо-западном следе. При этом отклонение результатов моделирования от расчетов по данным мониторинга варьируется от 15% до 40%. Это свидетельствует об удовлетворительной оценке источника выбросов за 15 марта и адекватном моделировании процессов атмосферного переноса примесей за этот период.

Таблица 4. Выпадения ^{137}Cs вблизи точек контроля радиационной обстановки, Ки/км²

Точка контроля	НОСТРАДАМУС	МЕХТ, Япония	Министерство энергетики США
АЭС «Фукусима-2»	11	13	12
Префектура Ибараки	3	1,3	<8
Точка № 32	102	173	120
Город Фукусима	6	9	12
Деревня Иитате	50	30	54
Точка № 83	200	300	450

Заключение

В статье приведены оценки источников аварийных выбросов, происшедших в течение 15 марта 2011 г. на АЭС «Фукусима-1». На основе моделирования переноса радиоактивных веществ в атмосфере с учетом реальных атмосферных условий получены оценки мощности дозы в точках контроля радиационной обстановки. При этом расчетные значения мощности дозы отличаются от результатов аэрогаммасъемки не более чем в два раза. При тех уровнях неопределенностей, которые возникают при измерениях мощности дозы, можно считать, что расчетные значения хорошо совпадают с результатами аэрогаммасъемки. Кроме измерений мощности дозы была проведена оценка выпадений ^{137}Cs вблизи некоторых точек контроля радиационной обстановки. Показано, что выпадения ^{137}Cs , рассчитанные по результатам моделирования, отличаются от данных мониторинговых служб не более чем на 40%. По нашим оценкам, за 15 марта 2011 г. в атмосферу было выброшено примерно $4 \cdot 10^{17}$ Бк радионуклидов йода, $1 \cdot 10^{17}$ Бк цезия, $4 \cdot 10^{17}$ Бк радиоактивных благородных газов. В табл. 5 приведены выбросы ^{131}I и ^{137}Cs в атмосферу по нашим оценкам за 15 марта, по оценкам NISA, NSC

(Япония) на 12 апреля и IRSN (Франция) на 22 марта, а также выбросы при аварии на Чернобыльской АЭС.

Таблица 5. Оценки выбросов ^{131}I и ^{137}Cs в атмосферу

Нуклид	Выброс за 15 марта	NISA	NSC	IRSN	Чернобыльская АЭС
^{131}I	$2 \cdot 10^{17}$	$1,3 \cdot 10^{17}$	$1,5 \cdot 10^{17}$	$9 \cdot 10^{16}$	$1,8 \cdot 10^{18}$
^{137}Cs	$3 \cdot 10^{16}$	$0,6 \cdot 10^{16}$	$1,2 \cdot 10^{16}$	$1 \cdot 10^{16}$	$8,5 \cdot 10^{16}$
Всего	$1,4 \cdot 10^{18}$	$3,7 \cdot 10^{17}$	$6,3 \cdot 10^{17}$	$4,9 \cdot 10^{17}$	$5,2 \cdot 10^{18}$

Наша оценка выброса за 15 марта превышает оценки NISA и NSC в два раза и оценку IRSN в три раза. Оценка выброса по ^{131}I составляет примерно 11% и по ^{137}Cs примерно 35% выброса при аварии на Чернобыльской АЭС. При этом оценки NISA, NSC, IRSN и наша оценка выброса соответствуют уровню 7 по Международной шкале ядерных событий (INES). Таким образом, предложенные нами оценки источников аварийных выбросов в атмосферу в течение 15 марта 2011 г. вследствие серии аварий на энергоблоках АЭС «Фукусима-1» в целом соответствуют реально складывающейся радиационной обстановке. Это подтверждается результатами моделирования, данными измерений мощности дозы, результатами аэрогаммасъемки и оценками выпадений ^{137}Cs на основе данных мониторинговых служб.

Литература

1. Аттестационный паспорт программного средства СОКРАТ (для моделирования внутрикорпусной стадии запроектных аварий на реакторных установках с водой под давлением) / Федеральный надзор России по ядерной и радиационной безопасности. — Регистр. номер паспорта аттестации 275 от 13.05.2010.
2. Моделирование распространения радионуклидов в окружающей среде: Труды ИБРАЭ РАН / Под ред. А. Л. Большова. — Вып. 9. — М.: Наука, 2008. — 229 с.
3. Аттестационный паспорт программного средства НОСТРАДАМУС / Федеральный надзор России по ядерной и радиационной безопасности. — Регистр. номер паспорта аттестации 158 от 28.03.2003.
4. Skamarock W. C., Klemp J. B., Dudhia J. et al. A Description of the Advanced Research WRF Version 3. NCAR/TN-475+STR / National Center for Atmospheric Research. — Boulder, CO, 2008.

5. Атмосфера: Справочник. — Л.: Гидрометеиздат, 1991. — С. 184.
6. Special Report on the Nuclear Accident at the Fukushima Daiichi Nuclear Power Station / Inst. of Nuclear Power Operations. — [S. l.], 2011.
7. Гусев Н. Г., Беляев В. А. Радиоактивные выбросы в биосфере. — М.: Энергоатомиздат, 1991. — С. 68.
8. Stohl A. et al. Xenon-133 and caesium-137 releases into the atmosphere from the Fukushima Daiichi nuclear power plant: determination of the source term, atmospheric dispersion, and deposition // Atmos. Chem. Phys. Discuss. — 2011. — 11. — P. 28319—28394.
9. <http://nnsa.energy.gov/mediaroom/pressreleases/fukushimadata>.

Анализ зависимости возможных социально-экономических последствий аварии на АЭС «Фукусима-1» от критериев вмешательства

*Д. В. Арон, Р. В. Арутюнян, Л. А. Большой, С. В. Панченко,
Д. Н. Токарчук*

Произошедшее 11 марта 2011 г. землетрясение в Японии с эпицентром в Тихом океане привело к образованию цунами с высотой волны на побережье около 15 м. Это стало причиной возникновения аварийной ситуации на целом ряде АЭС в Японии. При этом на АЭС «Фукусима-1» сложилась наиболее тяжелая обстановка. Развитие аварии на данной АЭС стало следствием сбоев в нормальной работе систем и барьеров безопасности, что привело к выбросу радиоактивных веществ в атмосферу, объемы которых достаточно значимы и составляют до десяти процентов, по радиологически значимым радионуклидам — около 10% от выбросов при аварии на Чернобыльской АЭС.

В настоящей статье анализируются социальные и экономические последствия радиационной аварии на АЭС «Фукусима-1». В ТКЦ ИБРАЭ РАН с момента аварии до настоящего времени ведется мониторинг параметров радиационной обстановки на территории Японии и собран значительный объем разнородной информации. На основе анализа собранного материала построены карты загрязнения и возможных дозовых нагрузок на население, выполнены оценки реальных потерь для населения и государства, вызванных непосредственно радиационным фактором и эвакуационными мероприятиями. Приоритетной задачей данной работы являются оценка необходимости эвакуации населения в тех масштабах, в которых она была проведена, и сопоставление предварительно продекларированных официальными сторонами масштабов последствий радиационной аварии с выполненными расчетами.

Исходная информация

На протяжении всего периода наблюдений основную информацию по радиационной обстановке в зоне аварии предоставляло общественности Министерство образования, культуры, науки, техники и технологии Японии (МEXT). Наиболее детально (с интервалом 10 мин) публиковались данные

о мощности дозы с системы автоматических постов мониторинга, которые обслуживало МЕХТ. За пределами 20-километровой зоны вокруг АЭС «Фукусима-1» в радиусе примерно 60 км ежедневно проводился дополнительный мониторинг с помощью нескольких передвижных измерительных комплексов. Результаты измерений выставлялись на открытых интернет-сайтах. Внутри 20-километровой зоны работали исследовательские группы, и результаты их работы помещались в открытом доступе с некоторым опозданием. Данные по радиационной обстановке непосредственно вблизи аварийной АЭС предоставляла компания-оператор ТЕРСО. Помимо этих источников с начала апреля в открытом доступе стали появляться результаты гамма-съемки над значительной частью территории префектуры Фукусима, получаемые Администрацией национальной ядерной безопасности Министерства энергетики США (US DoE/NNSA). Сбор данных из этих и других открытых источников для задач российских государственных органов вел ТКЦ ИБРАЭ РАН с первого дня после возникновения аварии на АЭС «Фукусима-1».

Методы исследования

Приблизительно с 23 марта прекратилось значимое изменение радиационной обстановки на всей территории Японии и наступил период постепенного снижения уровней радиоактивного загрязнения территории. Продолжительность выбросов во времени, сложности с идентификацией разнородных по структуре данных радиационной разведки и невозможность влияния на получение информации в необходимом объеме и из нужных мест стали причинами того, что в течение первого месяца после аварии не удавалось построить единую и непротиворечивую картину радиационной обстановки на всей территории Японии. Когда 19 апреля 2011 г. МЕХТ предоставил подробные данные по территории внутри 20-километровой зоны АЭС и был выполнен анализ по данным из 274 географических точек в префектуре Фукусима и соседних префектурах, появилась реальная возможность реконструкции радиационной обстановки на всей загрязненной территории страны.

К этому времени специалисты ТКЦ исследовали динамику изменения радиационного фона примерно в 200 различных точках на территории Японии. Регрессионный анализ этой динамики позволил установить аналитическую зависимость между значениями мощности дозы излучения на загрязненной территории и радионуклидным составом выпадений. На основе установленных закономерностей была сформирована база данных по параметрам

радиационной обстановки, адаптированная для использования в геоинформационной системе «MapInfo» в виде информационного слоя площадных объектов. Построенные таким образом карты по уровням загрязнения территории и возможным дозовым нагрузкам представлены на рис. 1.

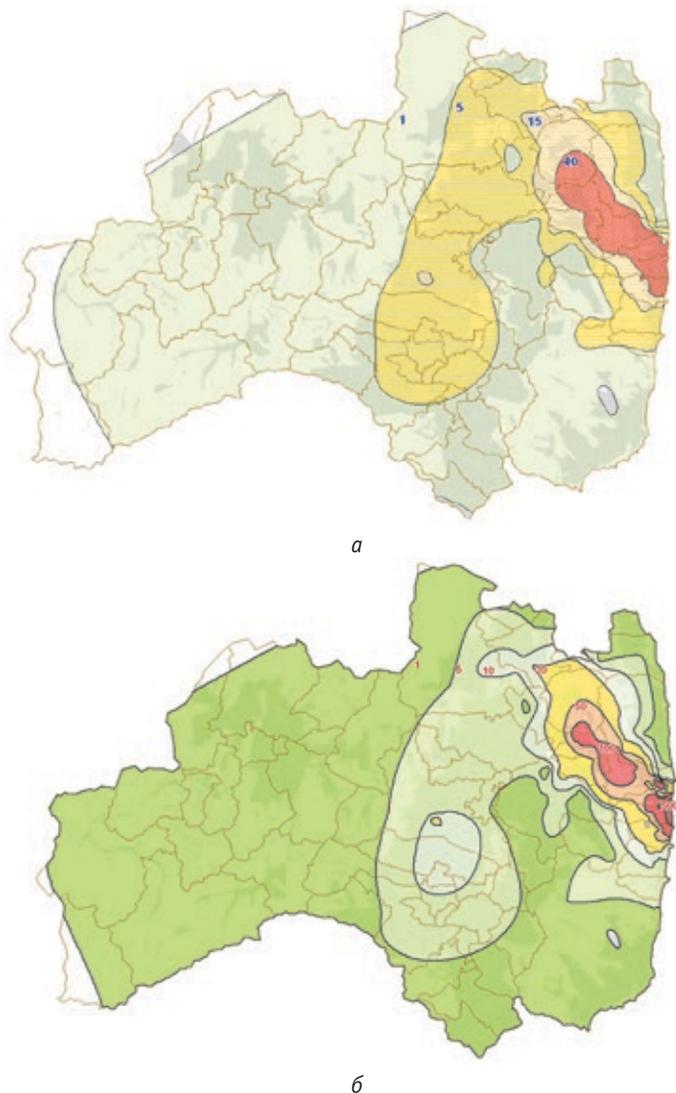


Рис. 1. Радиационное загрязнение территории префектуры Фукусима долгоживущими радионуклидами цезия (а) в Ки/км² (×37 кБк/м²) и прогнозируемые годовые дозы для населения (б) в мЗв по результатам мониторинга на 19 апреля 2011 г.

Анализ распределения загрязнения показал, что активность радионуклидов на почве по территории Японии к 19 апреля 2011 г. определяется изотопами ^{134}Cs и ^{137}Cs (в сумме $4 \cdot 10^{15}$ Бк) и ^{131}I ($3 \cdot 10^{15}$ Бк). При этом более 80 % изотопов цезия, осевших на почву, приходилось на территорию префектуры Фукусима. На рис. 2 представлена наша оценка распределения радиоактивных выпадений изотопов цезия по префектурам Японии.



Рис. 2. Относительное распределение радиоактивных выпадений по активности изотопов цезия по префектурам Японии на апрель 2011 г.

Векторная карта границ префектур Японии и муниципалитетов префектуры Фукусима была создана с использованием редактора карт «MapInfo» на основе растровых карт «Wikimaria» [1]. С помощью геоинформационной системы планировалось провести расчеты численности населения, ресурсов и экономических потерь по заданным географическим зонам с учетом неоднородностей распределения людских и материальных ресурсов в границах каждого муниципалитета. На первом этапе был создан информационный картографический слой из площадных объектов заселенных территорий префектуры Фукусима. В качестве основы для его построения были использованы растровые карты «OpenStreetMap» [2]. В качестве информационного наполнения геоинформационной базы данных использовались данные Бюро статистики Японии [3]. Из нескольких сотен доступных параметров были выбраны отдельные показатели по возрастному составу населения, рождаемости и смертности, количеству домовладений, а также ряд финансовых показателей, присущих каждому муниципалитету префектуры. Почти

все собранные сведения относились к 2005—2008 гг. и могли устареть, но этими расхождениями на фоне других допущений, которые принимались в расчетах, можно пренебречь ввиду незначительности отклонений от нынешних значений.

Результаты анализа

Систематизация и обработка данных в информационной системе позволила получить оценки численности населения, числа домовладений и площадей территорий, находящихся в границах зон радиоактивного загрязнения с установленными прогнозными значениями дозовых нагрузок за первый год и уровней загрязнения территории. Первые такие оценки, сделанные в ТКЦ на основании данных, полученных до 19 апреля 2011 г., приведены в табл. 1 и 2.

Таблица 1. Оценка численности населения и площади территорий в зонах с различной ожидаемой годовой дозой по данным на 19 апреля

Доза, мЗв/год	Население, человек	Беременные женщины, человек	Площадь населенной территории, км ²	Количество домовладений
Более 1	900 000	5 260	2 070	308 000
Более 5	826 000	5 240	1 430	280 000
Более 10	276 000	1 810	450	93 500
Более 20	37 200	210	120	11 850
Более 50	22 400	130	70	7 280
Более 100	17 300	110	47	5 700
Более 500	3 340	22	8,6	1 080

Таблица 2. Оценка численности населения и площади территорий в зонах с различными уровнями радиационного загрязнения по данным на 19 апреля

Удельное поверхностное загрязнение почвы изотопами цезия, кБк/м ² (Ки/км ²)	Население, человек	Беременные женщины, человек	Площадь населенной территории, км ²	Количество домовладений
Более 37 (1)	2 100 00	12 700	4 130	701 700
Более 185 (5)	1 030 000	6 600	1 830	349 000
Более 555 (15)	92 100	540	265	29 890
Более 1480 (40)	46 400	280	135	15 170
Расширенная зона эвакуации	131 600	820	390	42 060
20-километровая зона АЭС	80 900	500	207	26 480

27 мая оценки численности населения в зонах радиоактивного загрязнения были опубликованы в докладе [4] на сайте IRSN. В этом документе также

приведены оценки уровней загрязнения территорий и ожидаемых дозовых нагрузок на население, полученные в результате математической обработки дозовых карт и карт загрязнения территории, ранее независимо составленных и опубликованных MEXT и US DoE/NNSA. Данные статистики по территории и населению для расчетов IRSN были также взяты из материалов сайта Бюро статистики Японии. Количество жителей в каждой зоне рассчитывалось на основе значений средней плотности населения для каждого муниципалитета и с учетом его равномерного распределения по территории. Для некоторых муниципалитетов, где неоднородность зон проживания населения выражена более значительно, в расчетах учитывались только населенные территории. Об источнике, откуда были взяты сведения о географических границах населенных районов, в докладе IRSN не сообщается. Кроме того, из-за недостатка данных по загрязненности в ближней зоне около АЭС в докладе приводятся оценки только по территориям за пределами 20-километровой зоны эвакуации.

Используя изолинии дозовых нагрузок из доклада IRSN, мы выполнили с помощью геоинформационной системы новые расчеты, представленные в табл. 3. По сравнению с первоначальными оценками численность населения в различных зонах радиоактивного загрязнения уменьшалась от 1,5 до 3 раз, что связано в первую очередь с более реалистичной оценкой дозовых нагрузок. В оценках IRSN получены еще более низкие значения численности населения, особенно на наиболее загрязненных территориях. По-видимому, к такой разнице привел учет в наших расчетах сильной неоднородности распределения жителей по территории в границах отдельных муниципалитетов.

Таблица 3. Сравнение оценок IRSN и ИБРАЭ РАН по численности жителей префектуры Фукусима, проживающих за пределами 20 км от АЭС в зонах с различными дозовыми нагрузками

Доза за первый год, мЗв/год	IRSN	ИБРАЭ РАН		
	Население, человек	Население, человек	Количество домовладений	Заселенная территория, км ²
Более 5	361 400	57 1320	195 740	925,9
Более 10	69 400	92 960	31 490	201,5
Более 16	26 400	—	—	—
Более 20	—	16 290	4 820	85,5
Более 50	5 300	9 480	2 980	35,4
Более 100	2 200	6 860	2 200	21,4

В июле 2011 г. компания-оператор TEPCO опубликовала на своем сайте документ, составленный MEXT, NISA и NSC [5]. Он содержит карту распределения мощности дозы преимущественно на территории префектуры Фукусима по состоянию на 11 июля и карту с изолиниями эффективной дозы для населения за первые четыре месяца после аварии. Эти распределения охватывают и территорию 20-километровой зоны АЭС «Фукусима-1», что позволяет на их основе сделать более корректные оценки численности населения в зонах эвакуации и повышенного загрязнения. В ТКЦ была проведена оцифровка растровых изображений этих карт и созданы их векторные аналоги, пригодные для проведения расчетов в геоинформационной системе.

В соответствии с оценками содержания радиоактивных веществ в выбросах, а также измерений радиоактивности в объектах окружающей среды через четыре месяца после аварии основной вклад в мощность дозы дают долгоживущие радионуклиды ^{137}Cs и ^{134}Cs . Анализ радионуклидного состава в пробах почвы и растительности на территории префектуры Фукусима показал, что соотношение изотопов цезия ($^{134}\text{Cs}:^{137}\text{Cs}$) достаточно однородно по зонам загрязнения и находится в диапазоне 0,85—1. При соотношении этих нуклидов 1:1 мощность амбиентного эквивалента дозы в 1 мкЗв/ч, рассчитанная с учетом неровностей земной поверхности на высоте 1 м по методике [6], обусловлена суммарным поверхностным загрязнением почвы этими двумя нуклидами ($370 \text{ кБк/м}^2 = 10 \text{ Ки/км}^2$). С использованием данного соотношения и результатов реконструкции распределения мощности дозы на территории префектуры Фукусима, выполненной японскими специалистами, была построена карта уровней загрязнения территории префектуры Фукусима изотопами цезия по состоянию на 11 июля (рис. 3).

В табл. 4 приведены новые оценки площадей по зонам загрязнения и численности населения в них.

Сравнивая полученные результаты с представленными ранее (см. табл. 2), можно отметить некоторое увеличение оценок численности населения в зонах, загрязненных выше 1580 кБк/м^2 (40 Ки/км^2), — с примерно 46 тыс. до 53 тыс. человек. Кроме того, появилась возможность более подробно оценить площади загрязнения и количество проживающего там населения в зонах от 1,5 до 20 МБк/м^2 . Характерно и само появление территорий с высокими уровнями загрязнения почвенного покрова (более $10\text{—}20 \text{ МБк/м}^2$) суммарно по ^{134}Cs и ^{137}Cs , о которых ранее не сообщалось.

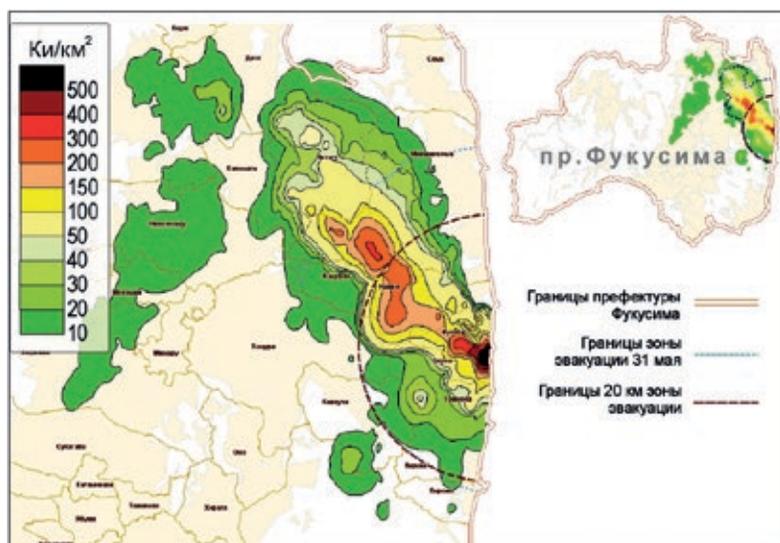


Рис. 3. Реконструкция уровней загрязнения территории префектуры Фукусима изотопами цезия (^{134}Cs + ^{137}Cs) по состоянию на 11 июля ($1 \text{ Ки}/\text{км}^2 = 37 \text{ кБк}/\text{м}^2$)

Таблица 4. Оценка площади территории и численности населения в зоне радиационного загрязнения в префектуре Фукусима по данным на 11 июля 2011 г.

Удельное поверхностное загрязнение почвы двумя изотопами цезия, $\text{кБк}/\text{м}^2$ ($\text{Ки}/\text{км}^2$)	Полная площадь, км^2	Площадь заселенных территорий, км^2	Население, человек
Более 370 (10)	1860	710	397 400
Более 740 (20)	910	238	81 600
Более 1100 (30)	690	193	60 100
Более 1500 (40)	570	166	53 100
Более 1850 (50)	465	133	44 240
Более 3700 (100)	255	63	22 420
Более 5500 (150)	152	35	12 400
Более 7400 (200)	72	16,7	6 100
Более 11000 (300)	17,6	9,7	3 610
Более 15000 (400)	8,6	5,9	2 260
Более 18500 (500)	4,9	3,2	1 230

Что касается зон загрязнения со сравнительно небольшими уровнями загрязнения почвенного покрова от 37 до 185 и от 185 до 370 $\text{кБк}/\text{м}^2$, то опубликованная 11 июля карта не дает оснований для корректировки ранее полученных оценок.

Карта плотности загрязнения территории изотопами ^{134}Cs и ^{137}Cs позволила консервативно по методике [6] оценить дозы и за 8 мес после 11 июля. Путем сопоставления построенной нами векторной карты изодоз за 8 мес с японской картой изодоз за четыре первых месяца [5] получена карта распределения годовых доз в префектуре Фукусима (рис. 4).

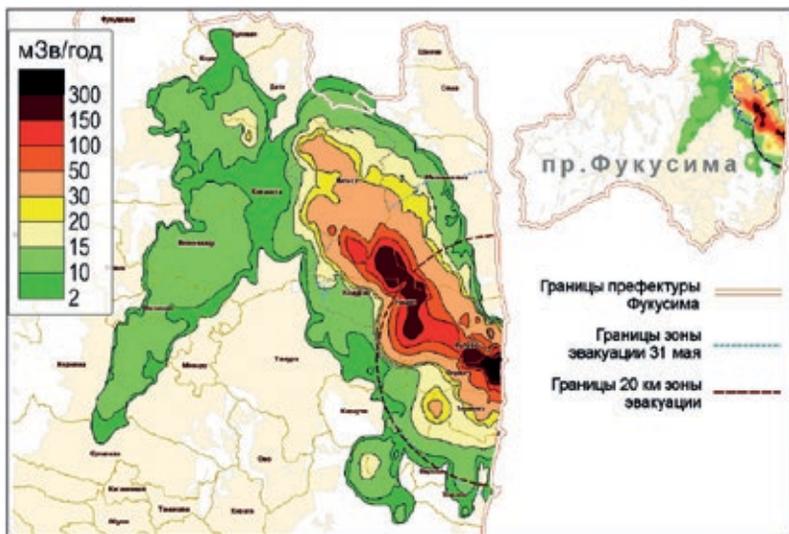


Рис. 4. Прогнозируемое распределение доз внешнего облучения населения префектуры Фукусима (мЗв) за первый год после аварии при отсутствии защитных мероприятий

Высокие плотности выпадения изотопов цезия в некоторых локальных точках (около 26 МБк/м² по ^{137}Cs в 1 км от АЭС и до 13 МБк/м² по ^{137}Cs для некоторых населенных пунктов на северо-западном следе за 20-километровой зоной) могли создавать значимые дозовые нагрузки внешнего облучения для населения этих населенных пунктов при отсутствии защитных мер.

В табл. 5 приведены новые результаты расчета численности населения и площади территорий префектуры Фукусима, попавших в зоны с различными значениями возможных доз для населения за первый год после аварии. Эти оценки сделаны при наиболее консервативных предположениях о постоянном проживании (эвакуации и самовыезда жителей не было) и отсутствии защиты зданиями и сооружениями. Не учитывались также заглупление радиоактивных веществ и дезактивация территорий. Такие оценки сверху страхуют ответственных лиц при принятии решений по защите населения.

Таблица 5. Оценка численности населения в префектуре Фукусима по зонам ожидаемой дозы за год по данным на 11 июля 2011 г.

Доза, мЗв/год	Население, человек	Количество домохозяйств	Полная площадь, км ²	Населенная площадь, км ²
Более 1	Примерно 950 000	Примерно 320 000	Примерно 4 000	Примерно 1 600
Более 2	560 000	191 180	2400	970
Более 3	400 000	136 500	1870	710
Более 10	84 000	27 200	946	245
Более 20	60 000	19 320	694	190
Более 30	51 900	16 740	560	164
Более 40	28 600	9 280	320	81
Более 50	23 200	7 540	260	65
Более 100	12 550	4 060	154	35
Более 150	5 730	1 860	69	16
Более 200	3 720	1 200	18	10
Более 300	2 210	710	8,4	5,8
Более 400	1 230	400	4,9	3,2

При оценке числа эвакуируемых в результате аварии на АЭС следует учитывать тот факт, что в прибрежных районах цунами вызвало значительные разрушения и какая-то часть людей погибла или покинула зону проживания вблизи АЭС не по причине радиационного фактора. Таким образом, жители некоторых районов не смогут вернуться на прежнее место жительства независимо от радиационной обстановки. В рамках настоящей работы предполагается, что из 20-километровой зоны, а позднее и из соседних муниципалитетов были эвакуированы (перемещены) все проживавшие ранее жители — приблизительно 131 600 человек.

При расширении зоны планируемого отселения жителей японские власти приняли за нижнюю границу предел в 20 мЗв на первый год. При этом зона возможной эвакуации в северо-западном направлении увеличивалась до примерно 45 км включая муниципалитет Иитатэ.

Результаты расчетов численности населения в зонах отселения приведены в табл. 6.

Эти расчеты показывают, что потенциально при установленном пределе дозы в 20 мЗв/год в зону отселения могут быть возвращены порядка 72 тыс. жителей, из них более 35 тыс. — в 20-километровую зону. В случае, если будут выполнены реалистические расчеты по возможным дозам облучения за первый год, а также приняты меры по частичной реабилитации территории, численность возвращаемого населения может увеличиться до 100 тыс.

человек. Если бы японские власти установили порог возвращения населения в 100 мЗв/год после аварии с одновременным контролем за соблюдением этой величины, то более 90% перемещенных уже летом 2011 г. могло бы вернуться на прежнее место жительства.

Таблица 6. Оценка численности населения в зонах эвакуации с ожидаемой дозой за первый год свыше 20 и 100 мЗв по данным на 11 июля 2011 г.

Зона	Параметр		При ожидаемой дозе за первый год, мЗв	
			более 20	более 100
Всего	Площадь, км ²	Полная	695	154
		Заселенная	193	35
	Население, человек		60 000	12 550
В 20-километровой зоне	Площадь, км ²	Полная	327	101
		Заселенная	109	24
	Население, человек		43 700	8750
За пределами 20-километровой зоны	Площадь, км ²	Полная	368	53
		Заселенная	84	11
	Население, человек		16 300	4 000
В расширенной зоне эвакуации	Площадь, км ²	Полная	662	154
		Заселенная	192	35
	Население, человек		59 200	12 550
За пределами расширенной зоны эвакуации	Площадь, км ²	Полная	33	0
		Заселенная	менее 1	0
	Население, человек		800	0

Для оценки масштаба реально существующих дозовых нагрузок на население следует упомянуть, что за 2007 г. около 70 млн граждан США в ходе диагностических процедур на томографе одновременно получили эффективную дозу от 0,9 до 40 мЗв [7].

В расчетах прямого экономического ущерба вследствие проведения эвакуационных мероприятий в зоне радиационной аварии учитывались затраты на переселение и временное проживание жителей, компенсации материальных потерь из-за переселения и приостановки экономической деятельности, потери инвестиционной привлекательности территорий, а также другие факторы, определяющие стоимость при принятии решения о применении тех или иных защитных мер. Отдельные статистические параметры, использовавшиеся при расчетах брались из официальной японской статистики (табл. 7).

Таблица 7. Параметры для оценки стоимости защитных мероприятий по данным японской статистики

Параметр	Значение
ВВП на душу населения Японии в 2010 г., долл.	33 828
Стоимость эвакуации одного жителя, долл.	33
Стоимость аренды дома (на семью), долл./мес	536,6
Средний доход на члена семьи, долл./мес	2000
Средние расходы на питание одного человека, долл./сут	11
Зарплата обслуживающего персонала, долл./мес	4728
Почасовая ставка рабочего, долл./ч	28
Среднее число человек в семье	2,52

Отдельно были оценены потери земли как инвестиционного инструмента при долгосрочном отчуждении территории. Простая оценка ее стоимости может быть получена путем умножения площади отчуждаемой заселенной территории на стоимость земли под жилое строительство. В расчетах учитывалась стоимость земли для каждого муниципалитета.

Меры реабилитации территорий могут включать множество процедур и мероприятий, применяемых в различных масштабах. В данной работе использовались некоторые типичные приемы и параметры из методики [8]. Для первичной оценки стоимости снижения радиационного фона в зоне проживания населения были выбраны: вспашка и захоронение грунта вокруг всех зданий в выбранной области, стандартная вспашка 30% всех сельскохозяйственных земель и дезактивация всех автодорог. При расчетах полной стоимости работ по дезактивации территории использовалась приближенная оценка стоимости одного человеко-часа работы японского рабочего (см. табл. 7).

Были произведены оценки затрат в случае проведения долговременной эвакуации в различных зонах префектуры Фукусима. В табл. 8 приведены соответствующие расчеты в 20-километровой и расширенной зонах эвакуации, в зоне загрязнения почвы долгоживущими радионуклидами свыше 740 кБк/м² по ¹³⁷Cs и в зонах с консервативно оцененной дозой за год свыше 20 и 100 мЗв.

Суммарные затраты для зон, в которых доза за первый год может превышать 20 или 100 мЗв, могут достигать 44 или 9 млрд долл. соответственно. Также расчеты показывают, что в пределах расширенной зоны эвакуации прямые потери от эвакуации могут составить порядка 100 млрд долл. в случае долгосрочного отчуждения территорий. Почти 90% этой суммы составляют потери, связанные с изъятием земель из экономического оборота. Таких по-

теперь можно частично избежать при проведении реабилитационных работ, стоимость которых на два порядка ниже. Если же земли зоны эвакуации будут в скором времени возвращены в оборот в районах, где годовая доза ожидается менее 20 мЗв или загрязнение составляет менее 740 кБк/м² по ¹³⁷Cs, потери могут быть снижены вдвое.

Таблица 8. Оценки экономических затрат при различных сценариях эвакуации населения, млн долл.

Зона проведения мероприятий		Компенсация потери недвижимости	Потери производства за два года	Стоимость земли	Стоимость транспортировки при эвакуации	Месячное проживание в эвакуации	Затраты на реабилитацию
Зона эвакуации	20-километровая	1 470	5 300	47 000	2,6	192	1,8
	Расширенная	2 390	9 000	87 000	4,3	321	3,4
Прогнозируемая доза, мЗв/год	Более 20	1 100	3 730	39 100	2	148	1,7
	Более 100	230	875	7 650	0,4	30,7	0,3
Зона загрязнения более 740 кБк/м ²		975	3 320	34 200	1,7	130	1,5

В соответствии с принципом оптимизации в нормах радиационной безопасности НРБ 99/2009 [9] принимается, что облучение в коллективной эффективной дозе 1 чел.-Зв приводит к потенциальному ущербу, равному потере 1 чел.-года жизни населения, с чем можно сопоставить значение среднегодового душевого валового продукта (ВВП) в финансовом эквиваленте. Соответствующая достаточно консервативная оценка для расширенной зоны эвакуации АЭС «Фукусима-1» дает величину предотвращаемой коллективной дозы порядка 3—6 тыс. чел.-Зв, что эквивалентно оправданным затратам на уровне 100—200 млн долл. То есть расчетная сумма затрат в случае долговременной эвакуации в префектуре Фукусима в 500—1000 раз превысит значение, отвечающее принципам оптимальной радиационной защиты. Таким образом, реальные потери будут определяться не столько сложившейся радиационной обстановкой в Японии, сколько характером управленческих решений, ориентированных и на иные (помимо радиологических последствий) обстоятельства и критерии. Приведенные в настоящей статье оценки могут помочь общественности и специалистам получить представление о масштабах радиационных и экономических последствий крупной аварии на АЭС и дать оценку принятым критериям и проводимым мерам по защите населения.

Заключение

В результате аварии на АЭС «Фукусима-1» порядка 300 км² территории Японии было загрязнено ¹³⁷Cs с плотностью выше 1,5 МБк/м². Для сравнения: после аварии на Чернобыльской АЭС площадь территории с таким же уровнем загрязнения составила около 3600 км². В Японии на этой территории до аварии проживало около 25 тыс. человек.

На острой фазе аварии (в первые дни) была проведена эвакуация из 20-километровой зоны вокруг АЭС (613 км²) около 81 тыс. человек. Впоследствии территория планируемой эвакуации населения расширилась за счет северо-западного языка по площади до 1184 км², а по населению — до 132 тыс. человек.

Выполненные консервативные оценки показали, что за первый год дозы внешнего облучения выше 20 мЗв могли получить люди, постоянно проживавшие на территории площадью около 700 км² (60 тыс. человек), а дозы выше 100 мЗв — на территории площадью около 153 км² (12 550 человек).

На ранней стадии крупной радиационной аварии, когда оценки радиационной обстановки за пределами АЭС сопряжены со значительными неопределенностями, а перспективы развития аварийной ситуации остаются неясными, временная эвакуация населения из ближней зоны является абсолютно оправданной по критерию гарантирования безопасности населению. Важным моментом в этом случае становится определение границы зоны эвакуации.

Следует отметить, что после уточнения параметров сложившейся радиационной обстановки на местах и при правильно организованной информационно-разъяснительной работе с эвакуируемым населением решение о его добровольном возвращении является социально приемлемым и экономически целесообразным шагом, с учетом того, что дозы облучения на уровне 100 мЗв за 1 год и до 300 мЗв за жизнь не могут привести к проявлению достоверно доказанных рисков для здоровья, поскольку при таких дозах речь идет о гипотетических рисках, основанных на линейной беспороговой концепции. В этой ситуации меры вмешательства, наносящие реальный серьезный ущерб социально-экономическому благополучию населения, а значит, и его здоровью, не оправданы ни по каким научно-обоснованным критериям.

Общие экономические потери за счет эвакуации и долгосрочного перемещения граждан в первую очередь зависят от критериев принятия решения по эвакуации и от ее длительности.

В результате эвакуации населения **из декларированной властями Японии расширенной зоны вокруг АЭС** с приостановлением в ней экономической деятельности на длительный срок прямые экономические потери могут составить порядка 100 млрд долл. При этом подавляющее большинство населения на предполагаемых к эвакуации территориях может получить дозы значительно ниже обоснованных с точки зрения применения столь жесткой меры радиационной защиты. То есть экономический ущерб в этом случае почти полностью определяется принятием решения, не обоснованного по радиационным критериям. В случае долгосрочной эвакуации по критерию прогнозируемой годовой дозы свыше 20 мЗв сумма потерь снизится до 44 млрд долл., а для дозы свыше 100 мЗв — до 9 млрд. Таким образом, оптимизация только экономических показателей на основе радиологических критериев безопасности позволила бы уменьшить потенциальные затраты примерно в 10 раз. Нахождение социально приемлемого решения на ранней стадии аварии — сложная задача для административных органов и государственной власти, что в первую очередь связано с психологическими аспектами восприятия радиационного фактора и отсутствием четких нормативных критериев радиационной безопасности, воспринимаемых общественным мнением. Обществу непонятно, почему аварийные нормы действительно обеспечивают безопасность, если они на два порядка выше нормативов для нормальных условий. При этом сложно воспринять, что существующие нормативы для нормальных условий не являются пределами, определяющими безопасность для здоровья населения. Реальные уровни, превышение которых соответствует возможности проявления негативного воздействия на здоровье, на два порядка выше пределов для нормальных условий.

Вряд ли логически объяснимо, что доза за первый год в 20 мЗв, соответствующая дозе острого облучения при прохождении, ставшей уже рутинной, диагностической процедуры на компьютерном томографе, которую в мире ежегодно проходят сотни миллионов людей, может служить критерием для серьезного вмешательства в жизнь людей вплоть до долговременной эвакуации. На наш взгляд, это противоречие мешает проводить послеаварийные мероприятия оптимальным образом с соблюдением всех необходимых требований безопасности. Фукусима — еще один пример того, как противоречия в нормах создают неоправданные проблемы для населения, что свидетельствует о необходимости совершенствования норм радиационной безопасности.

Литература

1. Интерактивный картографический интернет-портал
<http://wikimapia.org>.
2. Интерактивный картографический интернет-портал
<http://www.openstreetmap.org/>.
3. Japan statistical yearbook 2011 / Statistical Research and Training Inst. — [S. l.], 2011.
4. Assessment on the 66th day of projected external doses for populations living in the north-west fallout zone of the Fukushima nuclear accident. Outcome of population evacuation measures / IRSN, Directorate Of Radiological Protection And Human Health. — [S. l.], 28 p. — (Report DRPH/2011-10).
5. Distribution map of radiation dose around Fukushima Dai-ichi&Dai-Ni NPP (as of July 11, 2011) / Ministry of Education, Culture, Sports, Science and Technology (MEXT) // http://radioactivity.mext.go.jp/en/1750/2011/07/1305904_0720.pdf.
6. Generic Procedures for Assessment and Response during a Radiological Emergency / Intern. Atomic Emergency Agency. — Vienna, 2000. — (IAEA TECDOC Series No. 1162).
7. Sources and effects of ionizing radiation. — Annex A / United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. — New York, 2010. — (UNSCEAR 2008 REPORT Vol. I).
8. RODOS. Model description of the late economics modeling. — [S. l.], 2000. — Rodos report RODOS(WG3)-TN(99)-62 (draft).
9. Нормы радиационной безопасности (НРБ-99/2009) СанПиН 2.6.1.2523-09. — М., 2009. — 101 с.

Оценки возможных доз облучения населения Японии в результате аварии на АЭС «Фукусима-1» на основе черновыльского опыта

О. А. Павловский, С. В. Панченко, Е. Л. Серебряков

В результате черновыльской аварии в 1986 г. площадь территорий России, Украины и Беларуси с радиоактивным загрязнением свыше 0,56 МБк/м² по ¹³⁷Cs составила 10 260 км² (рис. 1).

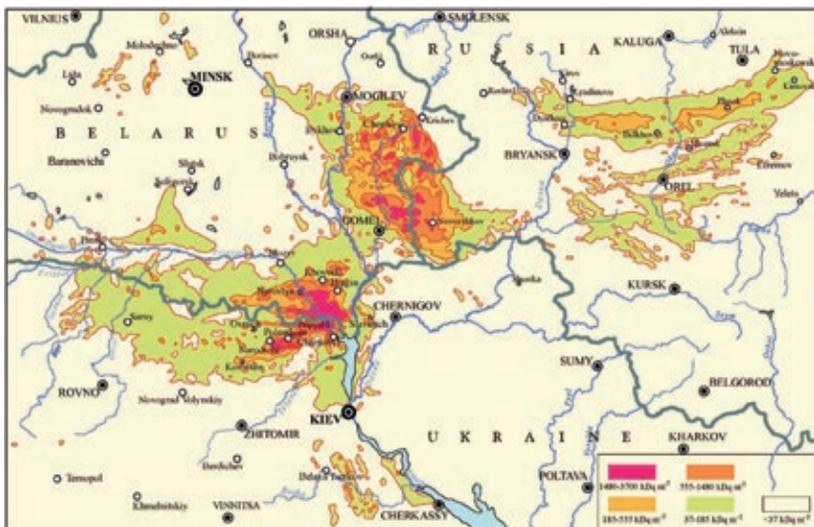


Рис. 1. Карта радиоактивного загрязнения территорий ¹³⁷Cs в районе размещения Черновыльской АЭС [1]

Столь значительные размеры зон радиоактивного загрязнения потребовали разработки простых и оперативных методик оценки доз облучения населения, исходя из наиболее просто измеряемого показателя — мощности дозы гамма-излучения на открытой местности. В качестве нормирующего показателя было решено использовать результаты измерения мощности дозы гамма-излучения на 15-й день после аварии [2]. Примененные для этих расчетов соотношения представлены в табл. 1.

Таблица 1. Оценки спада мощности дозы гамма-излучения на местности и прогнозируемых доз внешнего облучения людей, нормированные на единичную мощность дозы на 15-й день после черновильской аварии [2]

Время, прошедшее после аварии	Мощность дозы гамма-излучения, мР/ч	Накопленная поглощенная доза в воздухе к данному моменту времени, Р
1 день	3,0	0,43
4 дня	2,5	0,57
7 дней	1,7	0,72
15 дней	1,0	0,90
1 месяц	0,55	1,2
3 месяца	0,22	1,7
1 год	0,074	2,5
3 года	0,029	3,4

Произошедшая 11 марта 2011 г. авария на АЭС «Фукусима-1» также привела к радиоактивному загрязнению больших территорий в Японии (рис. 2).

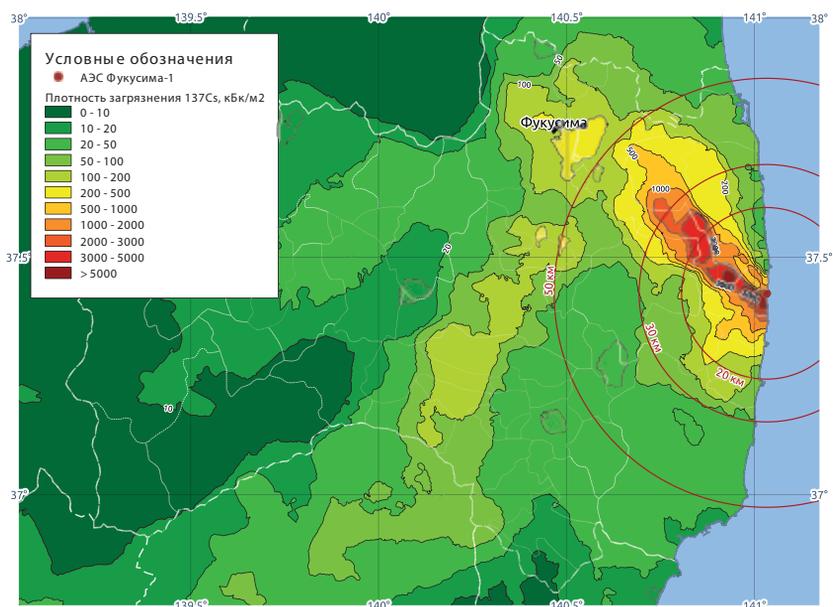


Рис. 2. Карта радиоактивного загрязнения ^{137}Cs территорий в районе АЭС «Фукусима-1» [3]

Как и в случае черновильской аварии, радиационные последствия аварии на АЭС «Фукусима-1» в первые дни и недели определялись изотопами йода

и теллура (особенно ^{132}I , ^{131}I и ^{132}Te), а затем основной вклад в величину мощности дозы гамма-излучения на местности стали давать ^{134}Cs и ^{137}Cs [4].

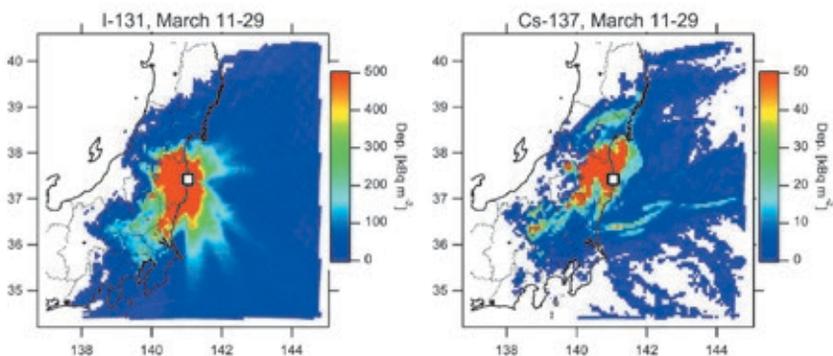


Рис. 3. Оценки интегральных уровней выпадения ^{131}I и ^{137}Cs за 11—29 марта 2011 в результате аварии на АЭС «Фукусима-1» [4]

Это позволило попытаться использовать опыт реконструкции радиологических последствий чернобыльской аварии для оценки возможных доз внешнего и внутреннего облучения населения в результате аварии на АЭС «Фукусима-1» для населенных пунктов в префектурах Фукусима и Ибараки [5].

Методика оценки возможных доз внешнего и внутреннего облучения людей разрабатывалась на основе серии предварительных расчетов с использованием отдельных модулей компьютерного кода НОСТРАДАМУС, разработанного в ИБРАЭ РАН [6]. При этом учитывались эмпирически оцененные взаимосвязи между интегралом концентрации радиоактивных веществ в воздухе, дозой внешнего облучения от облака выброса, дозами внутреннего облучения органов и тканей человека по ингаляционному пути воздействия, плотностью радиоактивного загрязнения местности за счет сухих и влажных выпадений, мощностью дозы гамма-излучения и накопленной дозой внешнего облучения от выпавших на поверхность почвы радионуклидов. Расчеты проводились отдельно для северного, северо-западного и южного радиоактивных следов, сформировавшихся после аварии на АЭС «Фукусима-1» (о причинах такого разделения следов речь идет ниже).

Представленная на сайтах <http://www.bousai.ne.jp>, <http://www.mext.go.jp>, <http://www.tepco.co.jp>, <http://www.jaea.go.jp> и <http://www.cms.pref.fukushima.jp> информация, а также другие опубликованные на начало 2012 г. работы были использованы в качестве исходных данных для последующих расчетов. При этом большое внимание было уделено оценкам накопленной

активности различных радионуклидов в активной зоне и бассейнах хранения отработавшего ядерного топлива реакторов 1—4 АЭС «Фукусима-1» к моменту их аварийного останова. Примером таких оценок могут служить опубликованные в [7] данные о суммарной активности радионуклидов и особенно актинидов на АЭС «Фукусима-1» на 11 марта 2011 г., которые представлены на рис. 4. Аналогичные расчеты проводились и экспертами ИБРАЭ РАН (см., например, помещенную в настоящем сборнике статью [8]).

Fission products		Actinides	
Nuclide	Activity [Bq]	Nuclide	Activity [Bq]
KR 85	2,584E+17	PU238	7,917E+16
SR 89	9,796E+18	PU239	8,367E+15
SR 90	2,102E+18	PU240	1,464E+16
Y 90	2,148E+18	PU241	3,429E+18
ZR 95	1,908E+19	AM241	8,677E+15
NB 95	1,965E+19	AM243	5,533E+14
RU106	9,603E+18	CM242	8,949E+17
SB125	1,826E+17	CM243	5,698E+14
TE132	1,666E+19	CM244	6,320E+16
I 131	1,186E+19		
XE133	2,378E+19		
CS134	3,801E+18		
CS137	2,988E+18		
CE144	1,720E+19		
PM147	3,509E+18		
EU154	1,419E+17		
Total Activity		2,586E+21 Bq	

Рис. 4. Оценки суммарной активности радионуклидов в реакторных зонах и бассейнах хранения отработавшего топлива АЭС «Фукусима-1» на 11 марта 2011 г. [7]

Важную роль в расчетах играли данные о суммарной активности и динамике выбросов радионуклидов в различные дни после аварии на АЭС «Фукусима-1». Мы использовали как официальные данные по суммарной активности выбросов радионуклидов, представленные в отчетах японских специалистов [9] (табл. 2), так и оценки, опубликованные в различных научных отчетах и журналах. В качестве таких примеров можно упомянуть очень детальный отчет службы ООН по наблюдениям за испытаниями ядерного оружия (Comprehensive Nuclear-Test-Ban Treaty Organization — CTBTO) [10] и достаточно подробные оценки динамики выброса ^{131}I и ^{137}Cs (рис. 5), представленные в работе японских специалистов [11].

Таблица 2. Радионуклидный состав воздушных выбросов с различных энергоблоков АЭС «Фукусима-1» [9], Бк

Нуклид	Период полураспада	Блок № 1	Блок № 2	Блок № 3	Общий выброс
⁸⁹ Sr	50,5 сут	8,20E+13	6,80E+14	1,20E+15	2,00E+15
⁹⁰ Sr	29,1 лет	6,10E+12	4,80E+13	8,50E+13	1,40E+14
⁹⁵ Zr	64 сут	4,60E+11	1,60E+13	2,20E+11	1,70E+13
⁹¹ Y	58,5 сут	3,10E+11	2,70E+12	4,40E+11	3,40E+12
⁹⁹ Mo	66 ч	8,10E+07	1,00E+04	6,70E+06	8,80E+07
¹⁰³ Ru	39,3 сут	2,50E+09	1,80E+09	3,20E+09	7,50E+09
¹⁰⁶ Ru	368,2 сут	7,40E+08	5,10E+08	8,90E+08	2,10E+09
¹²⁷ Sb	3,9 сут	1,70E+15	4,20E+15	4,50E+14	6,40E+15
¹²⁹ Sb	4,3 ч	1,60E+14	8,90E+10	3,00E+12	1,60E+14
^{127m} Te	109 сут	2,50E+14	7,70E+14	6,90E+13	1,10E+15
^{129m} Te	33,6 сут	7,20E+14	2,40E+15	2,10E+14	3,30E+15
^{131m} Te	30 ч	9,50E+13	5,40E+10	1,80E+12	9,70E+13
¹³² Te	78,2 ч	7,40E+14	4,20E+11	1,40E+13	7,60E+14
¹³¹ I	8 сут	1,20E+16	1,40E+17	7,00E+15	1,60E+17
¹³² I	2,3 ч	4,50E+14	9,60E+11	1,80E+13	4,70E+14
¹³³ I	20,8 ч	6,50E+14	1,40E+12	2,60E+13	6,80E+14
¹³⁵ I	6,6 ч	6,10E+14	1,30E+12	2,40E+13	6,30E+14
¹³³ Xe	5,2 сут	3,40E+18	3,50E+18	4,40E+18	1,10E+19
¹³⁴ Cs	2,1 лет	7,10E+14	1,60E+16	8,20E+14	1,80E+16
¹³⁷ Cs	30 лет	5,90E+14	1,40E+16	7,10E+14	1,50E+16
¹⁴⁰ Ba	12,7 сут	1,30E+14	1,10E+15	1,90E+15	3,20E+15
¹⁴¹ Ce	32,5 сут	4,60E+11	1,70E+13	2,20E+11	1,80E+13
¹⁴⁴ Ce	284,3 сут	3,10E+11	1,10E+13	1,40E+11	1,10E+13
¹⁴³ Pr	13,6 сут	3,60E+11	3,20E+12	5,20E+11	4,10E+12
¹⁴⁷ Nd	11 сут	1,50E+11	1,30E+12	2,20E+11	1,60E+12
²³⁹ Np	2,4 сут	3,70E+12	7,10E+13	1,40E+12	7,60E+13
²³⁸ Pu	87,7 лет	5,80E+08	1,80E+10	2,50E+08	1,90E+10
²³⁹ Pu	24 065 лет	8,60E+07	3,10E+09	4,00E+07	3,20E+09
²⁴⁰ Pu	6537 лет	8,80E+07	3,00E+09	4,00E+07	3,20E+09
²⁴¹ Pu	14,4 лет	3,50E+10	1,20E+12	1,60E+10	1,20E+12
²⁴² Cm	162,8 сут	1,10E+10	7,70E+10	1,40E+10	1,00E+11
Сумма		3,42E+18	3,68E+18	4,41E+18	1,12E+19

При вычислениях использовались также данные о метеорологической ситуации в первые дни после аварии в районе размещения аварийной АЭС, относящиеся к направлению, скорости ветра, приземного ветра и интенсивности атмосферных осадков как в регионе в целом (рис. 6), так и по отдельным метеостанциям (на рис. 7 — для метеостанции в городе Фукусима в пе-

риод интенсивных радиоактивных выпадений, связанных с интенсивными осадками вечером 16 марта 2011 г.).

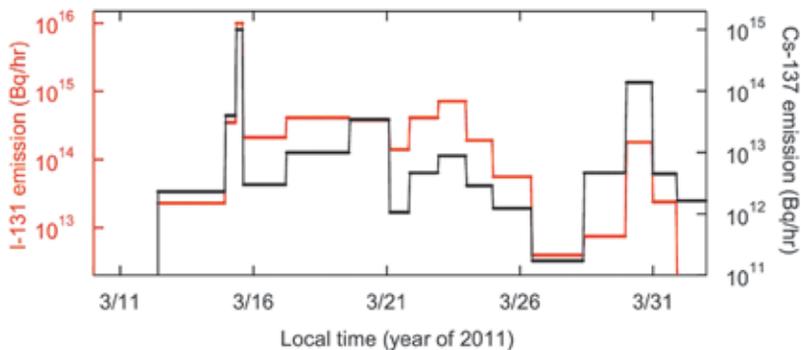


Рис. 5. Оценки интенсивности выброса в атмосферу ^{131}I и ^{137}Cs в результате аварии на АЭС «Фукусима-1» [11]

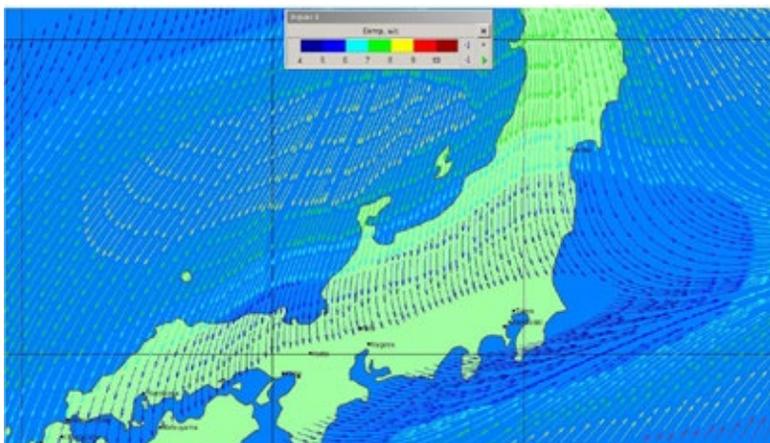


Рис. 6. Поле приземного ветра на территории Японии по состоянию на 00 UTC 21 марта 2011 г. (на основе данных Росгидромета)

Результаты вычислений концентрации радиоактивных веществ в воздухе, плотностей радиоактивных выпадений радионуклидов, а также мощностей доз гамма-излучения в период прохождения облака выброса и над сформированным радиоактивным следом сравнивались с фактическими результатами измерений этих параметров радиационной обстановки в отдельных точках радиационного контроля, размещенных в северном, южном и северо-западном направлениях от АЭС «Фукусима-1».

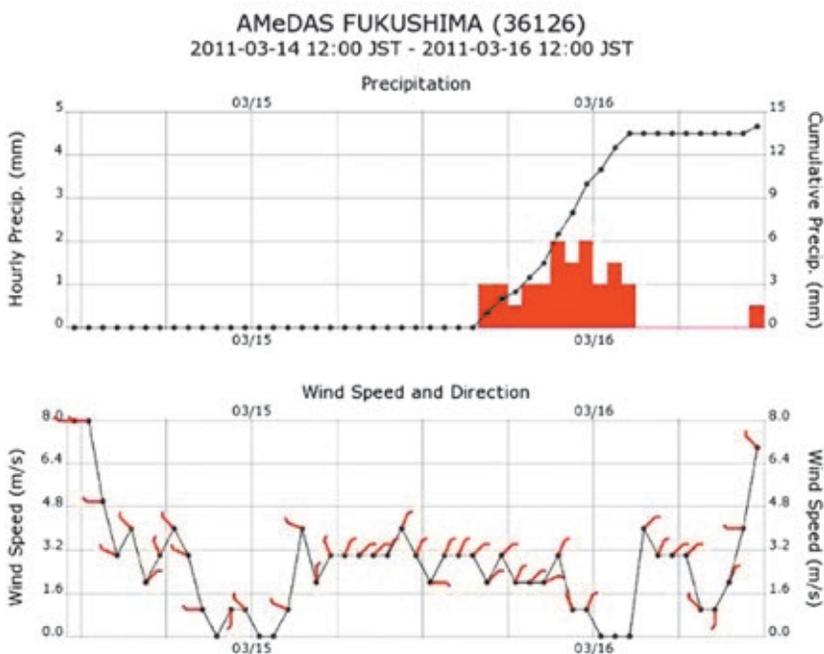


Рис. 7. Данные о метеорологической ситуации в городе Фукусима 15—16 марта 2011 г.

Это связано с тем, что, по данным японских специалистов, самые первые выбросы радиоактивных газов с первого блока АЭС сдувались ветром в южном направлении. По существу эти выбросы были реально зафиксированы датчиками на главных воротах ('Main Gate') и в южной точке контроля (MP-8), расположенной за оградой АЭС (рис. 8). Однако вскоре ветер изменился и по большей части дул на север или на северо-запад. В 1:30 (UTC) 12 марта датчик на главных воротах зафиксировал острый пик, характерный для залпового выброса. Последующие «пички» связаны с вентиляцией оболочки энергоблока № 1. Кратковременная работа датчика MP-1 зафиксировала в этот период увеличение фона более чем в 200 раз на удалении около 2 км к северу от блока. В 6:36 (15:36 по местному времени) на блоке № 1 произошел взрыв водорода. На него отреагировал датчик MP-4, на котором мощность дозы залпово подскочила до 1 мГр/ч. О сложности ветровой обстановки в этот период можно судить по приведенным на рис. 9 показаниям датчика на 'Main Gate', измерявшего направление и скорость ветра в приземном слое.

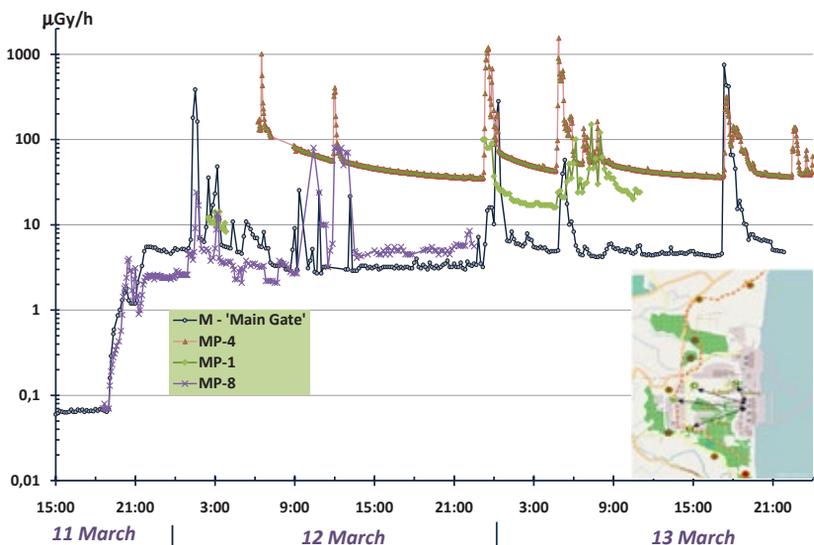


Рис. 8. Данные измерений мощности дозы гамма-излучения датчиками радиационного контроля: на основной проходной АЭС «Фукусима-1» — точка М ('Main Gate'), на северо-западе — точка МР-4, на севере — точка МР-1, на юге — точка МР-8 в период с 11 по 14 марта 2011 г. (время UTC)

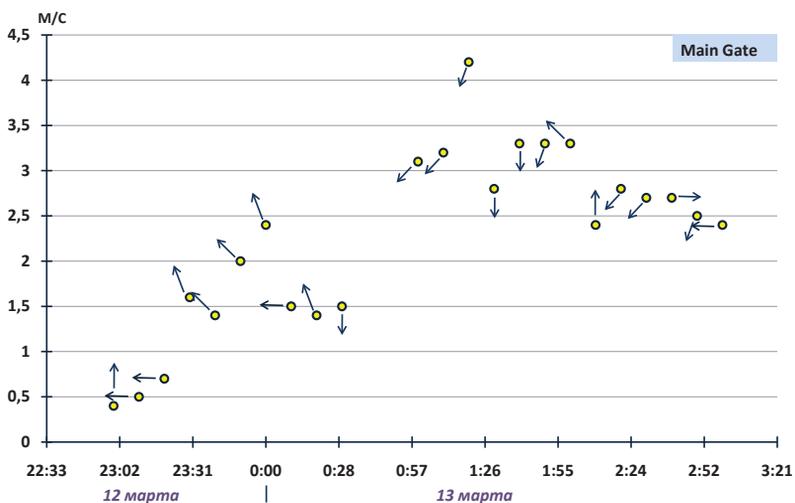


Рис. 9. Скорость и направление ветра в ночь с 12 по 13 марта 2011 г., зарегистрированные датчиками на главной проходной АЭС «Фукусима-1» — 'Main Gate'. Время UTC

Измерение мощности дозы в мэрии города Минами-Сома (24,5 км к северу от АЭС) показало вечером 12 марта (время местное) пиковое значение мощности дозы 20 мкЗв/ч, которое затем упало приблизительно до 1 мкЗв/ч. Таким образом, превышение мощности дозы на открытой местности над ранее существовавшим природным фоном радиации после прохождения радиоактивного облака выброса составило примерно 20 раз.

К вечеру 14 марта датчики радиационного контроля на главных воротах АЭС «Фукусима-1» зафиксировали мощный всплеск мощности дозы гамма-излучения, связанный со стравливанием парогазовой смеси из-под оболочки энергоблока № 2. Этот выброс был затем зафиксирован на площадке АЭС «Фукусима-2» и на poste радиационного контроля 108_28, находящихся в южном направлении от аварийной АЭС на удалении соответственно 12 и 105 км (рис. 10).

15 марта в 7:30 радиоактивный фон в городе Фукусима, расположенном примерно в 60 км к северо-западу от АЭС «Фукусима-1», вырос почти на два порядка. По-видимому, в этот район подошел передний фронт одного из радиоактивных облаков, выброшенных после 0 часов этого дня из разрушенных энергоблоков станции. Мощность дозы в городе плавно нарастала в течение примерно 7 ч, что подтверждают данные рис. 11. Измерения проводились каждые полчаса, что в принципе гарантировало, что все основные процессы формирования радиоактивного следа на графике динамики изменения мощности дозы были зафиксированы.

Еще более высокие значения мощности дозы гамма-излучения, достигавшие 45 мкЗв/ч, были зафиксированы в другом населенном пункте этой префектуры — городе Иидате (рис. 12), в котором в момент формирования радиоактивного следа были отмечены интенсивные осадки. На этом же рисунке для сравнения представлены данные измерений мощности дозы еще для двух населенных пунктов, расположенных в северном и южном направлениях от АЭС «Фукусима-1», — Минами-сома и Иваки.

Для этих населенных пунктов имелась достаточно подробная информация не только по результатам измерений мощности дозы гамма-излучения за длительный период наблюдений, но и по измерениям радионуклидного состава выпавшей на поверхность земли активности, а также по метеоусловиям в период формирования радиоактивного следа. Большой объем фактической информации определил решение проводить тестирование результатов вычислений именно по этим населенным пунктам, расположение которых относительно площадки размещения АЭС «Фукусима-1» представлено на рис. 13.

Оценки возможных доз облучения населения Японии в результате аварии на АЭС «Фукусима-1» на основе чернобыльского опыта

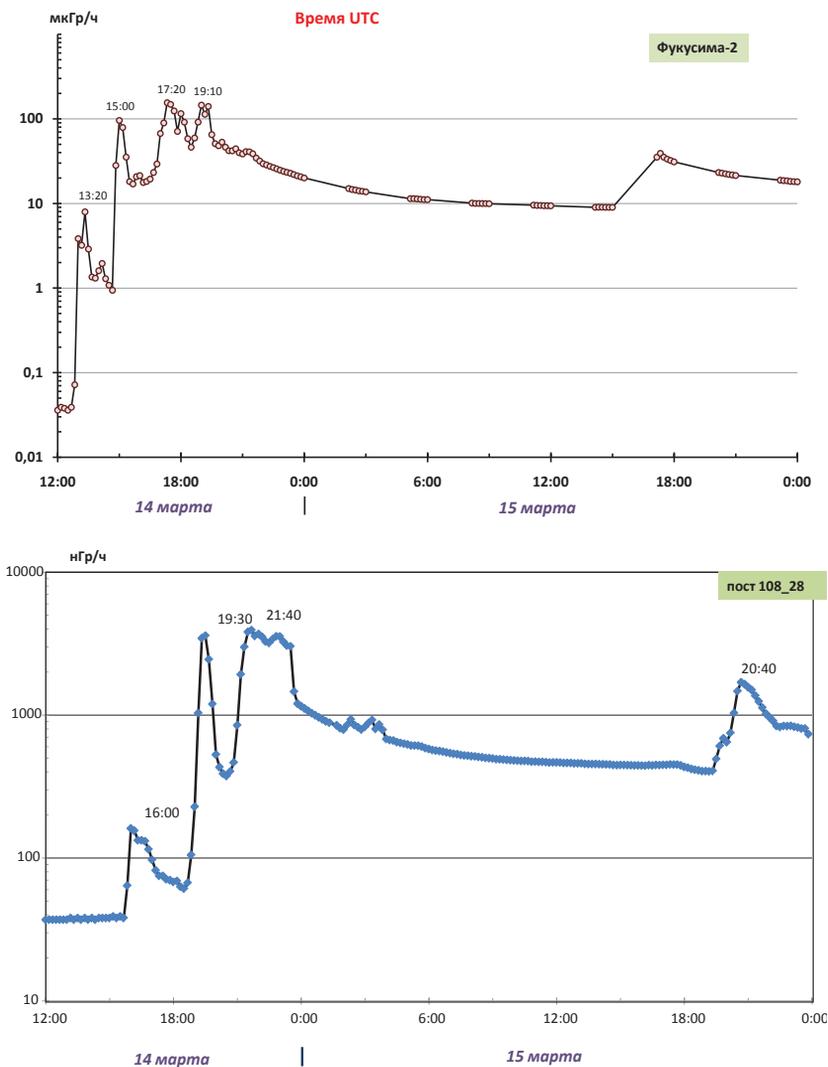


Рис. 10. Результаты измерений мощности дозы гамма-излучения в южном направлении от АЭС «Фукусима-1»

Большую помощь при проведении расчетов оказала также информация по изучению вклада отдельных радионуклидов в измеренные значения мощности дозы гамма-излучения в различное время после аварии на АЭС «Фукусима-1». Эти измерения проводились на территории Лаборатории проблем

ядерной инженерии в населенном пункте Юкисима (датчик под номером 114_02 системы ЯАСКРО), расположенного на расстоянии 238 км от АЭС «Фукусима-1» (рис. 14 и 15).

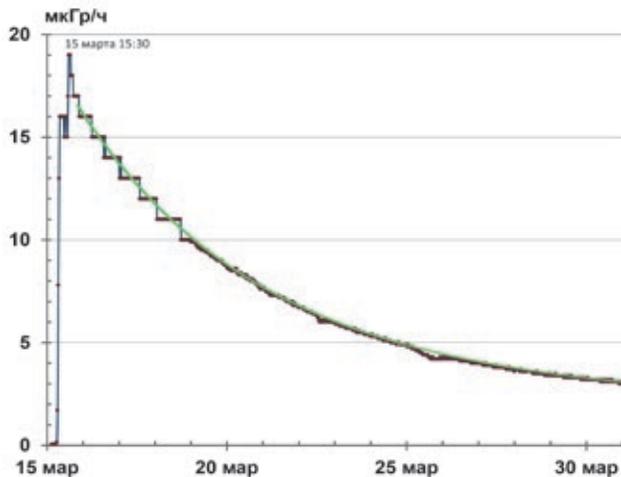


Рис. 11. Результаты измерений мощности дозы гамма-излучения в городе Фукусима в марте-апреле 2011 г.

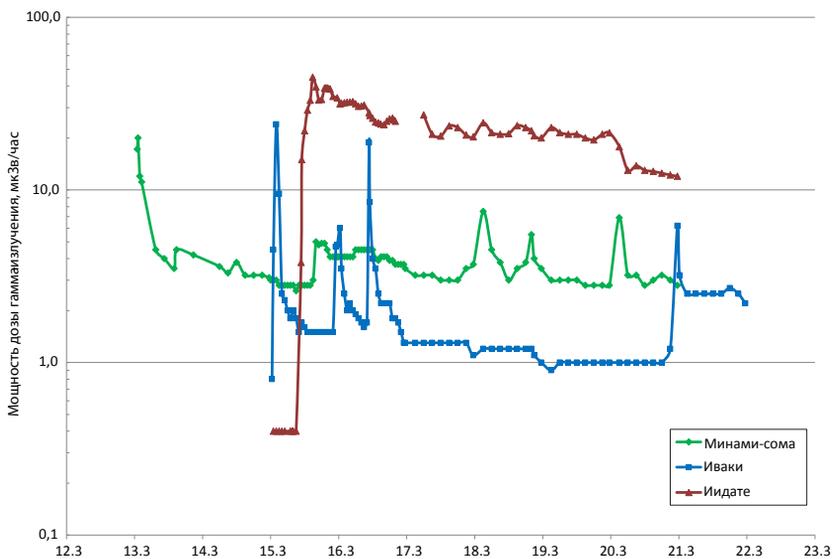


Рис. 12. Результаты измерений мощности дозы гамма-излучения в населенных пунктах Минами-сома (северный след), Иваки (южный след) и Иидате (северо-западный след) в марте 2011 г.

Оценки возможных доз облучения населения Японии в результате аварии на АЭС «Фукусима-1» на основе черновильского опыта

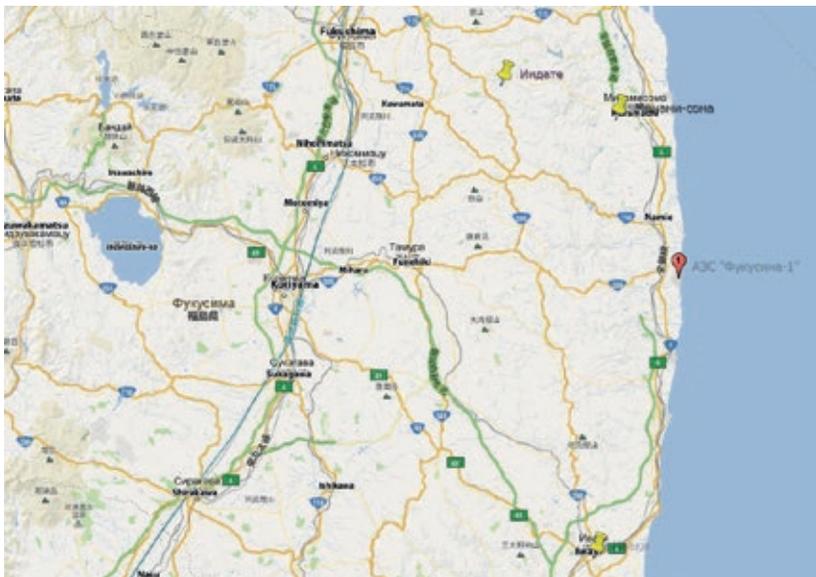


Рис. 13. Расположение населенных пунктов Минами-сома, Иивати и Маэда относительно АЭС «Фукусима-1»

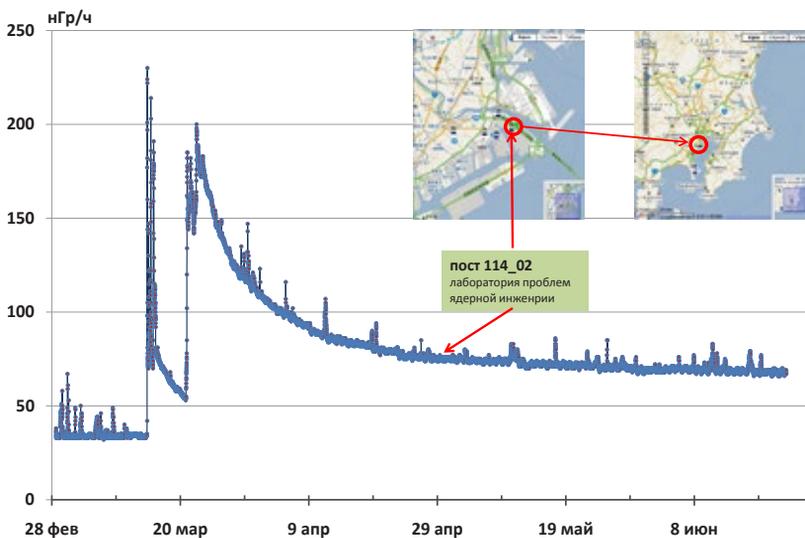


Рис. 14. Результаты измерений мощности дозы гамма-излучения датчиком 114_02 системы ЯАСКРО с марта по июнь 2011 г.

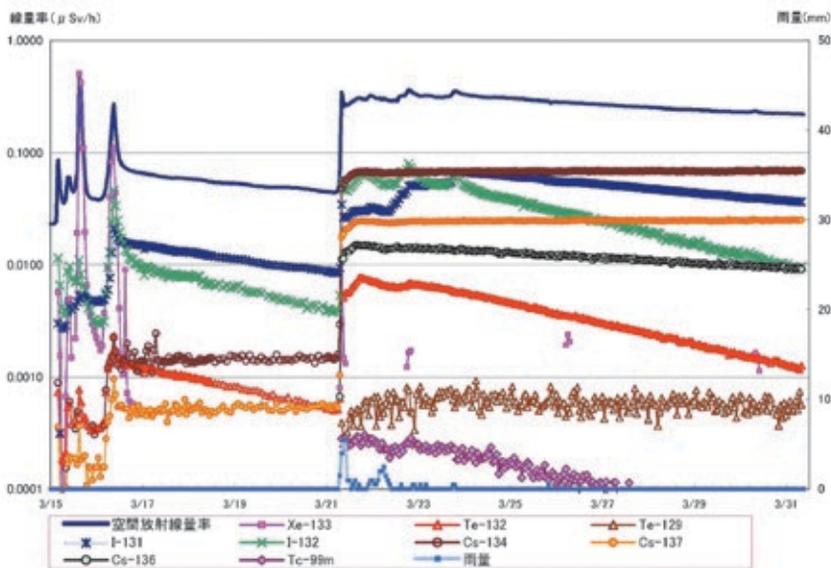


Рис. 15. Вклад отдельных радионуклидов в формирование мощности дозы гамма-излучения датчиком 114_02 системы ЯАСКРО в марте 2011 г. Синим цветом отмечена интенсивность атмосферных осадков в см

Из данных рис. 15 следует, что 15—16 марта, в период прохождения загрязненных воздушных масс над этим датчиком системы ЯАСКРО, основной вклад в мощность дозы гамма-излучения на открытой местности вносили ^{133}Xe и ^{132}I . После прохождения радиоактивного облака выброса возросла значимость ^{131}I . Важно отметить, что прошедшие 21 марта интенсивные осадки привели к увеличению почти на порядок суммарной мощности дозы гамма-излучения и существенному повышению вклада ^{134}Cs и ^{137}Cs в величину этой мощности дозы.

Информация о динамике выбросов радионуклидов, их радионуклидном составе и метеорологической ситуации в районе АЭС «Фукусима-1» позволила создать математическую модель формирования доз облучения населения, проживавшего в различных зонах радиоактивного загрязнения. В качестве нормирующего показателя была выбрана мощность дозы внешнего гамма-излучения на открытой местности на 26 марта 2011 г. (15-е сутки после останова реакторов 11 марта).

Основное внимание было уделено оценкам возможных доз внешнего облучения населения от радиоактивного облака и выпавших на поверхность земли радионуклидов. Возможные дозы внутреннего облучения (доза на щитовидную железу и эффективная доза на все тело) оценивались только для ингаляционного пути поступления. Значимость поступления радионуклидов по пищевым цепочкам как фактор радиационного воздействия не рассматривалась в связи с осуществленными правительством Японии в зоне радиоактивного загрязнения административными мероприятиями.

Различия в нуклидном составе выбросов, а также в условиях формирования радиоактивного следа (сухие и влажные выпадения) привели к разным закономерностям спада мощности дозы и динамики роста величины накопленной дозы внешнего гамма-излучения во времени (табл. 3). Интересно, что сравнение данных табл. 1 и 3 демонстрирует достаточную универсальность использованной методологии оценки доз внешнего облучения людей, поскольку даже для таких различных по условиям протекания и последствиям аварий, как Чернобыльская и на АЭС «Фукусима-1», значения пересчетных коэффициентов от мощности дозы на 15-е сутки после аварии к годовой дозе внешнего облучения практически совпадают.

Таблица 3. Расчетное изменение мощности дозы и накопленной дозы внешнего γ -излучения в различных частях зоны радиоактивного загрязнения местности после аварии на АЭС «Фукусима-1», нормированные на мощность дозы 1 мкЗв/ч, на 26 марта 2011 г.

Время	Мощность дозы, мкЗв/ч			Накопленная доза, мЗв		
	Северный след	Южный след	Северо-западный след	Северный след	Южный след	Северо-западный след
1 сут	4,2	—	—	0,03	—	—
2 сут	2,9	—	—	0,11	—	—
3 сут	2,6	—	—	0,18	—	—
4 сут	2,3	1,7	2,2	0,24	0,28	0,08
5 сут	2,1	1,6	2,0	0,29	0,32	0,14
7 сут	1,7	1,5	1,8	0,38	0,39	0,23
10 сут	1,4	1,3	1,4	0,49	0,49	0,34
15 сут	1,0	1,0	1,0	0,63	0,63	0,48
1 мес	0,57	0,70	0,45	0,92	0,93	0,75
1,5 мес	0,46	0,29	0,30	1,1	1,1	0,88
2 мес	0,43	0,18	0,25	1,3	1,2	0,98
3 мес	0,41	0,15	0,23	1,6	1,3	1,2
6 мес	0,38	0,14	0,22	2,4	1,6	1,7
9 мес	0,36	0,13	0,20	3,2	1,9	2,1
1 год	0,34	0,12	0,19	4,0	2,2	2,6

Представленные в табл. 3 оценки доз внешнего облучения человека получены без учета каких-либо защитных свойств зданий и сооружений, т. е. являются наиболее консервативными. Весьма важно, что с увеличением продолжительности облучения различия в накопленных дозах внешнего облучения от радиоактивных выпадений на северном, южном и северо-западном участках радиоактивного следа существенно уменьшаются, что связано с тем, что уже через несколько месяцев после аварии основной вклад в формирование этих доз начинают вносить изотопы цезия (^{134}Cs и ^{137}Cs).

Кроме того, удалось получить соотношения, позволяющие оценить значения доз внешнего и внутреннего облучения людей, нормированные на мощность дозы внешнего гамма-излучения на открытой местности на 15-е сутки после останова реакторов. Из табл. 4 следует, что значимость внешнего облучения людей от облака выброса невелика и составляет менее 2% дозы внешнего облучения от радиоактивных выпадений за первый год после аварии. В то же время наличие в выбрасываемой в атмосферу смеси изотопов йода и теллура (и особенно ^{131}I , ^{132}Te и ^{132}I) приводит к достаточно высокой оцениваемой дозе внутреннего облучения щитовидной железы людей. Как и в случае оценки доз по внешнему облучению, расчеты доз внутреннего облучения являются консервативными, так как предполагают, что в период прохождения радиоактивного облака человек находился на открытой местности с незащищенными органами дыхания.

Таблица 4. Расчетные дозы внешнего и внутреннего облучения взрослого человека за счет воздушных выбросов радионуклидов в различных частях зоны радиоактивного загрязнения местности после аварии на АЭС «Фукусима-1», нормированные на мощность дозы 1 мкЗв/ч, на 26 марта 2011 г.

Облучение	Северный след	Южный след	Северо-западный след
Внешнее от облака выброса, мЗв	0,041	0,028	0,0067
Внутреннее за счет ингаляции:			
щитовидная железа, мГр	0,65	2,0	0,39
эффективная на всё тело, мЗв	0,050	0,18	0,037
Внешнее в результате радиоактивных выпадений, мЗв:			
за 2 сут	0,11	—	—
за 10 сут	0,49	0,49	0,34
за 1 год	4,0	2,2	2,6

Тестирование корректности используемой схемы расчетов проводилось по тем точкам контроля, для которых имелись достоверные данные о динамике изменения мощности дозы в период прохождения радиоактивного облака, данные о реальной плотности радиоактивных выпадений отдельных

нуклидов и результаты измерений концентрации радиоактивных веществ в пробах приземного воздуха и растительности. Как уже отмечалось, практически в полной мере этим требованиям отвечали населенные пункты Минами-сома (северный след), Иваки (южный след) и Иидате (северо-западный след). Сравнение результатов расчетов спада мощности дозы гамма-излучения на открытой местности в марте-декабре 2011 г. с фактическими данными, полученными датчиками системы АСКРО для населенного пункта Минами-сома, представлено на рис. 16.

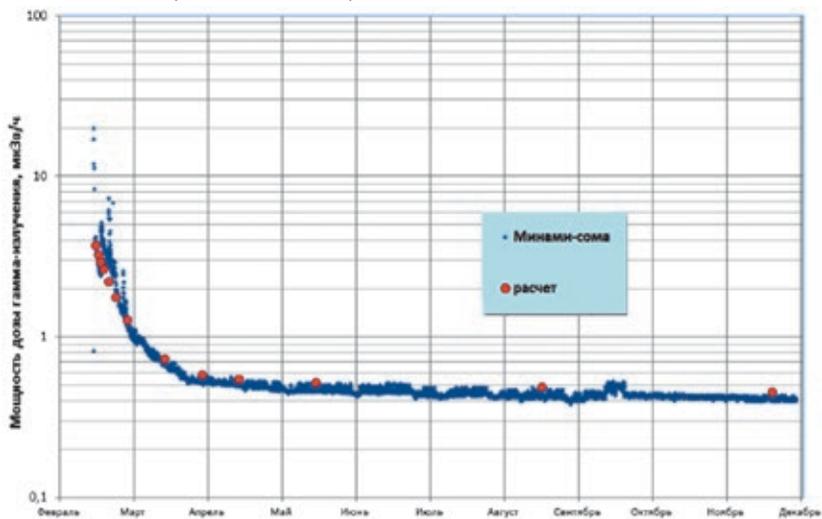


Рис. 16. Сравнение результатов расчетов и измерений мощности дозы гамма-излучения в населенном пункте Минами-сома в период с марта по декабрь 2011 г.

Как уже отмечалось, все результаты вычислений были нормализованы на величину мощности дозы гамма-излучения на открытой местности на 26 марта 2011 г. (15-й день после останова реакторов АЭС «Фукусима-1»), что позволило получить разумные оценки годовых доз облучения людей и в других населенных пунктах Японии в зонах радиоактивного загрязнения на северном, северо-западном и южном следах радиоактивных облаков.

Таким образом, на основе обобщения теоретических соображений, накопленного опыта и анализа прямых экспериментальных данных удалось получить простую методику оценки доз внешнего и внутреннего облучения людей, проживающих в зоне радиоактивного загрязнения после аварии на АЭС «Фукусима-1».

Литература

1. Sources and Effects of Ionizing Radiation. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, UNSCEAR 2008 Report to the General Assembly with scientific annexes. — Vol. II: Annex D. Health effects due to radiation from the Chernobyl accident / United Nations. — New York, 2011.
2. *Barkhudarov R. M., Gordeev K. I., Dibobes I. K.* et al. Methodological principles for calculating levels of external and internal exposure of the population used in taking strategic decisions / IAEA. — Vienna, 1989. — P. 171—182. — (IAEA-TECDOC-516) (http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/te_516_web.pdf).
3. Результаты анализа радионуклидов в почве: Отчет Министерства образования, культуры, спорта и науки (MEXT) от 30 сентября 2011 г. (на японском языке) (<http://www.mext.go.jp/>).
4. *Morino Y., Ohara T., Nishizawa M.* Atmospheric behavior, deposition, and budget of radioactive materials from the Fukushima Daiichi nuclear power plant in March 2011 // *Geophys. Res. Lett.* — 2011. — 38. — L00G11 (<http://www.agu.org/pubs/crossref/2011/2011GL048689.shtml>).
5. *Pavlovskiy O., Panchenko S.* Estimation of possible radiation doses for population of Japan as a result of Fukushima-1 accident on the basis of Chernobyl experience // *Book of Abstracts of the International Symposium on the Natural Radiation Exposures and Low Dose Radiation Epidemiological Studies (NARE 2012)*, 2012, February 29 — March 03, Hirosaki, Japan. — [S. l.], 2012. — P. 52.
6. Моделирование распространения радионуклидов в окружающей среде. — М.: Наука, 2008. — 229 с. — (Труды ИБРАЭ РАН / Под ред. Л. А. Большова; Вып. 9).
7. *Pretzsch G., Hannstein V., Schrödl V., Wehrfritz M.* Radioactive inventory at the Fukushima NPS // *Proceedings of the 2011 EUROSAFE Forum “Nuclear safety: new challenges, gained experience and public expectations”*, Paris, 7—8 November, 2011. — [S. l.], 2011 (http://www.eurosafe-forum.org/userfiles/2_1_%20slides_Radioact%20inventory_Pretzsch_20111108.pdf).
8. *Бакин Р. И., Киселев А. Е., Тарасов В. И.* и др. Зависимость от выгорания накопления ^{134}Cs и ^{137}Cs в активной зоне блока № 2 АЭС «Фукусима-1». — В настоящем издании.

9. Report of Japanese Government to the IAEA Ministerial Conference on Nuclear Safety — The Accident at TEPCO's Fukushima Nuclear Power Stations. June 2011 // <http://www.iaea.org/newscenter/focus/fukushima/japan-report/>.
10. *Stohl A., Seibert P., Wotawa G.* 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 // *Atmos. Chem. Phys. Discuss.* — 2011. — Vol. 11. — P. 28319—28394 (<http://www.atmos-chem-phys-discuss.net/11/28319/2011/acpd-11-28319-2011.html>).
11. *Chino M., Nakayama H., Nagai H.* et al. Preliminary Estimation of Release Amounts of ^{131}I and ^{137}Cs Accidentally Discharged from the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant into the Atmosphere // *J. Nucl. Sci Technol.* — 2011. — 48 (7). — P. 1129—1134.

Функционирование ТКЦ ИБРАЭ РАН в начальной фазе аварии на АЭС «Фукусима-1»

*Р. В. Арутюнян, Л. А. Большов, С. И. Воронов, А. Е. Киселев,
С. Н. Красноперов, О. А. Павловский, С. В. Панченко,
Д. А. Припачкин, В. Ф. Стрижов*

В 1996 г. в ИБРАЭ РАН был создан и начал функционировать Технический кризисный центр (ТКЦ), основными задачами которого являются:

- оценка и прогнозирование основных характеристик источника радиоактивного выброса при авариях и инцидентах;
- прогнозирование загрязнения объектов окружающей среды с учетом данных радиационного мониторинга;
- оценка и прогнозирование доз облучения населения;
- выработка рекомендаций по защите населения и объектов окружающей среды;
- оценка эффективности защитных мероприятий и их оптимизация для конкретных условий с учетом радиационных, экономических и социальных факторов.

Эксперты ТКЦ в круглосуточном режиме на основе соответствующих соглашений осуществляют научно-техническую поддержку Национального центра по управлению в кризисных ситуациях (НЦУКС) МЧС России, Ситуационно-кризисного центра (СКЦ) Росатома (рис. 1).

В 13 часов 11 марта 2011 г., сразу после появления первых сообщений о катастрофическом землетрясении и вызванном им цунами у восточных берегов Японии, а также о возникших вследствие этого проблемах с охлаждением реакторных установок АЭС «Фукусима-1», ТКЦ ИБРАЭ РАН был переведен в режим повышенной готовности в полном штатном составе.

В соответствии с регламентом эксперты ТКЦ должны были обеспечить поддержку НЦУКС МЧС России и СКЦ Росатома по следующим направлениям:

- прогнозирование ситуации на АЭС Японии, попавших в зону воздействия землетрясения (во взаимодействии с Росатомом);
- прогнозирование радиационной обстановки в районе размещения АЭС «Фукусима-1» и «Фукусима-2» при неблагоприятных сценариях развития;

- прогнозирование радиационной обстановки на территории России при неблагоприятном развитии ситуации на АЭС Японии (совместно с Росгидрометом, НПО «Тайфун»).

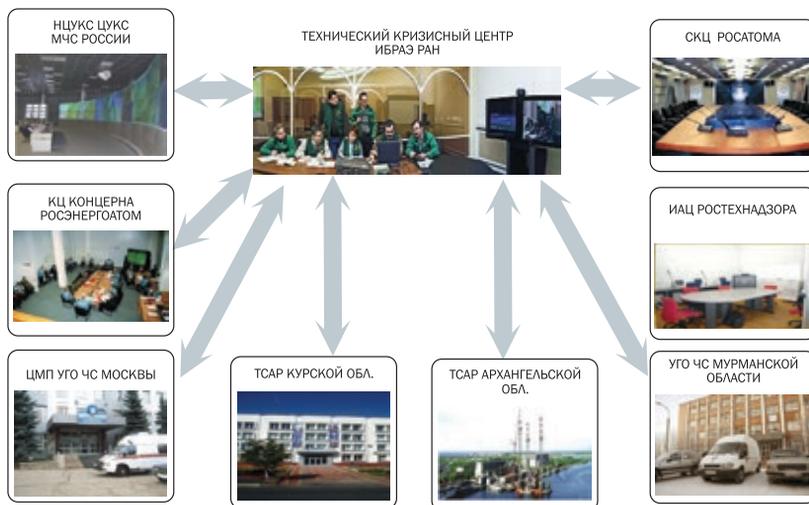


Рис. 1. Схема организации научно-технической поддержки, осуществляемой экспертами ТКЦ ИБРАЭ РАН

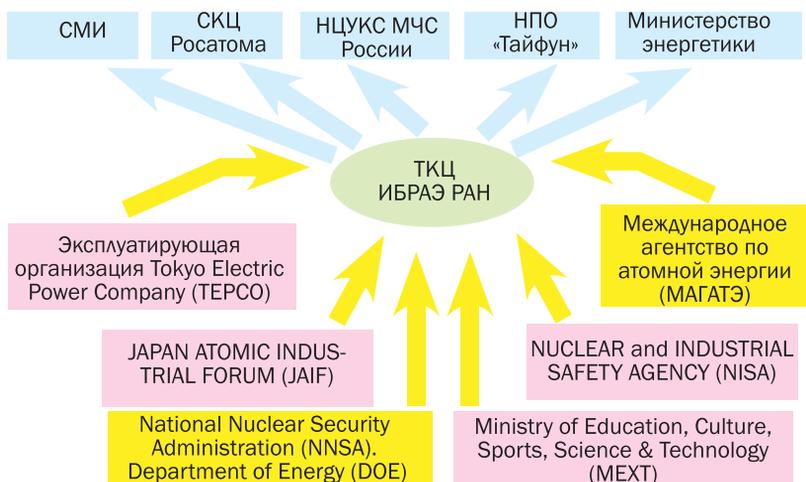


Рис. 2. Схема организации круглосуточного сбора и предоставления информации экспертами ТКЦ ИБРАЭ РАН по аварии на АЭС «Фукусима-1»

Схема организации экспертами ТКЦ ИБРАЭ РАН круглосуточного сбора и предоставления всем заинтересованным организациям информации по анализу причин и прогнозу возможных последствий аварии на АЭС «Фукусима-1» представлена на рис. 2.

Первое сообщение, подготовленное экспертами ТКЦ ИБРАЭ РАН уже к вечеру 11 марта 2011 г., носило информационный характер и обобщало собранную к этому моменту информацию из официальных японских источников (рис. 3).

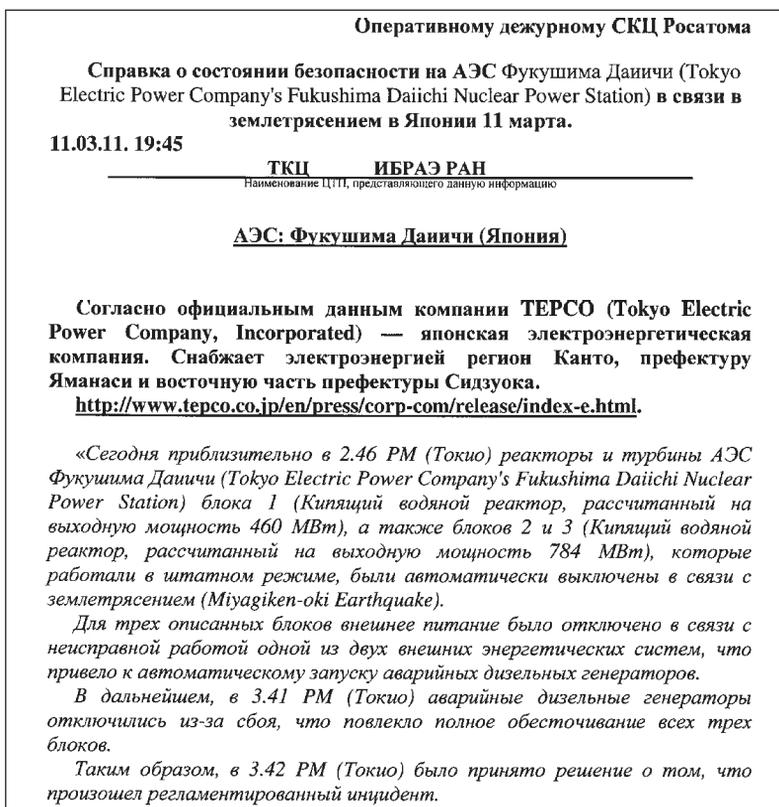


Рис. 3. Фрагмент первого сообщения, подготовленного экспертами ТКЦ ИБРАЭ РАН 11 марта 2011 г.

Возможность неблагоприятного развития аварии с плавлением активной зоны и выходом значительной части радионуклидов за пределы контура охлаждения из трех автоматически остановленных после землетрясения реакторов АЭС «Фукусима-1» и хранилища отработавшего ядерного топли-

ва энергоблока № 4 была рассчитана с помощью разработанного в ИБРАЭ РАН компьютерного кода СОКРАТ [1; 2]. В качестве исходных использовали официальные данные эксплуатирующей компании TEPCO, надзорного органа Японии NISA и неправительственной организации JAIF, МАГАТЭ, а также описания систем реакторных установок типа BWR, размещенные в Интернете.

Реакторные установки для энергоблоков № 1, 2 и 6 АЭС «Фукусима-1» были сооружены корпорацией «General Electric», для блоков № 3 и 5 — «Toshiba», для четвертого — «Hitachi». Все шесть реакторов были спроектированы специалистами «General Electric». Некоторые характеристики энергоблоков АЭС «Фукусима-1» представлены в табл. 1.

Таблица 1. Некоторые характеристики энергоблоков АЭС «Фукусима-1»

Энергоблок	Тип реактора	Электрическая мощность, МВт		Начало строительства	Энергопуск	Ввод в эксплуатацию
		чистая	брутто			
1	BWR-3	439	460	25.07.1967	17.11.1970	26.03.1971
2	BWR-4	760	784	09.06.1969	24.12.1973	18.07.1974
3	BWR-4	760	784	28.12.1970	26.10.1974	27.03.1976
4	BWR-4	760	784	12.02.1973	24.02.1978	12.10.1978
5	BWR-4	760	784	22.05.1972	22.09.1977	18.04.1978
6	BWR-5	1067	1100	26.10.1973	04.05.1979	24.10.1979

На ранней стадии развития аварии (11—12 марта) в условиях отсутствия достоверных (документированных) сведений о развитии ситуации и принимаемых персоналом противоаварийных мерах расчетные анализы развития аварии в консервативных условиях полного обесточивания энергоблоков с одновременным отказом всех систем безопасности (включая и пассивные системы) выполнялись для экспресс-оценок гипотетических выбросов активности в окружающую среду. Более реалистичные анализы, привязанные к доступным и оцененным нами в качестве достоверных сведениям по противоаварийным мерам, были выполнены на второй стадии развития аварии (с 12 марта). Результаты вычислений использовались для количественных оценок, определяющих возможную временную динамику развития аварийных ситуаций на энергоблоках № 1—3 и в бассейне выдержки блока № 4, в том числе:

- активности продуктов деления в активной зоне и в бассейне выдержки отработавшего топлива;
- изменения мощности остаточного тепловыделения, радионуклидного состава и динамики выхода продуктов деления из твэлов под защитную

оболочку реакторов и в окружающую среду при ухудшении аварийной ситуации на АЭС;

- последовательности и времени возникновения ключевых событий (потери конечного стока тепла, осушении, разогрева и разрушения активной зоны, сброса давления в реакторе и защитной оболочке, взрыва водорода);
- состояния и степени возможного повреждения активной зоны и корпуса реактора в различные моменты протекания аварии;
- возможности детонации водорода;
- прогнозов дальнейшего развития ситуации (возможности и необходимых условий для внутрикорпусного удержания расплава).

По имевшимся данным, на энергоблоках № 1—3 11 марта 2011 г. в результате землетрясения и последующего цунами возникла аварийная ситуация, сопровождавшаяся потерей внешнего электропитания. В результате сработала аварийная защита энергоблоков № 1—3, и все реакторы были заглушены. Далее автоматически запустились резервные дизель-генераторы, но, по сообщениям ТЕРСО, примерно через час все они отказали вследствие цунами, вызванного землетрясением. После потери источников переменного тока оставалось только электропитание от аккумуляторных батарей постоянного тока, рассчитанных примерно на 8 ч работы. После прибытия на площадку АЭС дополнительных дизель-генераторов подключить их, видимо, оказалось невозможно из-за затопления площадки и соответствующих строений, а также других повреждений. В результате произошло полное обесточивание энергоблоков станции.

После потери работоспособности этих систем началось снижение уровня воды и рост давления в реакторах. Постепенное осушение активной зоны привело к разогреву твэлов. Действия операторов как на этапе снижения давления в первом контуре и контейнменте, так и на этапе подачи морской воды оказались неэффективными с точки зрения сохранения конструкционной целостности активной зоны.

В условиях отсутствия достоверной информации о развитии аварии на энергоблоке № 1 эксперты ТКЦ ИБРАЭ РАН уже к утру 12 марта 2011 г. выполнили предварительные консервативные расчеты наиболее неблагоприятного сценария (предположение о полном обесточивании и неработоспособности систем отвода остаточного тепловыделения) для оценки максимально возможных выбросов радиоактивных веществ в окружающую среду. В результате была составлена временная шкала ключевых событий,

проведены оценки выбросов и прогнозы распределения радиоактивности и доз облучения для различных территорий при самых неблагоприятных метеоусловиях.

Первый прогноз возможной радиационной обстановки в районе Владивостока в предположении о неблагоприятном сценарии развития событий на четырех блоках АЭС «Фукусима-1» и продвижении радиоактивного облака в сторону Приморского края был подготовлен вечером 11 марта 2011 г. (рис. 4а) и направлен экспертами ТКЦ в НЦУКС МЧС России 12 марта 2011 г., т. е. еще задолго до радиоактивного загрязнения значительных территорий Японии (рис. 4б).

Расчеты показали, что при всех возможных консервативных предположениях (вплоть до плавления топлива трех реакторов и в бассейне хранения отработавшего топлива, интенсивных осадков в районе Владивостока и др.) облучение жителей города не превысит 10 мЗв за первый год, т. е. мероприятий по защите населения не потребуется.



Рис. 4а. Консервативный прогноз возможной радиационной обстановки в районе Владивостока в предположении о неблагоприятном сценарии развития событий на всех четырех блоках АЭС «Фукусима-1», подготовленный экспертами ТКЦ ИБРАЭ РАН вечером 11 марта 2011 г.

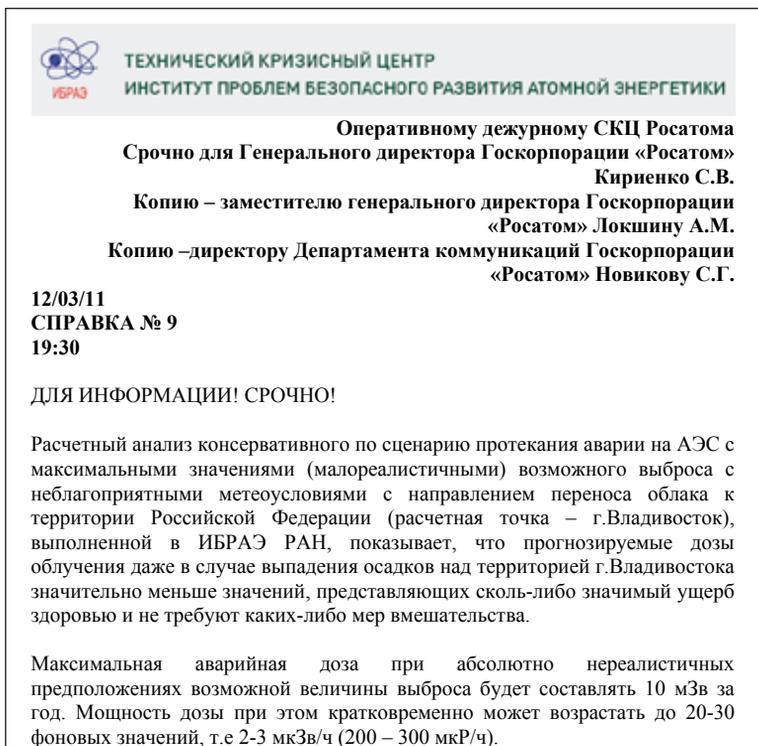


Рис. 4б. Справка, направленная от ТКЦ ИБРАЭ РАН вечером 12 марта 2011 г. оперативному дежурному СКЦ Росатома

Параллельно с расчетами и составлением прогнозов, эксперты ТКЦ ИБРАЭ РАН с первых часов после аварии начали активный мониторинг зарубежных источников информации о радиационной обстановке в Японии и на прилегающих территориях (акваториях), которые бы могли дополнить официальные источники и данные служб радиационного мониторинга России.

Расчеты показали, что в этом случае протекание аварии достаточно скоротечно и уже примерно через 2 ч с момента исходного события теряется второй барьер безопасности (оболочка твэла), через 13 ч — третий барьер безопасности (корпус реактора) и через 7 дней от начала аварии разрушается конфайнмент (внешняя обстройка реакторного здания).

Соответствующая хронология событий представлена в табл. 2.

Таблица 2. Хронология прогнозируемых событий при аварии «полное обесточивание» в предположении отсутствия теплообмена через систему Isolation Condenser на энергоблоке № 1 АЭС «Фукусима-1»

Время	Событие
0 часов	Полное обесточивание энергоблока с отказом всех систем аварийного расхолаживания, включая пассивные
2 часа 20 мин	Начало бурной пароциркониевой реакции
2 часа 30 мин	Начало плавления оболочек твэлов
3 часа 30 мин	Срабатывание системы сброса давления силового корпуса по низкому уровню в активной зоне, переход на сценарий с низким давлением в первом контуре
5 часов	Начало плавления топлива
7 часов	Выход расплава на днище корпуса реактора, начало выпаривания воды в подзонном пространстве, частичное охлаждение расплава
12 часов	Полное осушение корпуса реактора, повторный разогрев расплава, взаимодействие с корпусом реактора
13 часов	Разрушение стенки корпуса реактора, выход расплава в бетонную шахту, начало взаимодействия с бетонным основанием шахты
7 дней	Сквозное проедание расплавом бетона, стальной стенки сухого бокса контейнента (drywell), бетонного основания конфайнмента (всего примерно 6 м), выход расплава за пределы конфайнмента

Результаты этих оценок наиболее неблагоприятного развития ситуации были переданы в оперативный штаб для постоянного мониторинга ситуации на АЭС Японии и оперативного реагирования 13 марта 2011 г.

14 мая 2011 г. поручением первого заместителя председателя Правительства РФ были определены задачи ТКЦ ИБРАЭ РАН в связи с аварией на АЭС в научно-технической поддержке МЧС, Росатома, Росгидромета (рис. 5).

В дальнейшем многие технологические процессы на аварийных блоках АЭС «Фукусима-1» вышли из-под контроля персонала. Информация, поступающая от официальных источников из Японии, отличалась в первые дни противоречивостью и неполнотой. В этих условиях данные мониторинга, в первую очередь автоматической системы контроля за радиационной обстановкой Японии (ЯАСКРО), загрязнения различных объектов внешней среды в районе АЭС и за его пределами стали для специалистов ТКЦ действенным инструментом анализа и прогноза ситуации.

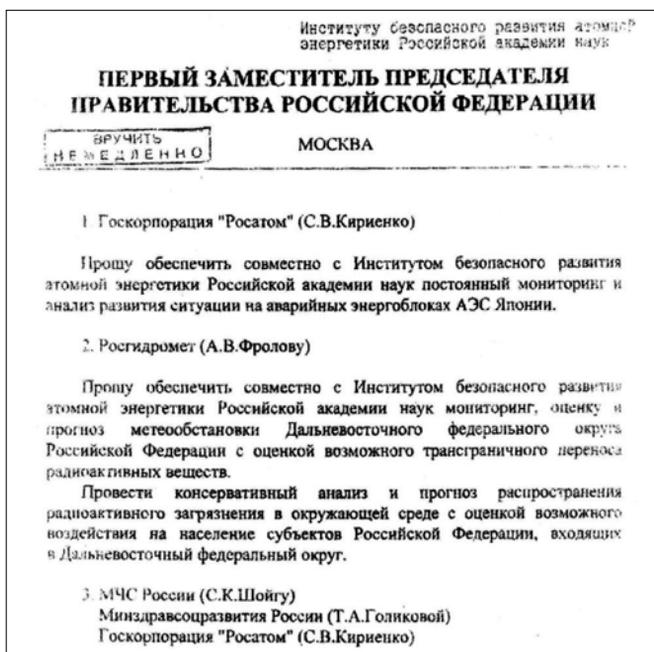


Рис. 5. Фрагмент постановления первого заместителя председателя Правительства РФ о срочных мерах по анализу возможных последствий аварии на АЭС «Фукусима-1» для населения субъектов Российской Федерации

В дальнейшем, после получения данных об уровне теплоносителя в реакторе энергоблока № 1 в первые 2—4 суток после аварии были получены более реалистичные расчетные данные (см., например, представленные на рис. 6 данные о параметрах состояния энергоблока № 1, основанные на материалах, помещавшихся на сайте компании TEPCO — <http://www.tepco.co.jp/en/nu/fukushima-np/index-e.html>), что позволило увеличить время до наступления ключевых событий (интенсивная генерация водорода, плавление активной зоны) на этом энергоблоке примерно на 20 ч.

Поскольку детали конструкции бассейна выдержки энергоблока № 4 были неизвестны, удельное количество воды на каждую ТВС пересчитывали, исходя из известных данных об общем мокром хранилище и предположения об отсутствии действий по подпитке аварийной водой. В этих предположениях была оценена возможность начала окисления оболочек твэлов и генерации водорода, накопление которого могло привести к последующей детонации в центральном зале энергоблока № 4.

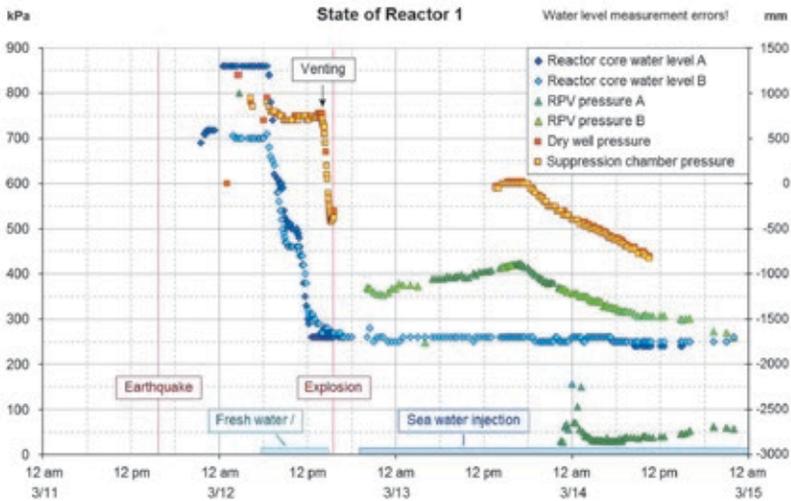


Рис. 6. Данные о параметрах состояния энергоблока № 1 АЭС «Фукусима-1», основанные на размещавшихся на сайте компании TEPCO материалах

В целом результаты расчетов свидетельствовали о достаточно хорошем соответствии оценок динамики протекания процессов и моментов наступления ключевых событий, приведших к тяжелым радиационным последствиям как на площадке размещения АЭС, так и далеко за ее пределами (табл. 3).

Таблица 3. Расчетное и фактическое время взрыва водорода на АЭС «Фукусима-1» с 12 по 15 марта 2011 г.

Энергоблок	Время (местное)	
	Оцененное	Фактическое
1	12 марта, 16 часов 25 мин	12 марта, 15 часов 36 мин
2 (пик давления в защитной оболочке после подачи аварийной воды в активную зону)	15 марта, 5 часов 45 мин	15 марта, 6 часов 20 мин
3	—	14 марта, 11 часов 1 мин
4	15 марта, 21 час 0 мин	15 марта, 6 часов 0 мин

Как следствие нарушений в системах охлаждения реакторов АЭС «Фукусима-1» уже 11 марта 2011 г. было принято решение об эвакуации населения, проживавшего на удалении до 2 км от АЭС. Однако произошедший 12 марта взрыв водорода на блоке № 1, сопровождавшийся разрушением здания реактора, и неопределенность ситуации на двух других блоках привели к решению об увеличении зоны эвакуации до 20 км, что коснулось

примерно 150 тыс. жителей, а в зоне от 20 до 30 км населению было рекомендовано оставаться в домах за закрытыми дверями. Карта зон эвакуации жителей из 20- и 30-километровой зон в районе АЭС «Фукусима-1» представлена на рис. 7.



Рис. 7. Зоны эвакуации и укрытия в первые дни после аварии на АЭС «Фукусима-1»

Поскольку в выбросах наряду с благородными газами были изотопы радиоактивного йода, было решено начать йодную профилактику среди персонала и населения. Следует отметить, что в число эвакуированных вошли не только те, кто мог подвергнуться воздействию радиации, но и пострадавшие от катастрофического землетрясения и цунами.

Наибольшую информационную ценность, особенно в первые дни после аварии, представляли данные ЯАСКРО, датчики которой размещены в районах расположения ядерных и радиационно-опасных объектов в 19 из 47 префектур. Общее число датчиков — 218, из них в первые дни после аварии в режиме онлайн передавали информацию 174 датчика (рис. 8).

На каждом посту ЯАСКРО с интервалом в 10 мин измеряли мощность дозы гамма-излучения на открытой местности, скорость и направление приземного ветра, а на некоторых постах — также количество атмосферных осадков (рис. 9).

Префектура	Число постов	Из них не работают
Хоккайдо	9	
Аомори	15	
Мияги	7	7
Фукусима	23	23
Ибараки	39	2
Канагава	13	
Ниигата	11	
Исикава	10	10
Фукуи/Киото	18+6	1
Сидзуока	15	
Осака	15	
Окаяма/ Тоттори	1+3	
Симанэ	11	1
Эхимэ	8	
Сага/ Нагасаки	1+6	
Кагосима	7	
Всего	218	44



Рис. 8. Количество постов и датчиков по измерению мощности дозы на территории Японии включая количество датчиков, которые были отключены по разным причинам после аварии на АЭС «Фукусима-1»

Неоценимую помощь в анализе складывавшейся ситуации оказывали показания датчиков системы автоматического контроля радиационной обстановки на площадках размещения АЭС «Фукусима-1» и «Фукусима-2» (рис. 10).

Из представленных на рис. 11 данных видно, что взрыв водорода в 15 часов 36 мин 12 марта по местному времени на блоке № 1 АЭС «Фукусима-1» привел не только к резкому росту мощности дозы гамма-излучения, но и к заметному загрязнению территории в районе размещения датчика.

Все события на станции, сопровождавшиеся выбросом радиоактивных веществ в атмосферу, можно проследить по данным рис. 12, на котором помимо показаний датчика на главных воротах приведена информация с датчиков на западных воротах и административном здании АЭС.

В связи с выходом из строя стационарных датчиков в префектуре Фукусима японские официальные органы организовали регулярный контроль за мощностью дозы гамма-излучения на удалении 20—60 км от АЭС с помощью мобильных групп радиационной разведки и передвижных лабораторий, которые также производили отбор проб воздуха, почвы, травы и других объектов окружающей среды.

Ibaraki		2011/03/15 1850 Collection data			
No.	Observation office	Rate of space dose (nGy/h)	Wind Direction	Wind Velocity (m/s)	Precipitation (mm)
1	Ishigami Tokai Village	785	NE	1.9	---
2	Toyooka Tokai Village	423	NNE	4.1	---
3	Funaishikawa Toukai Village	206	NE	3.4	---
4	Yokobori Naka City	334	E	2.7	---
5	Oshinobe Tokai Village	338	NE	4.1	0.0
6	Muramatsu Tokai Village	274	NE	2.8	---
7	Mawatari Hitachinaka City	340	NNE	4.1	---
8	Onuki Oarai Town	250	NNE	2.6	0.0
9	Hiroura Ibaraki Town	375	NE	3.3	---
10	Tsukuriya Hokota City	284	N	3.3	---
11	Araji Hokota City	139	NE	4.4	---
12	Hitachinaka Hitachinaka City	387	E	2.9	---
13	Ajigaura Hitachinaka City	217	NE	5.1	---
14	Ishikawa Mito City	234	E	2.4	---
15	Horiguchi Hitachinaka City	1139	NNE	3.0	---
16	Kuji Hitachi City	825	NE	4.2	---
17	Isobe Hitachioota City	531	NE	2.7	---
18	Kadobe Naka City	830	ENE	1.2	---
19	Sugaya Naka City	249	NE	2.7	---
20	Oba Mito City	173	NNE	1.3	---
21	Ebisawa Ibaraki Town	221	NE	0.9	---
22	Sawa Hitachinaka City	801	---	---	---
23	Yanagisawa Hitachinaka City	264	NNE	3.2	0.0
24	Motokomezaki Naka City	Under servey	---	---	---
25	Nukada Naka City	351	---	---	---
26	Kounosu Naka City	449	NE	1.5	0.0
27	Godai Naka City	431	---	---	---
28	Onuma Hitachi City	483	NE	3.4	0.0
29	Mayumi Hitachiota City	354	---	---	---
30	Uridura Naka City	238	---	---	---
31	Nemoto Hitachioomiya City	351	NNE	1.7	0.0
32	Kume Hitachiota City	184	NNE	1.9	---
33	Ischama Oarai Town	177	---	---	---
34	Tasaki Hokota City	Under servey	---	---	---
35	Momiyama Hokota City	415	---	---	0.0
36	Yatabe Ibaraki Town	215	---	---	---
37	Yoshizawa Mito City	191	ENE	3.0	0.0
38	Kamitoda Hokota City	166	---	---	0.0
39	Tokushuku Hokota City	142	ENE	2.5	---

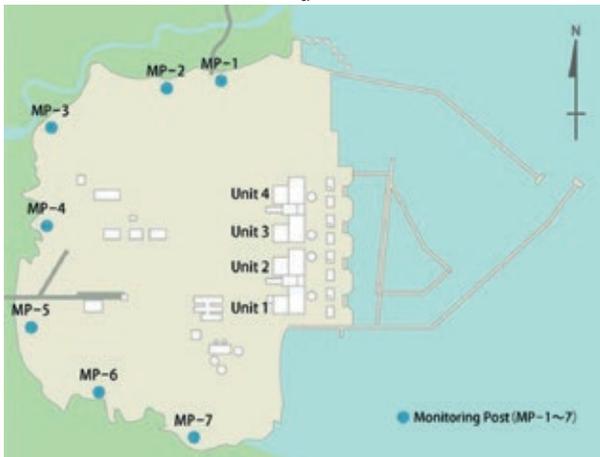
Рис. 9. Пример отображения информации по префектуре Ибаракки на сайте <http://www.bousai.ne.jp/eng>

Большой интерес представляли и данные контроля за загрязнением воздуха в рамках Международной системы мониторинга, которая представляет собой глобальную сеть датчиков обнаружения и регистрации событий, свидетельствующих о возможном проведении ядерных взрывов [3].

Подробные данные о загрязнении воздуха ^{95}Nb , ^{131}I , ^{132}Te , ^{133}Xe , ^{137}Cs и ^{140}La с 11 марта по 31 мая 2011 г. на станции мониторинга RN38 в префектуре Гумма (примерно в 200 км к югу от АЭС «Фукусима-1») были опубликованы в [4].



а



б

Рис. 10. Датчики системы автоматического радиационного контроля на площадках размещения АЭС «Фукусима-1» (а) и «Фукусима-2» (б)

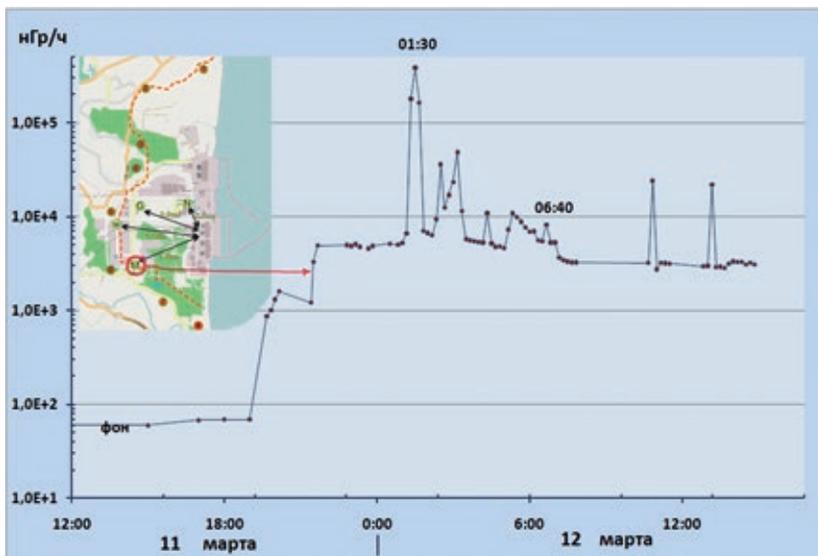


Рис. 11. Динамика изменения мощности дозы в точке контроля «М» на главных воротах АЭС «Фукусима-1» с начала останова реакторов (время UTC).
Рисунок с сайта <http://www.rchoetzlein.com>

Обработка поступающей информации позволила начать работы по моделированию атмосферного переноса радионуклидов на основе лагранжевой стохастической методики расчета дисперсии радионуклидов в атмосфере [5]. Эта методика позволяет рассчитывать распространение в атмосфере и выпадение радионуклидов на поверхность земли от источника произвольного нуклидного состава с учетом цепочек распада в соответствующих метеорологических условиях. Она представляет собой вычислительное ядро разработанного расчетного кода НОСТРАДАМУС [6].

Метеорологическую ситуацию в районе АЭС моделировали с помощью версии региональной гидродинамической модели WRF-ARW (США), а также возможностей Гидрометцентра России. Цель моделирования — оценка активности посуточных выбросов радионуклидов с различных реакторов аварийной АЭС, а также прогноз возможности ухудшения радиационной обстановки на территории восточных регионов России.

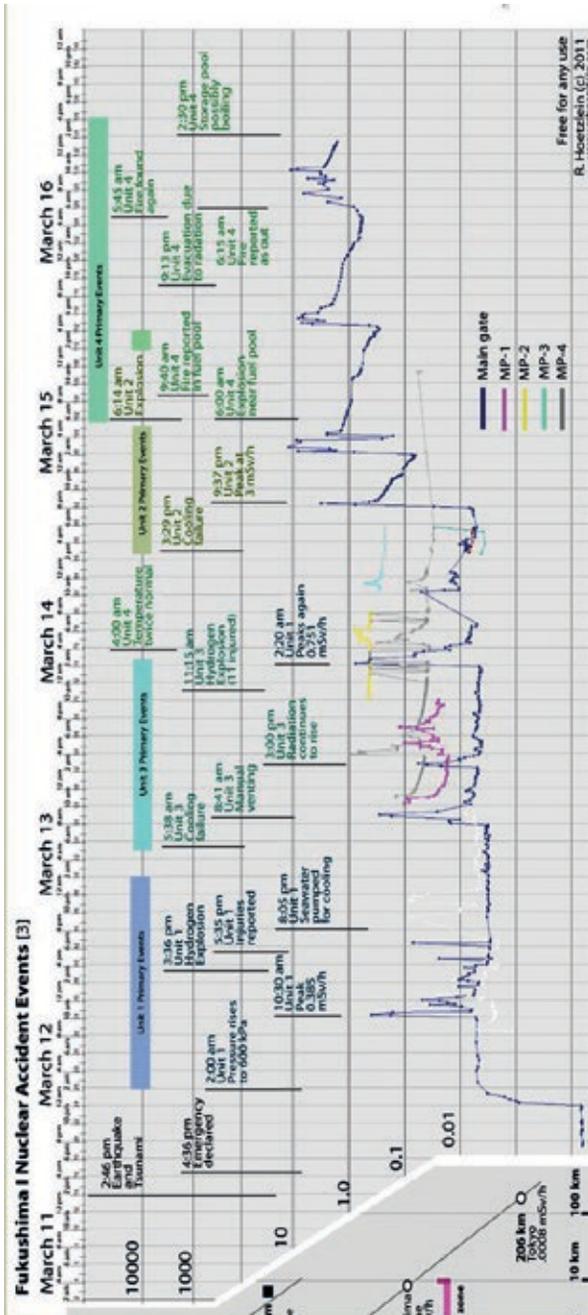


Рис. 12. Динамика мощности дозы в разных точках контроля на промплощадке АЭС «Фукусима-1» с момента останова реакторов до 16 марта, мкГр/ч (время японское — UTC+9). Источник: <http://www.rchoetzlein.com>

В качестве граничных условий использовался прогноз Национального центра прогнозирования поведения окружающей среды (NCER, США) с пространственным разрешением $0,5^\circ$ по горизонтали, 27 уровней по вертикали с временным шагом 6 ч. Для оценки переноса радиоактивных веществ с помощью компьютерного кода НОСТРАДАМУС были использованы рассчитанные по модели WRF-ARW поля ветра и температуры, интерполированные в точку размещения АЭС «Фукусима-1».

На первом этапе оценок с использованием данных о погодных условиях в районе аварии были рассчитаны параметры радиационной обстановки на территории Японии в консервативном предположении, что все вышедшие из топлива ядерных реакторов радионуклиды попали в атмосферу. Следует отметить, что метеорологическая ситуация с 11 по 14 марта 2011 г. была очень сложной и переменчивой. В этот период над районом АЭС «Фукусима-1» преобладал главным образом перенос воздушных масс на восток, и радиоактивные продукты воздушных выбросов с аварийных блоков АЭС сносились в основном в Тихий океан. Однако в отдельные интервалы времени ветер менялся и был направлен в сторону территории Японии, что привело к загрязнению отдельных ее участков. К 15 марта ветер повернул на юг и юго-запад, в сторону суши. При этом 15 марта в связи с подходом с юго-запада мощного циклона начались интенсивные осадки, резко усилившие процессы радиоактивного загрязнения местности. Прогнозирование возможных траекторий переноса радионуклидов на основе анализа локальных атмосферных данных показало, что возникает ситуация, при которой интенсивному радиоактивному загрязнению подвергнутся территории Японии к югу и северо-западу от АЭС «Фукусима-1». Перенос воздушных масс в сторону моря восстановился только к 20 часам 15 марта. Далее до 20 марта над АЭС преобладал умеренный западный ветер, что приводило к переносу радиоактивных выбросов в сторону Тихого океана.

На основе подробных данных о состоянии атмосферы в ночное и утреннее время 15 марта 2011 г. с учетом полей скорости ветра в слое до 2—3 км была рассчитана мощность дозы в отдельных точках мониторинга на территории Японии. Существенную неопределенность в этих оценках наряду с особенностями локальных аэрографических и погодных условий вносит оценка высоты выброса. Использованный подход к оценке высоты аварийных выбросов на АЭС «Фукусима-1» близок к описанному в [3].

Результаты моделирования показали, что в районе площадки АЭС «Фукусима-2» мощность дозы гамма-излучения после прохождения облака могла

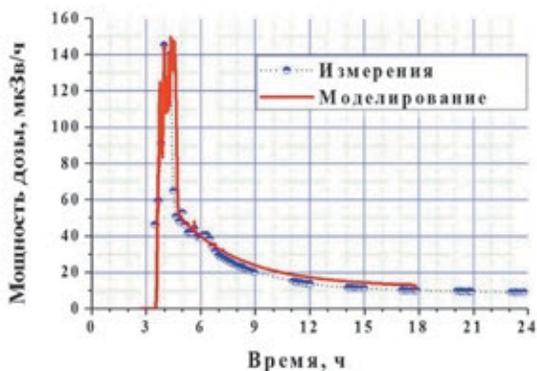
составить 10—20 мкЗв/ч, в префектуре Ибараки — 1—2 мкЗв/ч. Это совпадает с результатами измерений мощности дозы датчиками мониторинга радиационной обстановки в точках контроля. Из представленных на рис. 13 данных также видно, что прогнозируемый приход радиоактивного облака в точки контроля соответствует времени регистрации существенного роста мощности дозы.

Аналогичные вычисления для других точек радиационного контроля позволили оценить возможную активность мощного выброса радиоактивных веществ в атмосферу с энергоблока № 2 АЭС «Фукусима-1» 15 марта 2011 г. Результаты этих оценок в сравнении с представленными в различных публикациях расчетами суммарной активности выброса с АЭС «Фукусима-1» представлены в табл. 4.

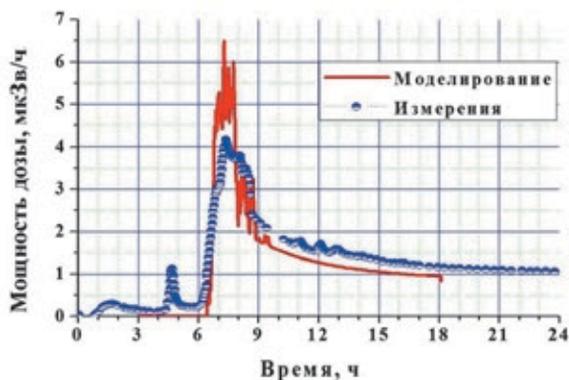
В июне 2011 г. в Правительственном докладе Японии [7], представленном в МАГАТЭ, были приведены оценки выбросов 31 радионуклида с АЭС «Фукусима-1», которые эксперты ТКЦ использовали для прогнозирования радиационной ситуации на территории Японии и в восточных регионах России. Кроме того, в расчетах использовались данные о посуточных выбросах ^{133}Xe и ^{137}Cs с аварийных энергоблоков АЭС, полученные на основании данных [3]. Все варианты оценок, как и описанный ранее прогноз от 12 марта 2011 г., показывали, что радиационная обстановка на российской территории не потребует мер защиты населения.

Анализ радиационной обстановки на территории Японии после аварии на АЭС «Фукусима-1» свидетельствует о формировании с 11 по 25 марта 2011 г.:

- *Северного радиоактивного следа*, возникшего в результате выброса радионуклидов после взрыва водорода в 15 часов 36 мин 12 марта по местному времени на первом блоке. В результате перемещения воздушных масс на север от АЭС на территориях префектур Фукусима и Мияги образовались зоны повышенного радиоактивного загрязнения. Во второй половине 18 марта произошло небольшое дополнительное загрязнение этих территорий.
- *Южного радиоактивного следа* как результата ночных сдувок с энергоблока № 2 с 14 по 15 марта и последовавшего на этом энергоблоке взрыва 15 марта в 6 часов 10 мин. Эти выбросы привели к радиоактивному загрязнению территорий префектур Фукусима, Ибараки и Канагава. Именно в результате этих выбросов было отмечено повышение природного радиационного фона в Токио.



а



б

Рис. 13. Расчетные и фактические данные по изменению мощности дозы гамма-излучения на площадке АЭС «Фукусима-2» (а) и в префектуре Ибараки (б)

Таблица 4. Активность выбросов радиоактивных веществ АЭС «Фукусима-1» по данным разных источников информации и оценок ИБРАЭ РАН, ЭБк

^{133}Xe	^{131}I	^{137}Cs	Всего	Источник информации
11	0,16	0,015	11	[7]
13	—	0,025	—	[3]
—	0,13	0,0061	—	[8]
—	0,15	0,012	—	[8]
12	0,30 *	0,020	12	ИБРАЭ РАН
2,0	0,09	0,010	2,4	[9]

* Оценка за 15 марта.

- *Северо-западного радиоактивного следа* вследствие взрыва на втором энергоблоке, последовавшего за ним выброса радионуклидов, изменением направления ветра и возникновением интенсивных осадков. Часть этих выбросов ответственна за загрязнение территории префектуры Фукусима в радиусе до 80 км.

Таким образом, формирование радиоактивного загрязнения на территории Японии произошло преимущественно за счет выбросов энергоблоков № 1 и 2 АЭС «Фукусима-1». Выбросы при взрыве на энергоблоке № 3 14 марта в 11 часов 1 мин местного времени существенного влияния на радиоактивное загрязнение суши не оказали, поскольку они были существенно меньше, а также благодаря ветру, сносившему в этот период радиоактивные вещества в сторону океана. Разобраться с динамикой процессов радиоактивного загрязнения территории Японии в период с 12 по 21 марта 2011 г. позволяют данные, представленные на рис. 14.

Возникновение зон с повышенными уровнями радиоактивного загрязнения территории на северо-западном следе привело к тому, что оцениваемые годовые дозы внешнего облучения на значительных удалениях от 20-километровой зоны вокруг АЭС «Фукусима-1» могли превысить 20 мЗв (рис. 15). Вследствие этого было решено увеличить зону эвакуации людей примерно до 45 км в северо-западном направлении, и из нее было дополнительно эвакуировано почти 60 тыс. человек.

Большое внимание в деятельности ТКЦ ИБРАЭ РАН было уделено оценкам последствий попадания радиоактивных веществ в морскую среду за счет осаждения радионуклидов из облаков выброса, а также жидких сбросов радионуклидов при работах на разрушенных в результате аварии энергоблоках АЭС «Фукусима-1». Расчеты показали, что с учетом направления морских течений в весенне-летний период 2011 г. даже при самых консервативных вариантах загрязнения прибрежных вод в районе АЭС «Фукусима-1» опасности значимого повышения концентрации радионуклидов в морской воде и гидробионтах в районе Курильских островов и Камчатки не будет. Последующий мониторинг подтвердил справедливость этих оценок. Крупные радиационные аварии, сопровождающиеся значимым радиоактивным загрязнением обширных территорий, к каковым, несомненно, следует отнести и аварию на АЭС «Фукусима-1», приводят к серьезным социальным и экономическим последствиям, несмотря на ограниченность радиологических рисков.

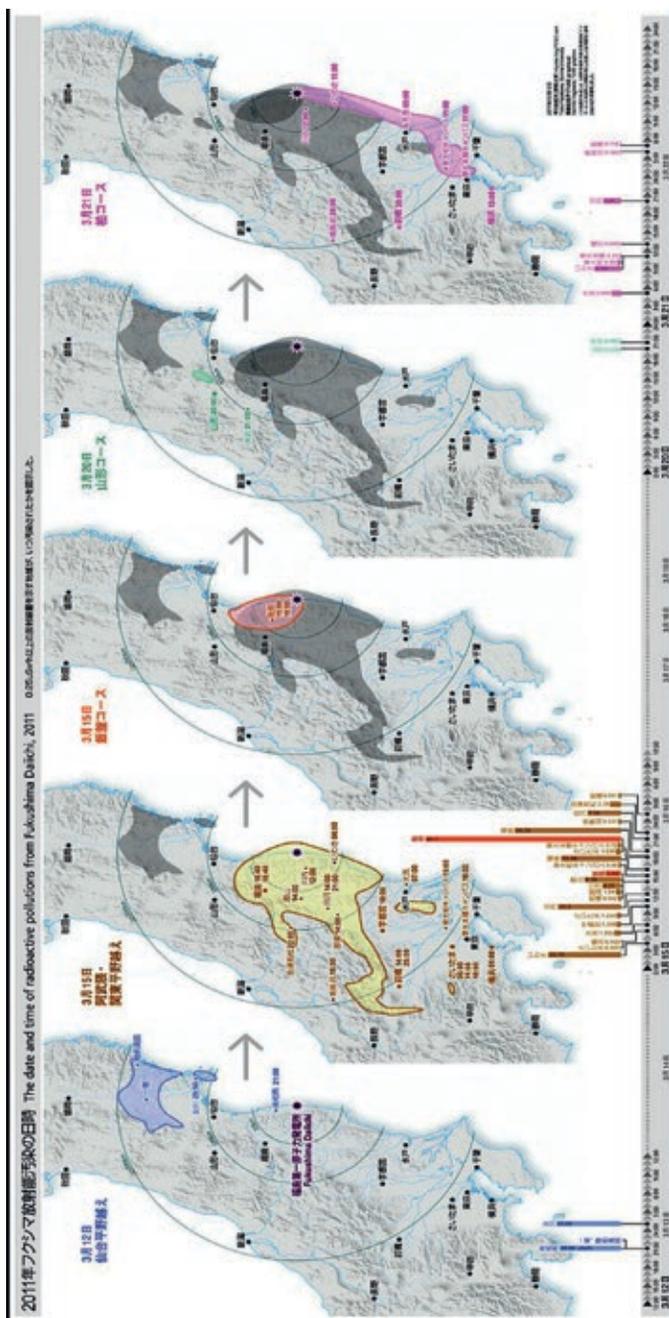


Рис. 14. Оценки динамики радиоактивного загрязнения территории Японии вследствие аварии на АЭС «Фукусима-1» с 12 по 21 марта 2011 г. (<http://kipuka.blog70.fc2.com/blog-entry-453.html>)

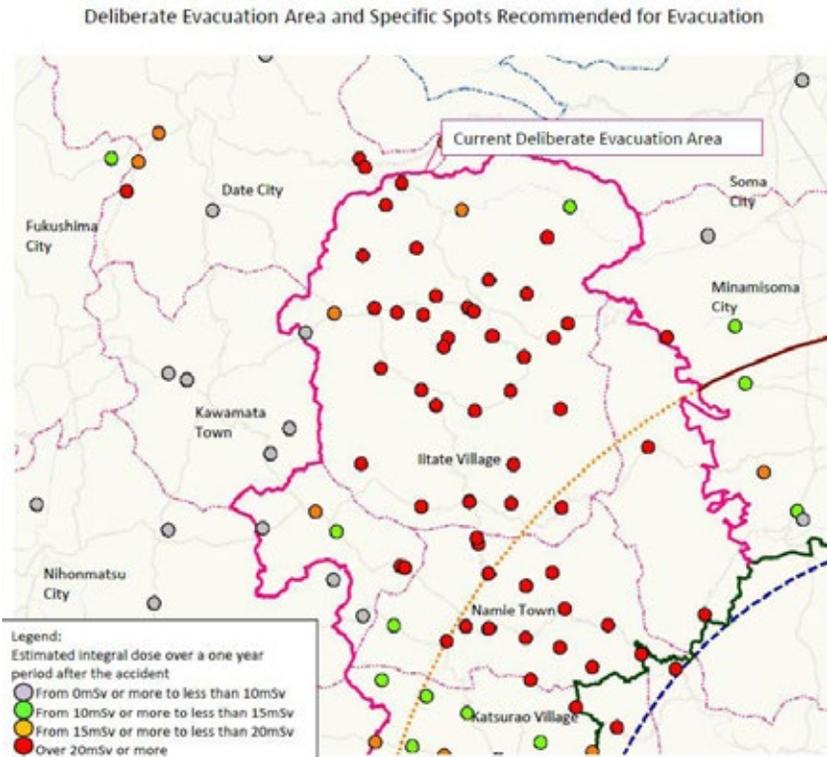


Рис. 15. Расширение зоны эвакуации вне 20-километровой зоны в северо-западном направлении от АЭС «Фукусима-1»

На основе анализа доступных данных, собранных экспертами ТКЦ, и проведенных расчетов были оценены возможные радиологические риски и экономические потери, обусловленные принимаемыми властями решениями по мерам вмешательства. В расчетах прямого экономического ущерба вследствие эвакуационных мероприятий в зоне радиационной аварии учитывались затраты на переселение и временное проживание жителей, на компенсацию материальных потерь из-за переселения и приостановки экономической деятельности, потери инвестиционной привлекательности территорий, а также другие факторы, которые определяют стоимость тех или иных защитных мер [11]. Отдельно были оценены потери земли как инвестиционного инструмента при долгосрочном отчуждении территории. Расчеты показали, что экономические потери для зон радиоактивного за-

грязнения в случае принятия решений об эвакуации по критерию дозы облучения людей за первый год больше 20 мЗв могут достигать 44 млрд долл. , в то время как при организации мероприятий по эвакуации в зоне с дозой, превышающей 100 мЗв за первый год, соответствующие затраты оцениваются в 9 млрд долл. Расширение зоны эвакуации свыше 20 км от АЭС может привести к прямым экономическим потерям до 100 млрд долл. в случае долгосрочного отчуждения территорий. Почти 90% этой суммы составляют потери, связанные с изъятием земель из хозяйственного оборота.

Столь серьезные экономические потери, которые возможны в случае реализации решений по долговременной эвакуации из «расширенной зоны эвакуации», напрямую связаны с неадекватным реагированием общества и государства на возможные последствия действия радиации на организм человека [12].

Следуя современным научным данным на основе консервативных прогнозов доз облучения, выполненных специалистами ТКЦ к 5 апреля, зона оправданных мер вмешательства охватывает территорию с населением не более 10 тысяч человек. При этом могла быть оправдана временная эвакуация людей с этих территорий с последующей их реабилитацией, реализация которых гарантировала бы приемлемые дозы за жизнь при проживании на этих территориях.

Авария на АЭС «Фукусима-1» вызвала негативную реакцию в обществе и потребовала оперативно информировать население о реальной ситуации на станции и возможных последствиях этого инцидента. Оперативность и достоверность прогнозов, выполненных ТКЦ, позволили МЧС России и Росатому провести эффективное информирование общественности, что сыграло важную роль в снижении напряженности на Дальнем Востоке России.

Заключение

В период работы ТКЦ ИБРАЭ РАН в режиме чрезвычайной ситуации, связанной с аварией на АЭС «Фукусима-1», удалось решить следующие задачи:

- определить риск загрязнения территории Дальнего Востока нашей страны: было показано, что радиационная обстановка при любом развитии ситуации на АЭС «Фукусима-1» не потребует принятия мер защиты населения;
- спрогнозировать аварийные процессы на энергоблоках АЭС «Фукусима-1» вплоть до моментов взрывов водорода;

- оценить количественные характеристики и нуклидный состав выбросов радиоактивных веществ в окружающую среду;
- оперативно оценить дозы внешнего и внутреннего облучения людей, проживающих в различных регионах Японии, исходя из мощности дозы внешнего гамма-излучения на открытой местности на 15-е сутки после останова реакторов;
- оценить возможные экономические потери, их оправданность и целесообразность реализации различных мероприятий по защите населения и территорий, подвергшихся радиоактивному загрязнению, основанных на критериях, принятых властями Японии;
- оперативно представить федеральным органам власти достоверную, актуальную и научно обоснованную информацию об аварии на АЭС в Японии и ее последствиях для населения и окружающей среды;
- в соответствии с регламентом деятельности ТКЦ с момента землетрясения до начала мая обеспечивал научно-техническую поддержку МЧС России, Росатома и ряда других федеральных структур в их реагировании на аварию на АЭС «Фукусима-1» в части оценки, анализа и прогноза развития ситуации и динамики радиационной обстановки на территории Японии и сопредельных территориях.

Литература

1. *Аввакумов А. В., Киселев А. Е., Митенкова Е. Ф. и др.* Верификация модуля БОНУС в составе интегрального кода СОКРАТ // Атом. энергия. — 2009. — Т. 106, вып. 5. — С. 250—257.
2. *Tsaun S. V., Beslepin V. V., Kiselev A. E. et al.* Numerical simulation of the behavior of fission products in the primary circuit of the VVER during the LOCA Severe Accident // Proceedings of the 17th Intern. Conf. on Nuclear Engineering, ICONE17, 2009, July 12—16, Brussels, Belgium. — [S. 1.], 2009. — P. 361—366.
3. *Stohl A., Seibert P., Wotawa G. 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 // Atmos. Chem. Phys. Discuss. — 2011. — Vol. 11. — P. 28319—28394.
4. *Stoehlker U., Nikkinen M., Gheddou A.* Detection of radionuclides emitted during the Fukushima nuclear accident with the CTBT radionuclide

- network // Monitoring Research Review: Ground-Based Nuclear Explosion Monitoring Technologies. — [S. 1.], 2011. — P. 715—724.
5. Моделирование распространения радионуклидов в окружающей среде. — М.: Наука, 2008. — 229 с. — (Труды ИБРАЭ РАН / Под ред. Л. А. Большова; Вып. 9).
 6. Арутюнян Р. В., Беликов В. В., Беликова Г. В. и др. Компьютерная система «Нострадамус» для поддержки принятия решений при аварийных выбросах на радиационно-опасных объектах // Изв. РАН. Энергетика. — 1995. — Вып. 4. — С. 19—30.
 7. Report of Japanese Government to the IAEA Ministerial Conference on Nuclear Safety — The Accident at TEPCO's Fukushima Nuclear Power Stations. — [S. 1.], June 2011. — 780 p.
 8. IAEA international fact finding expert mission of the Fukushima Dai-ichi NPP accident following the Great east Japan earthquake and tsunami. Tokyo, Fukushima Dai-ichi NPP, Fukushima Dai-ni NPP and Tokai Dai-ni NPP, Japan. 24 May — 2 June 2011. IAEA, Vienna, Austria. — [S. 1.], 2011. — 162 p.
 9. IRSN publishes assessment of radioactivity released by the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant (Fukushima I) through 22 March 2011. IRSN, France. — [S. 1.], 2011. — 2 p.
 10. RODOS. Model description of the late economics modeling. RODOS (WG3)-TN(99)-62. — Karlsruhe, Germany, 2000. — 23 p.
 11. Арутюнян Р. В., Большов Л. А., Павловский О. А. Современный взгляд на нормирование радиационной безопасности // Атом. энергия. — 2009. — Т. 106, вып. 5. — С. 285—297.

Использование комплекса моделей POMRad для моделирования распространения радиоактивных веществ в морской среде после аварии на АЭС «Фукусима-1»

А. Л. Крылов, А. В. Носов, В. П. Киселев

Введение

Авария на АЭС «Фукусима-1» привела к поступлению радиоактивных веществ (РВ) в морскую среду. Количество поступившей в море активности в источниках оценивается очень по-разному. Наиболее консервативные оценки источника загрязнения приводятся в [1]. Согласно этой работе основным источником загрязнения океана было прямое поступление в морскую среду вод, содержащих радиоактивные вещества. Согласно [1] количество ^{137}Cs и ^{131}I , выпавших на акваторию Тихого океана из атмосферы, было на три-четыре порядка меньше, чем поступивших с жидкими стоками. Вывод о первостепенной значимости жидких стоков РВ при радиоактивном загрязнении морской среды согласуется с данными других работ. Согласно [2] активность, выпавшая на акваторию океана из атмосферы превысила поступившую с жидкими стоками, тем не менее в данной работе учитывалось выпадение радионуклидов на огромных площадях (почти 3 млн км²). То есть локализованные в районе АЭС жидкие стоки могли привести к более значительному повышению удельной активности воды.

Согласно оценкам [1; 3] активность, сброшенная с жидкими стоками ^{137}Cs и ^{131}I , соответственно составила $27 \cdot 10^{15}$ и $540 \cdot 10^{15}$ Бк. Согласно [1; 3; 4] основной объем загрязненных стоков поступил с 26 марта по 6 или 8 апреля 2011 г. Поскольку коэффициенты распределения цезия и йода в системе «морская вода — взвесь — донные отложения» малы, при моделировании дальнего переноса активности можно консервативно предположить, что данные радионуклиды, попавшие в прибрежные воды в указанный период, могли распространяться в основном в растворенном виде. Ниже приведены результаты модельных оценок распространения данных радионуклидов в Тихом океане.

В долгосрочной перспективе, вероятно, одним из основных источников поступления радиоактивных веществ в морскую среду будет смыв долгоживущих радионуклидов с загрязненных речных водосборов. Так, согласно [1] в течение 1000 дней поступление ^{137}Cs с водами реки Укедо будет составлять в среднем до 10^{10} Бк/сут. Это согласуется с оценкой [5] $19 \cdot 10^{10}$ Бк/мес. Река Укедо среди малых рек будет основным источником выноса ^{137}Cs в морскую среду [5]. С водами более крупной реки Абукума будет поступать до $87 \cdot 10^{10}$ Бк/мес ^{137}Cs [6]. Вынос активности с водами других рек намного менее значим.

Можно предположить, что ^{137}Cs с речными водами в основном будет переноситься в море в сорбированном на взвесах состоянии. Это связано с высоким коэффициентом распределения Cs в системе «пресная вода — взвесь». Согласно оценкам [5; 6] более 80% радиоцезия, поступающего с речными водами ассоциировано со взвесями. Осаждение загрязненных взвесей может приводить к формированию загрязненных донных отложений вблизи побережья. По этой причине оценка возможности формирования пятен загрязненных донных отложений вблизи устьев рек является достаточно важной радиоэкологической задачей.

Назначение, структура и основные возможности POMRad

Модельные расчеты проводились при помощи программного комплекса POMRad. Комплекс компьютерных моделей POMRad, реализованный в виде программных кодов, предназначен для трехмерного имитационного моделирования распространения радиоактивных веществ в сложных неоднородно загрязненных водных объектах. Он позволяет получать оценки пространственного изменения содержания радионуклидов в компонентах водной среды в зависимости от времени.

В ряде случаев при моделировании необходимо учитывать процессы миграции РВ в сорбированном состоянии. Это может требоваться как для уточнения расчетов содержания радионуклидов в воде (за счет введения в рассмотрение существенного механизма перераспределения активности), так и для оценки уровней загрязнения донных отложений — важного компонента водного объекта.

В этой связи в комплексе компьютерных моделей POMRad реализован следующий подход к моделированию распространения радионуклидов в водной массе:

1. При помощи гидродинамической модели или на основании натуральных данных определяются скорость и направление течений в каждой точке водного объекта, которые могут быть функцией времени.
2. В случае необходимости при помощи модели переноса взвесей моделируются миграция и осаждение взвесей в данном водном объекте. При этом рассматриваются следующие классы взвешенных частиц:
 - мелкие частицы, которым свойственно укрупнение (консолидация в более крупные образования) за счет когезии, — когезивные взвеси;
 - более крупные частицы (в частности, песчаные), которым не свойственна консолидация в более крупные образования, — некогезивные взвеси;
 - при моделировании последствий аварийных выпадений может потребоваться также выделение отдельного класса частиц — «горячие частицы».
3. Производится моделирование переноса РВ в растворенном состоянии и/или на взвезях.

В качестве базовой гидрологической модели была выбрана «Princeton Ocean Model» (POM) [7], которая позволяет проводить достаточно сложные гидрологические расчеты с учетом основных факторов, влияющих на конечные результаты: ветра, приливных и постоянных течений, притоков, градиентов температуры и солёности и др. POM может применяться как для расчетов в глобальном масштабе, так и для касающихся небольших водных объектов с характерным размером от нескольких сотен или нескольких тысяч метров.

Моделирование переноса активности в POMRad может основываться на гидрологических расчетах при помощи встроенной модели POM, на данных натуральных измерений либо на гидрологических расчетах при помощи других моделей.

Моделирование переноса взвесей в POMRad реализовано путем конечно-разностного решения конвективно-диффузионного уравнения по аналогии с тем, как это делается в POM для переноса тепла и солёности. При этом дополнительно учитываются вертикальная скорость взвесей относительно потока, осаждение на дно и взмыв (ремобилизация) взвесей. Для некогезивных взвесей вертикальная скорость относительно потока может быть найдена, исходя из характерного размера частиц [8]. Для когезивных взвесей она также может быть оценена на основании характерного размера их конгломерата либо может рассчитываться исходя из характеристик потока,

как это описано в [9; 10]. Интенсивность осаждения взвесей на дно рассчитывается по формулам, приведенным в [9; 11—13]. Если содержание взвесей в воде может считаться не изменяющимся во времени, для моделирования переноса и осаждения РВ в сорбированном состоянии не требуется полноценное моделирование переноса взвесей, а достаточно лишь определить скорость осаждения взвесей, как это описано выше.

Для моделирования переноса радионуклидов в POMRad реализованы две расчетные модели: траекторная и конвективно-дисперсионная, решаемая методом конечных разностей. Каждая из них имеет свои преимущества в определенных классах задач.

Основным преимуществом реализованной в POMRad конечно-разностной модели перед траекторной является возможность моделирования процессов сорбции и десорбции радионуклидов на взвесьях. Такое моделирование может производиться как динамически, так и в предположении установившегося равновесия между радионуклидами, сорбированными на взвесьях и находящимися в растворенном виде.

При использовании второго подхода на каждом шаге по времени после учета всех прочих процессов удельная активность в ячейке корректируется в предположении существования мгновенной равновесной сорбции, описываемой изотермой Генри.

В ряде случаев при оперативных кратковременных прогнозах предположение о мгновенной равновесной сорбции может вносить существенные погрешности. Поэтому в программном комплексе POMRad реализована возможность учета кинетики сорбции. В этом случае потребуются дополнительные входные параметры, определяющие скорости процесса сорбции рассматриваемых радионуклидов.

Основным преимуществом траекторной модели, реализованной в POMRad, перед конечно-разностной является отсутствие численной дисперсии. Верификационные тесты подтвердили, что конечно-разностная модель, несмотря на использование «антидисперсионной» итерационной схемы Смоларкевича [14], не избавлена от численной дисперсии полностью.

Поскольку при расчетах распространения РВ от АЭС «Фукусима-1» не требовался учет перехода РВ между фазовыми состояниями, для моделирования использовалась траекторная модель, кратко описанная ниже.

Траекторная модель переноса активности, включенной в POMRad

При разработке включенной в POMRad траекторной стохастической модели переноса активности в водной среде был использован подход, примененный в [15] для моделирования переноса РВ в атмосфере.

Распространение примеси представляется движением большого количества пробных «частиц», каждой из которых присваивается определенная активность. «Частицы» разделены на три класса для моделирования переноса радионуклидов в трех фазовых состояниях: в растворе, а также в сорбированном на когезивных и на некогезивных взвесах состоянии. Активность каждой пробной «частицы» изменяется во времени с учетом радиоактивного распада и осаждения взвесей на дно (для второго и третьего классов). Пробные «частицы» переносятся со скоростью течения, зависящей от места их нахождения. Для «частиц», представляющих сорбированные радионуклиды, вносится коррекция, учитывающая вертикальную скорость взвесей относительно потока (скорость осаждения). На это движение накладываются случайные отклонения, моделирующие рассеяние радиоактивной примеси в воде. Данные смещения подчиняются распределению Гаусса, дисперсия которого определяется коэффициентом дисперсии потока в данной точке пространства.

Для вычисления удельной активности в точке каждая пробная «частица» представляется в виде «облака» конечных размеров с гауссовым распределением активности. Активность радионуклида в данной точке определяется как сумма вкладов от всех пробных «частиц-облаков». Размер каждого «облака» растет со временем. Такой подход позволяет обеспечить гладкость решения (поля удельной активности) при ограниченном количестве пробных «частиц».

То есть коэффициенты горизонтальной D_1 и вертикальной D_2 дисперсии представляются в виде

$$D_i = (1-\beta)D_i + \beta D_i, \quad i = 1, 2, \quad (1)$$

где β — произвольный коэффициент, значение которого определяется подбором. Все описанные ниже расчеты были проведены при $\beta = 0,9$.

Первый член в правой части выражения (1) отвечает за рост размеров «облаков», а второй — за случайное смещение их центров.

Конечный, горизонтальный R_1 и вертикальный R_2 размеры облака определяются из выражения

$$R_i^2 = \alpha^2 \int_0^t 2D_i (1-\beta) dt, \quad i = 1, 2. \quad (2)$$

Описанные ниже расчеты проведены при значении безразмерного параметра $\alpha = 3$, при котором «облако» охватывает 99% активности, приписанной «частице».

Смещения центров облаков dx , dy , dz за шаг интегрирования dt определяются уравнениями [9; 15]

$$\left\{ \begin{array}{l} dx = udt + \frac{dt \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{D_1 H \Delta y}{\Delta x} \right)}{\Delta y H} + \sqrt{2D_1 \beta} dt a_x, \\ dy = vdt + \frac{dt \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{D_1 H \Delta x}{\Delta y} \right)}{\Delta x H} + \sqrt{2D_1 \beta} dt a_y, \\ dz = wdt + W_s dt + \frac{dt \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{D_2 \Delta x \Delta y}{H} \right)}{\Delta x \Delta y} + \sqrt{2D_2 \beta} dt a_z, \end{array} \right. \quad (3)$$

где u , v , w — компоненты скорости течения, м/с; a_x , a_y , a_z — случайные величины со стандартным нормальным распределением; W_s — скорость осаднения пробной «частицы», м/с. Для пробных «частиц», характеризующих «раствор», W_s равна нулю.

Удельная активность в точке (x, y, z) от «пробной частицы» с центром (x_i, y_i, z_i) и активностью A (Бк) определяется следующим образом:

$$C_i = \frac{A}{2\pi R_1^2} \exp \left(-\frac{(x-x_i)^2}{2R_1^2} - \frac{(y-y_i)^2}{2R_1^2} \right) F(z, z_i, R_2, H), \quad (4)$$

где $F(z, z_i)$ — фактор вертикальной дисперсии, учитывающий влияние граничных условий у дна и поверхности, m^{-1} ; H — глубина с учетом поднятия свободной поверхности воды, м. При $R_2 > 2H$ вертикальное распределение удельной активности можно считать равномерным.

Изменение удельной активности dA пробной «частицы» за шаг по времени, равный dt , связанный с радиоактивным распадом, определяется из соотношения

$$dA = -A\lambda dt, \quad (5)$$

где λ — постоянная радиоактивного распада, s^{-1} .

Для находящихся в придонных ячейках пробных «частиц», описывающих миграцию сорбированных радионуклидов, учитывается также осаждение взвесей на дно:

$$dA = -A\lambda dt - \frac{fs(x, y, t)}{S(x, y, z, t)} A dt, \quad (6)$$

где S — содержание взвесей данного класса (когезивные или некогезивные) в воде, $кг/м^3$; fs характеризует осаждение взвеси данного класса на дно, $кг/(м^3с)$.

Моделирование дальнего переноса активности в Тихом океане

Сложные модели позволяют учесть большое количество значимых процессов и за счет этого получать адекватные результаты моделирования. Обратной стороной их применения является необходимость в большом количестве входных параметров. При этом точность моделирования в значительной степени определяется точностью определения применяемых входных параметров.

При расчетах авторы не располагали детальными входными данными, позволяющим провести моделирование гидрологических процессов в затронутой части Тихого океана с желательной степенью подробности. Поэтому использовались внешние данные о скоростях течений вблизи поверхности [16], а данные о коэффициентах дисперсии были заданы через входные параметры. Данные о скоростях течений в [16] приведены с пространственным разрешением $1/3^\circ$ и разрешением во времени 5 сут. Информация о глубинах с разрешением $30'$ была взята из [17]. Береговая линия была оцифрована с использованием спутниковых снимков.

На основании данных [18] было определено, что характерная для марта-апреля толщина верхнего перемешанного слоя воды (выше термоклина)

в данной части Тихого океана составляет в среднем около 85 м (от 20 до 200 м). Поэтому при моделировании переноса растворенных радионуклидов консервативно предполагалось, что все они находятся в верхнем слое (выше термоклина). Глубина этого слоя была консервативно принята равной 50 м.

Коэффициент горизонтальной турбулентной дисперсии был принят равным $300 \text{ м}^2/\text{с}$. Это очень консервативная оценка. Она занижает реальное разбавление и, таким образом, завышает пиковые удельные активности в пятне. Согласно [19] характерное значение горизонтального коэффициента дисперсии для Тихого океана составляет $1300 \text{ м}^2/\text{с}$. Для основного в данном районе течения Курошио (рис. 1) оно превышает $1500 \text{ м}^2/\text{с}$. Также необходимо учитывать, что значения скоростей в [16] заданы с временным разрешением 5 сут. Поэтому все процессы, приводящие к изменениям скоростей течений с характерным временем менее 5 сут (приливные, ветровые течения и т. д.), будут давать увеличение эффективного коэффициента дисперсии.

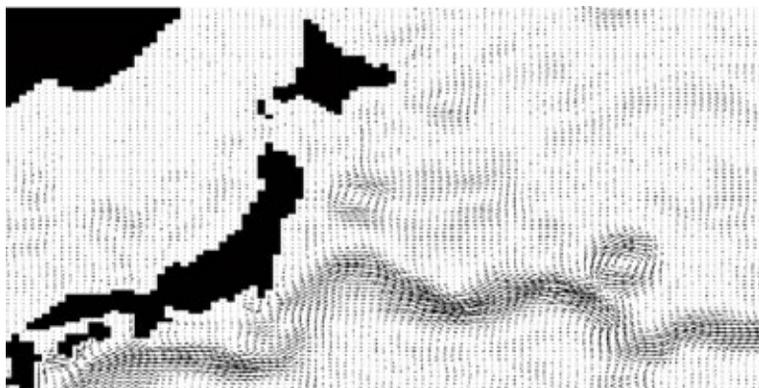


Рис. 1. Скорости приповерхностных течений [16]. 2 апреля 2011 г.

Для моделирования распространения радионуклидов, поступивших от АЭС «Фукусима-1» в морскую среду в первые недели после аварии, использовалась наиболее консервативная оценка источника [1; 3]. Общий объем поступившей активности был принят равным $27 \cdot 10^{15}$ Бк ^{137}Cs и $540 \cdot 10^{15}$ Бк ^{131}I . Консервативно предполагалось, что радионуклиды в прибрежные воды поступали в растворенном виде и равномерно с 0 часов 26 марта по 24 часа 6 апреля 2011 г.

Размеры расчетной области составили $29,1^\circ$ по долготе и $14,7^\circ$ по широте.

В качестве условного контрольного уровня удельной активности в воде был выбран установленный ОСПОРБ-99/2010 [20] уровень, при котором допускается неограниченное использование материалов. Для ^{137}Cs он составляет 100 Бк/кг, а для ^{131}I — 10^4 Бк/кг.

Максимальная удельная активность на 27 апреля составила 310 Бк/л (рис. 2), а на 26 мая — 200 Бк/л (рис. 3). Данные удельные активности превышают контрольный уровень соответственно в три и два раза, но согласно результатам моделирования такие уровни активности локализованы в районе АЭС. На расстоянии более 15—20 км от побережья превышение контрольного уровня по ^{137}Cs было возможно до конца апреля 2011 г. На расстоянии более 50 км от побережья удельные активности согласно результатам расчетов не должны были превышать контрольные уровни ни в один момент времени.

Снижение удельной активности ^{131}I за счет распада происходило значительно быстрее (рис. 4). Превышение контрольного уровня активности в воде носило еще более локальный и кратковременный характер, чем для ^{137}Cs .

Расчеты, проведенные с учетом менее консервативного (более близкого к реальности) значения коэффициента горизонтальной дисперсии ($D_1 = 1000 \text{ м}^2/\text{с}$), дают еще более быстрое снижение активности (рис. 5, 6).

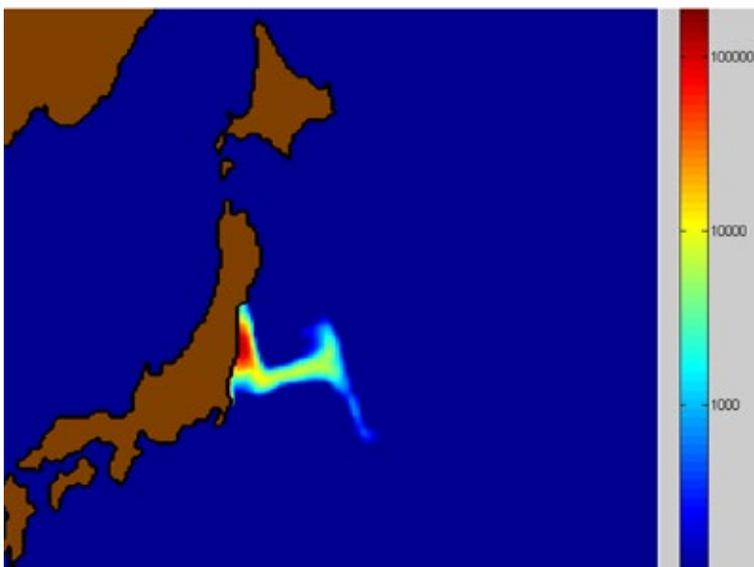


Рис. 2. Удельная активность ^{137}Cs (Бк/м³) на 0 часов 27 апреля. $D_1 = 300 \text{ м}^2/\text{с}$

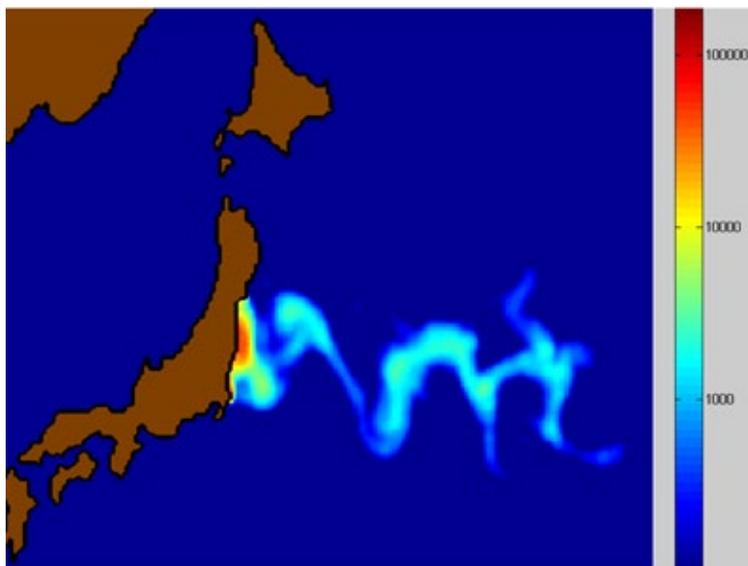


Рис. 3. Удельная активность ^{137}Cs (Бк/м³) на 0 часов 25 мая. $D_1 = 300 \text{ м}^2/\text{с}$

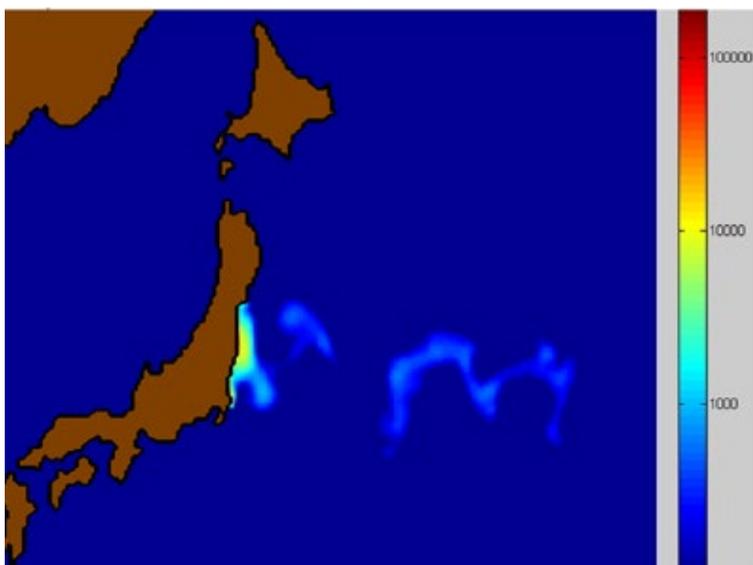


Рис. 4. Удельная активность ^{131}I (Бк/м³) на 0 часов 25 мая. $D_1 = 300 \text{ м}^2/\text{с}$

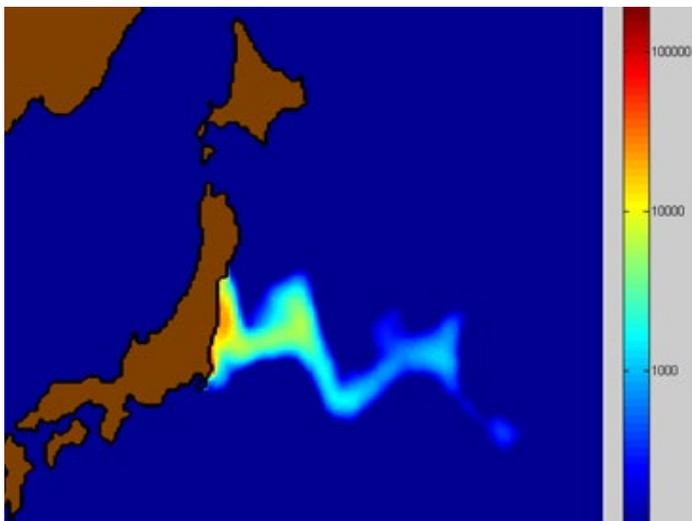


Рис. 5. Удельная активность ^{137}Cs (Бк/м 3) на 0 часов 27 апреля. $D_1 = 1000 \text{ м}^2/\text{с}$

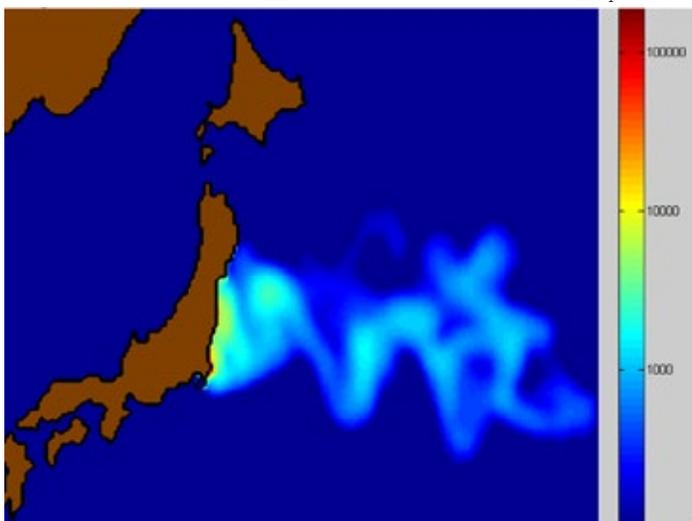


Рис. 6. Удельная активность ^{137}Cs (Бк/м 3) на 0 часов 25 мая. $D_1 = 1000 \text{ м}^2/\text{с}$

В этом случае превышение условного контрольного уровня содержания ^{137}Cs на расстоянии более 15—20 км от побережья может продолжаться не более недели после окончания поступления активности в указанных выше количествах.

Моделирование загрязнения прибрежных донных отложений в результате долговременного поступления ^{137}Cs с речным стоком

В качестве источников активности рассматривалось поступление сорбированного на взвесах ^{137}Cs с водами малой реки Укедо — 10^{10} Бк/сут [1] и с водами более крупной реки Абукума — $72 \cdot 10^{10}$ Бк/мес [5] (рис. 7). При такой интенсивности поступления удельная активность воды не превысит контрольного уровня (100 Бк/кг), однако за счет осаждения взвесей возможно формирование пятен загрязненных донных отложений. Для оценки опасности этого источника и были проведены описанные ниже расчеты.

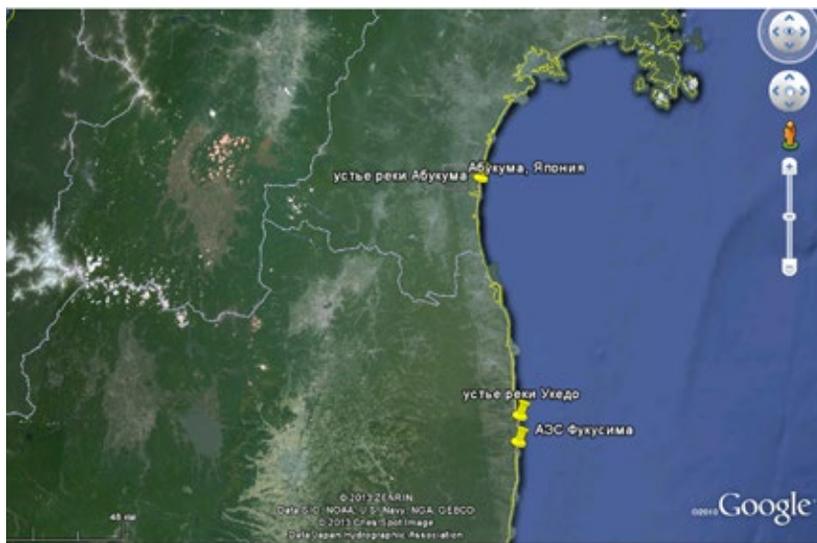


Рис. 7. Расположение устьев рек Укедо и Абукума относительно АЭС «Фукусима-1»

При моделировании последствий долговременного поступления ^{137}Cs с речным стоком область моделирования была сужена и распространялась на район $34,90—43,37^\circ$ с. ш. и $139,74—142,99^\circ$ в. д. Источники информации о течениях, глубинах и береговой линии использовались те же. Учитывалось осаждение взвесей и формирование загрязненных донных отложений только на тех участках, где глубины не превышают 200 м.

На основании данных [21] характерный эффективный размер взвесей был принят равным 1,5 мкм, что соответствует характерной скорости осаждения

10^{-4} м/с [8]. Расчеты охватывали 150 дней в предположении, что источники постоянны.

При расчетах был сделан ряд достаточно консервативных предположений:

- однажды осевшие частицы более не могут быть ремобилизованы потоком;
- сорбированный в речной воде радиоцезий не переходит в раствор в морской воде;
- устье реки считалось точечным источником.

Результаты расчета показали, что наиболее интенсивно пятна загрязненных донных отложений будут формироваться в непосредственной близости от устьев рек. Прирост удельной активности на наиболее подверженных загрязнению участках не превысит $500 \text{ Бк}/(\text{м}^2\text{сут})$. Толщина верхнего слоя донных отложений принималась равной 10 см, а характерная масса скелета морских донных отложений — $650 \text{ кг}/\text{м}^3$ [22]. При этом прирост удельной активности донных отложений составил $7,7 \text{ Бк}/(\text{кг}\cdot\text{сут})$.

В качестве контрольного для удельной активности в донных отложениях использовался уровень минимально значимой удельной активности по НРБ-99/2009 [23], принятый в [20] для отнесения материалов и сред к градации радиоактивных отходов. Для ^{137}Cs данный уровень составляет $10^4 \text{ Бк}/\text{кг}$.

После аварии на Чернобыльской АЭС было проведено изучение характерных значений коэффициентов самоочищения речных водосборов [24; 25]. Для ^{137}Cs характерное значение коэффициента самоочищения составляет $0,03 \text{ год}^{-1}$. С учетом распада и самоочищения загрязненных водосборов превышение контрольного уровня удельной активности в прибрежных донных отложениях за счет выноса с речным потоком не может возникнуть раньше, чем через четыре года.

При вычислениях удельной активности в донных отложениях проводилось усреднение по ячейкам расчетной сетки $2700 \times 3100 \text{ м}$. На меньших участках могут наблюдаться более высокие скорости прироста удельной активности. Для проверки был проведен расчет с площадью ячейки, уменьшенной в 300 раз. Размер расчетной области был сужен до $37,09\text{—}38,17^\circ \text{ с. ш.}$ и $140,85\text{—}141,45^\circ \text{ в. д.}$, а размер ячеек составил около $130 \times 200 \text{ м}$. В этом случае максимальный прирост удельной активности донных отложений составил $30 \text{ Бк}/(\text{кг}\cdot\text{сут})$.

Выводы

Проведенные расчеты показали перенос радиоактивной примеси, поступившей в морскую среду с 26 марта по 8 апреля 2011 г., в центральную часть Тихого океана. При этом за счет интенсивного разбавления превышение в воде условных контрольных уровней удельной активности рассматриваемых радионуклидов было локализовано вблизи от АЭС «Фукусима-1» на расстоянии не более нескольких десятков километров от побережья и носило кратковременный характер. Тем не менее расчеты показали, что превышение удельной активности ^{137}Cs в водах Тихого океана на два порядка и более относительно фоновых значений могло наблюдаться на расстоянии нескольких тысяч километров от АЭС.

Результаты моделирования возможного загрязнения донных отложений в результате выноса с речным стоком взвесей, содержащих ^{137}Cs , показали, что пятна с повышенной удельной активностью данного радионуклида наиболее интенсивно будут формироваться в непосредственной близости от устьев рек. При этом за четыре года этот процесс может сформировать участки донных отложений с активностью, превышающей условный контрольный уровень. На небольших участках с характерным размером до 100—200 м достижение контрольного уровня возможно за период порядка одного года. По этой причине, возможно, следует более детально контролировать удельную активность донных отложений вблизи устьев рек. Следует отметить, что данные оценки получены с использованием достаточно консервативных предположений.

Для проведенных расчетов предположение об отсутствии перехода РВ между фазовыми состояниями (раствор — взвесь) является консервативным, так как не приводит к занижению удельных активностей в рассматриваемых компонентах морской среды. При моделировании дальнего переноса РВ рассматривались только растворенные радионуклиды, так как в данном случае это фазовое состояние является наиболее значимым, а при моделировании выноса радиоцезия с речных водосборов рассматривался перенос, связанный с твердым стоком в сорбированном на взвешях состоянии.

Моделирование проводилось на основании достаточно «грубых» входных данных, что не могло не сказаться на точности расчетов. Недостаточно детальными были как данные об источниках поступления активности, так и гидрологическая информация. Действительно, до сих пор нет полной ясности относительно источников поступления радионуклидов в морскую среду

после аварии на АЭС «Фукусима». Ни количество поступившей активности, ни время ее поступления точно не известны. Различные оценки отличаются на порядок. Кроме того, отсутствует достоверная информация о формах нахождения радионуклидов в жидких стоках. Это затрудняет валидацию комплекса моделей POMRad.

Для более точных расчетов, кроме данных об источнике требуется также детальная гидрологическая информация, в первую очередь о течениях. Уточнение этой информации особенно важно для моделирования последствий выноса загрязненных взвесей с речным потоком, так как характерное расстояние, на которое переносятся взвеси, значительно меньше расстояния, на которое переносятся растворенные радионуклиды, а данные о вертикальных профилях скоростей течений требуются для того, чтобы адекватно оценивать осаждение взвесей на дно и их ремобилизацию.

В этой связи ИБРАЭ РАН запросил данные о скоростях течений на разных глубинах с пространственным разрешением $1/12^\circ$ и временным разрешением 1 сут. Эта информация позволит значительно уточнить расчеты, что, в свою очередь, должно позволить провести валидацию комплекса моделей POMRad на данных натурных измерений удельных активностей вблизи АЭС «Фукусима-1».

В заключение отметим, что результаты модельных расчетов при помощи POMRad в целом согласуются с данными измерений удельной активности в воде, опубликованными Министерством образования, культуры, спорта, науки и технологий Японии [26], а также с расчетами при помощи других моделей. Для полноценной валидации комплекса моделей POMRad требуются дополнительные расчеты, основанные на более детальных и уточненных входных данных.

Литература

1. Fukushima, one year later. Initial analyses of the accident and its consequences: Report IRSN/DG/2012-003 of March 12, 2012.
2. Hideyuki Kawamura, Takuya Kobayashi, Akiko Furuno et al. Preliminary numerical experiments on oceanic dispersion of ^{131}I and ^{137}Cs discharged into the ocean because of the Fukushima Daiichi nuclear power plant disaster // J. of nuclear science and technology. — 2011. — Vol. 48, № 11. — P. 1349—1356.

3. *Bailly du Bois P., Laguionie P., Boust D.* et al. Estimation of marine source-term following Fukushima Dai-ichi accident // *J. Environ Radioact.* — 2011. — doi:10.1016/j.jenvrad.2011.11.015.
4. *Tsumune D., Tsubono T., Aoyama M., Hirose K.* Distribution of oceanic ¹³⁷Cs from the Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant simulated numerically by a regional ocean model // *J. Environ Radioact.* — 2012. — Sep. — doi:10.1016/j.jenvrad.2011.10.007.
5. *Jota Kanda.* Long-term Sources: To what extent are marine sediments, coastal groundwater, and rivers a source of ongoing contamination? // *Proceedings of Fukushima Ocean Impacts Symposium November 12—13, 2012 / Univ. of Tokyo.* — [S. l.], 2012.
6. *Yamashiki Yosuke, Taeko Wakahara, Onda Yuichi* et al. Estimation of radioactive contaminant load from Abukuma River // *Proceedings of Japan Geoscience Union Meeting 2012, May 20—25 2012 at Makuhari, Chiba, Japan.* — [S. l.], 2012.
7. *Mellor G. L.* Users guide for a three-dimensional, primitive equation, numerical ocean model / Princeton Univ. // <http://www.aos.princeton.edu/WWWPUBLIC/htdocs.pom/FTPbackup/usersguide0604.pdf>.
8. *Носов А. В., Крылов А. Л., Киселев В. П., Казаков С. В.* Моделирование миграции радионуклидов в поверхностных водах // Под ред. проф. Р. В. Арутюняна. — М.: Наука, 2010. — 253 с.
9. *A Primer for ECOMSED. Version 1.3. Users Manual.* / HydroQual, Inc. — Mahwah, N.J., USA, February 2002.
10. *Burban P. Y., Xu Y., McNeil J., Lick W.* Settling Speeds of Floes in Fresh and Sea Waters // *J. Geophys. Res.* — 1990. — Vol. 95, Iss. C10. — P. 18213—18220.
11. *Wang X. H., Byun D. S., Wang X. L., Cho Y. K.* Modelling tidal currents in a sediment stratified idealized estuary // *CSR.* — 2005. — 25. — P. 655—665.
12. *Krone R. B.* Flume Studies of the Transport of Sediment in Estuarial Processes: Final Report / Hydraulic Engineering Laboratory and Sanitary Engineering Research Laboratory, Univ. of California. — Berkeley, 1962.
13. *Wang X. H.* Tide-induced sediment resuspension and the bottom boundary layer in an idealized estuary with a muddy bed // *JPO.* — 2002. — 32, 11. — P. 3113—3131.

14. Smolarkiewicz P. K. A fully multidimensional positive definite advection transport algorithm with small implicit diffusion // J. of Computational Physics. — 1984. — 54. — P. 325—362.
15. Арутюнян Р. В., Беликова Г. В., Головизнин В. М. и др. Новые эффективные численные методики моделирования процессов распространения радионуклидов в атмосфере и их практическое использование // Изв. Академии наук. Сер. Энергетика. — 1995. — № 4. — С. 31—45.
16. Bonjean F, Lagerloef G. S. E. Diagnostic Model and Analysis of the Surface Currents in the Tropical Pacific Ocean // J. Phys. Oceanogr. — 2002. — 32. — P. 2938—2954. — ([http://dx.doi.org/10.1175/1520-0485\(2002\)032<2938:DMAAOT>2.0.CO;2](http://dx.doi.org/10.1175/1520-0485(2002)032<2938:DMAAOT>2.0.CO;2); http://podaac.jpl.nasa.gov/dataset/OSCAR_L4_OC_third-deg).
17. General Bathymetric Chart of the Oceans, The GEBCO_08 Grid, version 20091120 // <http://www.gebco.net>.
18. <http://www.nodc.noaa.gov/GTSPP/index.html>.
19. Masanao Nakano, Povinec P. Oceanic General circulation model for the assessment of the distribution of ¹³⁷Cs in the world ocean // Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography. — Vol. 50, Iss. 17-21. — Sept. 2003. — P. 2803—2816. — Worldwide Marine Radioactivity Studies (WOMARS).
20. Основные санитарные правила обеспечения радиационной безопасности (ОСПОРБ-99/2010): Санитарные правила и нормативы. СП 2.6.1.2612-10.
21. Szczuciński W. et al. Sediment sources and sedimentation processes of 2011 Tohoku-oki tsunami deposits on the Sendai Plain, Japan — Insights from diatoms, nannoliths and grain size distribution // Sediment. Geol. — 2012 (<http://dx.doi.org/10.1016/j.sedgeo.2012.07.019>).
22. Иванов Е. А., Полянцев С. С., Булгаков В. Г. и др. Методика расчета допустимых сбросов радиоактивных веществ с АЭС в поверхностные воды. — М., 2002.
23. НРБ-99/2009. Нормы радиационной безопасности (НРБ-99/2009) : Санитарно-эпидемиологические правила и нормативы. — М.: Федер. центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, 2009.

24. Носов А. В., Писарев В. В., Войцехович О. В. Методика прогнозирования состояния загрязнения водоемов при нарушении нормальной эксплуатации АЭС: РД 52.26.174-88. — М.: Госкомгидромет СССР, 1988. — 49 с.
25. Носов А. В. Оценка толщины обменного слоя донных отложений в замкнутых и слабопроточных водоемах // Метеорология и гидрология. — 1989. — № 10. — С. 108—110.
26. <http://radioactivity.mext.go.jp/en/list/259/list-1.html>.

Актуальные задачи совершенствования готовности к реагированию на чрезвычайные ситуации радиационного характера

Р. В. Арутюнян, Л. А. Большой, О. А. Павловский

На начало февраля 2013 г. на всех АЭС мира находилось в эксплуатации 437 ядерных реакторов суммарной мощностью 372,6 ГВт (э). С учетом этих реакторов и 143 выведенных из эксплуатации или находящихся в настоящее время в заглушенном состоянии энергоблоков АЭС общий опыт эксплуатации атомных реакторов с момента пуска в 1954 г. первой в мире Обнинской АЭС составляет 15,2 тыс. реакторо-лет. Проводившиеся в конце 80-х годов прошлого столетия оценки возможных последствий аварийных ситуаций на АЭС исходили из того, что вероятность реализации крупной радиационной аварии с плавлением активной зоны реактора и выхода значительных количеств радиоактивных веществ за пределы энергоблока имеют вероятность не выше одного случая на 20 тыс. реакторо-лет [1]. В этом же отчете отмечалось, что радиационная авария на энергоблоке АЭС с экономическим ущербом на уровне 1 млрд долл. имеет вероятность реализации не выше одного случая на 1 млн реакторо-лет. Однако жизнь показала, что менее чем за шестьдесят лет развития атомной энергетики и общей продолжительности эксплуатации атомных энергоблоков АЭС, немного превышающей 15 тыс. реакторо-лет в США (авария на АЭС ТМ1-2 в 1979 г.), бывшем СССР (авария на Чернобыльской АЭС в 1986 г.) и Японии (авария на АЭС «Фукусима-1» в 2011 г.) произошли радиационные аварии с плавлением активной зоны ядерных реакторов и с экономическими потерями в десятки млрд долл.

Широкое использование энергии атомного ядра не только в атомной энергетике, но и в промышленности, медицине, сельском хозяйстве, образовании и научных исследованиях также сопровождается радиационными инцидентами и авариями, приводящими к масштабным экономическим и социальным потерям при ограниченных ущербах здоровью людей. Примером такого инцидента с радиоактивным источником излучения могут служить события, произошедшие в бразильском городе Гояния в 1987 г. Согласно классификации Международной шкалы ядерных событий (International Nuclear Event Scale, INES), разработанной МАГАТЭ в 1988 г. [2], радиационные аварии и инциденты могут быть оценены по восьмибальной шкале, за нулевой уровень в которой приняты незначительные для безопасности события (рис. 1).



Рис. 1. Классификация радиационных аварий и инцидентов согласно шкале INES (материалы с сайта <http://www.rosatom.ru/aboutcorporation/activity/safety/ines/>)

В соответствии с современными оценками к максимальному уровню 7 относятся аварии на Чернобыльской АЭС и АЭС «Фукусима-1», а к уровню 5 — авария на АЭС ТМІ-2, а также радиологический инцидент в Гойянии. Здесь уместно отметить, что шкала INES имеет логарифмический характер и переход на следующий уровень означает, что масштабы последствий такой аварии возрастают примерно в 10 раз. Таким образом, аварии на Чернобыльской АЭС и АЭС «Фукусима-1» (уровень 7) по радиационным последствиям оказываются примерно в 100 раз значимее аварии на АЭС ТМІ-2, а также радиологического инцидента в Гойянии, хотя адекватность оценки масштабов аварии по уровню шкалы INES требует дополнительного обсуждения.

Анализ опубликованных материалов (см., например, [3]), а также обобщение собственного опыта работ по аварийному реагированию и поддержке принятия решений в рамках функционирования Технического кризисного центра (ТКЦ) ИБРАЭ РАН [4; 5] (включая и последние данные по ликвидации последствий аварии на АЭС «Фукусима-1») показали, что в случае крупных радиационных аварий как в России, так и за рубежом ключевыми задачами в этом направлении научной и практической деятельности являются:

- создание и поддержка на самом высоком государственном уровне системы готовности к реализации адекватных мер реагирования для преодоления последствий радиационных аварий и инцидентов;
- создание и поддержка системы оперативного мониторинга радиационной обстановки и загрязнения объектов окружающей среды; важным элементом системы реагирования на радиационные аварии является оперативная передача достоверных данных мониторинга в заинтересованные организации;
- обеспечение оперативности и достоверности оценок, прогноза и выработки оптимальных мер реагирования при максимальном внимании к начальному периоду развития аварии, особенно в случае, когда имеется некоторый запас времени между моментом возникновения аварийной ситуации и началом выброса радиоактивных веществ за пределы объекта;
- обеспечение соответствующими научными, программно-техническими и инструментальными ресурсами, четкое распределение ответственности в принятии решений при чрезвычайных ситуациях для адекватного реагирования на радиационные аварии;
- наличие научно обоснованной и непротиворечивой законодательной и нормативной базы документов в области обеспечения радиационной защиты людей, в том числе в аварийный и поставарийный периоды;

- повышение квалификации персонала и лиц, принимающих решения;
- подготовка медицинского персонала к работам по ранней диагностике радиационных поражений, так как зачастую именно этим людям приходится первыми обнаруживать проявление таких эффектов у пациентов;
- своевременное предоставление адекватной информации представителям СМИ и населению в случае радиационной аварии, поскольку такие события привлекают большое внимание, а также во избежание необоснованного негативного воздействия на население и проблем в организации работ по аварийному реагированию.

Научно-техническое обеспечение реагирования на чрезвычайные ситуации с радиационным фактором

Существовавшая до 1986 г. уверенность, что заложенные в проекты АЭС научные и технические решения гарантируют практически абсолютную безопасность для персонала и населения эксплуатации атомных реакторов, не поколебали даже события на энергоблоке № 2 АЭС ТМ1, расположенной неподалеку от Гаррисберга (США). Они начались 28 марта 1979 г. примерно в 4:00. В этот момент произошел первичный малозначимый отказ оборудования (питательных насосов во втором контуре системы охлаждения реактора), затем в работу не включились все три аварийных насоса (из-за оставшихся закрытыми напорных задвижек после проходившего за несколько дней до этого планового ремонта) и последовала серия неверных действий персонала в попытках обеспечить охлаждение активной зоны реактора и сбросить давление под защитной оболочкой. К 19:50 ситуацию удалось взять под контроль. Таким образом, хотя не удалось избежать плавления ядерного топлива, оно все же осталось в корпусе реактора, и подавляющая часть вышедших радиоактивных веществ осталась в пределах защитной оболочки АЭС [6—8]. По разным оценкам, радиоактивность благородных газов, выброшенных в атмосферу, составила от 2,5 до 13 млн Ки (480·ПБк), однако выброс опасных нуклидов, таких как ^{131}I и ^{137}Cs , был незначителен [9].

Радиационные последствия этой аварии для жителей зоны размещения АЭС также оказались незначительными, и основные проблемы заключались в отсутствии необходимой координации и возникшем беспорядке при принятии и особенно осуществлении технических мероприятий по защите людей, зачастую необоснованных и не обеспеченных, а также в выявлении опреде-

ленных сложностей при попытках оперативного прогнозирования и оценки возможных радиологических последствий для населения в результате поступления радиоактивных веществ в атмосферу.

Несмотря на реальную тяжесть возникшей на АЭС ТМІ-2 аварии, отсутствие серьезных радиологических последствий для персонала и населения еще более укрепили у многих специалистов уверенность, что заложенные в проекты АЭС технические решения гарантируют полную безопасность эксплуатации атомных реакторов, по крайней мере, для населения и объектов природной среды. Это подтверждают и данные рис. 2 [10], на котором показано, как с 1954 по 2011 г. изменялось количество энергоблоков, которые начинали строиться (Construction starts) или включались в энергосистему (Grid connections). После некоторого снижения числа подключаемых в энергосеть реакторов в 1979 г. (8 против 20 в 1978 г.) уже на следующий год количество вводимых в эксплуатацию новых мощностей АЭС восстановилось и даже стало расти вплоть до 1986 г. В этот период практически не изменилось и число начинавших строиться энергоблоков.

Это привело к тому, что основное внимание в ходе реализации структурных и организационных изменений в области обеспечения работ по ликвидации последствий подобных аварий в будущем было направлено на совершенствование системы принятия решений по оптимальному ведению противоаварийных мероприятий на аварийном энергоблоке и в районе размещения АЭС. Кроме того, были внесены серьезные изменения и в систему подготовки операторов и руководства АЭС.

В документе [3] специально подчеркивается, что «Многие руководители, которые управляли первыми операциями аварийного реагирования, делали это неэффективно, поскольку не были подготовлены к аварийным условиям, близким к реальности, а система аварийного реагирования не была рассчитана на тяжелые аварии (например, ТМІ, Чернобыль). Эти руководители были ошеломлены и приведены в замешательство стрессовой обстановкой, ...вызывали неразбериху, разрабатывая непродуманные планы, поскольку не знали о планах и процедурах, принятых в своих организациях».

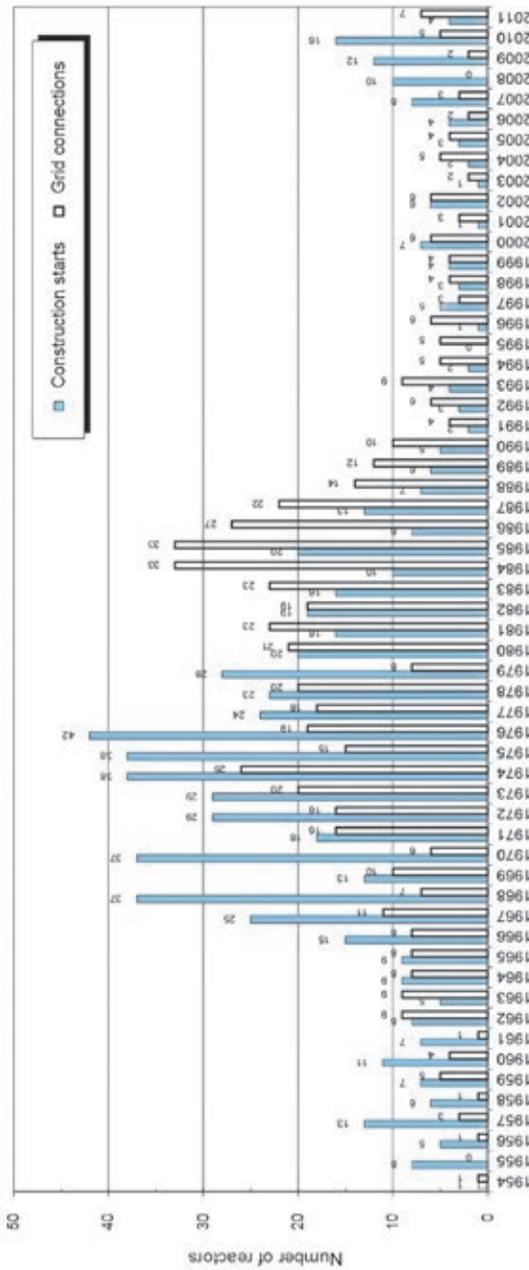


Рис. 2. Динамика количества энергоблоков АЭС, которые начали строиться или включались в энергосеть

В настоящее время в США деятельность по обеспечению ядерной и радиационной безопасности осуществляется в рамках Национального плана по реагированию, последняя редакция которого была принята в 2005 г. Ответственным за исполнением плана является Министерство энергетики в лице Национальной администрации по ядерной безопасности (National Nuclear Security Administration — NNSA). В распоряжении NNSA имеется целый ряд инструментов и механизмов, которые могут быть задействованы при реагировании на радиационные аварии и инциденты. В частности, здесь можно назвать Федеральный центр мониторинга и оценки (Federal Radiological Monitoring and Assessment Center — FRMAC), в котором представлены NNSA, Министерство обороны, Агентство по защите окружающей среды, Министерство здравоохранения, ФБР и другие федеральные структуры. В системе организации реагирования на чрезвычайные ситуации (ЧС) с радиационным фактором, учитывая их специфику в национальной системе США, предусмотрена особая структура научно-технического обеспечения всех включенных в реагирование федеральных ведомств под управлением NNSA. В рамках этой структуры в режиме постоянной готовности находятся 100 высококвалифицированных экспертов в центральном офисе NNSA, а около 10 специалистов — в каждом из девяти региональных центров.

В распоряжении NNSA имеется целый ряд ресурсов, которые могут быть и практически использовались при реагировании на радиационные аварии, в том числе на АЭС «Фукусима-1»:

- программа радиологического содействия (RAP);
- национальная информационная система по атмосферным выбросам (NARAC);
- измерительная система воздушного базирования (AMS);
- управление последствиями (CM);
- центр поддержки при радиационных ЧС/тренировочный центр (REAC/TS);
- группа реагирования на ЧС (ARG);
- группа поддержки при ядерных ЧС (NEST)
- консультативная группа по ядерным и радиологическим вопросам (NRAT).

Программа радиологического содействия была начата в конце 1950-х годов в Национальной администрации по ядерной безопасности (NNSA) Министерства энергетики (МЭ) США. RAP выполняет функции оперативного реагирования на начальном этапе оценки аварийной ситуации и дает рекомен-

дации властям по действиям, необходимым для минимизации последствий радиационной ЧС.

Программа RAP предоставляет ресурсы (обученный персонал и оборудование) для проведения оценок, выработки рекомендаций, идентификации радиационных источников и обстановки, поиска источников и оказания помощи в ликвидации реальных или воспринимаемых в качестве таковых ядерных или радиологических угроз. Программа RAP осуществляется на территориальной основе с координацией между элементами аварийного реагирования государственных федеральных и местных агентств. Региональная координация обеспечивает своевременное реагирование и способствует установлению рабочих отношений между NNSA и элементами аварийного реагирования государственного и местного уровня в конкретном регионе.

Задачи программы RAP состоят в оказании содействия на начальном этапе реагирования в случае радиологических инцидентов для защиты здоровья и обеспечения безопасности населения и окружающей среды. Содействие оказывается федеральным, государственным, национальным автономным и местным агентствам в обнаружении, идентификации, анализе и реагировании на события, связанные с выбросом радиоактивных материалов в окружающую среду. Примером оперативной и эффективной работы специалистов NNSA в зоне радиоактивного загрязнения территории Японии после аварии на АЭС «Фукусима-1» могут служить представленные на рис. 3 данные. С помощью вертолетного обследования территории (сплошные синие линии) удалось прояснить ситуацию по уровням радиоактивного загрязнения местности в тех местах, где отсутствовали автоматические датчики японской системы радиационного контроля.

Кроме того, RAP обеспечивает обучение в области аварийного реагирования персонала федеральных, государственных и местных агентств на основе Программы обучения специалистов оперативного реагирования в случае применения оружия массового уничтожения. В рамках программы RAP осуществляется взаимодействие между федеральными агентствами и государственными местными правительствами на практическом уровне, включая начальное взаимодействие с этими организациями по проведению совместных тренировок, учений и оказание поддержки по повышению уровня аварийной готовности. Уникальная квалификация специалистов RAP делает эту программу неотъемлемой частью Национальной программы готовности.

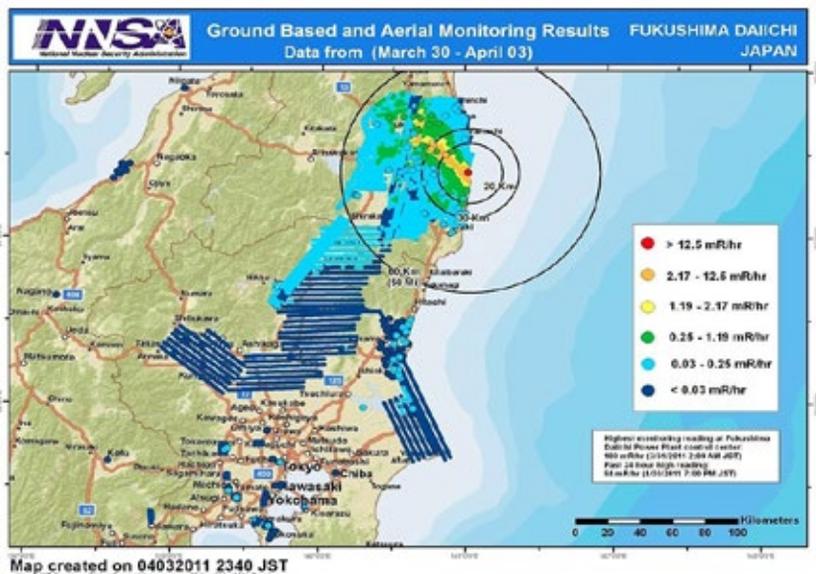


Рис. 3. Уровни мощностей доз внешнего гамма-излучения на основе данных воздушной и наземной радиационной разведки по состоянию на 3 апреля 2011 г.

NNSA сотрудничает с государственными, местными и национальными правительствами и признает их первенство в области безопасности и здоровья населения. Миссия RAP считается выполненной, когда на месте инцидента не требуется дальнейшей помощи или когда государственные, местные или национальные агентства способны справиться с инцидентом самостоятельно. Во Франции аналогичные задачи научно-технической поддержки национальной системы реагирования решает Технический центр аварийной готовности и реагирования при французском Институте ядерной безопасности и радиационной защиты (IRSN). В IRSN работают 1700 сотрудников, а его бюджет в 2011 г. составил 282 млн евро. Технический центр работает в режиме постоянной готовности, его деятельность обеспечивают в режиме дежурств 350 сотрудников высокой квалификации. Межведомственный характер Технического центра аварийной готовности и реагирования обеспечивается статусом IRSN, который находится под юрисдикцией министерств обороны, экологии, промышленности, исследований и здравоохранения Франции. Уже на 66-й день после аварии на АЭС «Фукусима-1» специалисты

IRSN выпустили научный отчет [11], обобщавший первые оценки последствий этой аварии для населения Японии (рис. 4).

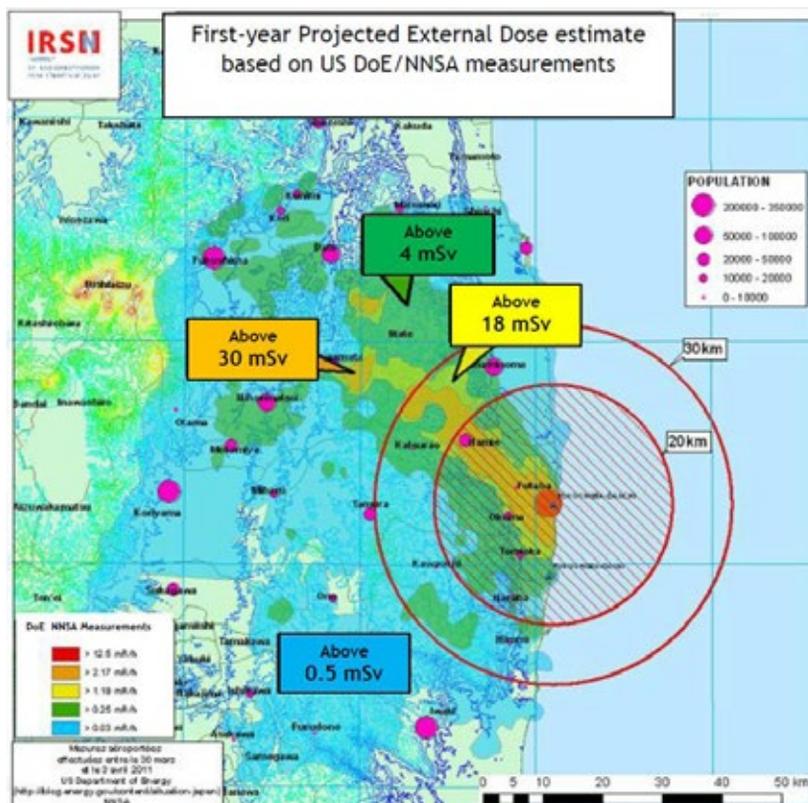


Рис. 4. Представленные специалистами IRSN оценки доз облучения населения Японии за первый год после аварии на АЭС «Фукусима-1»

В Японии координирующая деятельность по выработке рекомендаций для осуществления противоаварийных мероприятий была возложена на созданный в 1986 г. Nuclear Safety Technology Center (NUSTEC). Он ведет исследования и должен осуществлять поддержку деятельности руководящих органов страны по различным аспектам оценки последствий ядерных и радиационных аварий на основе результатов вычислений, осуществляемых в рамках национальной системы System Prediction of Environmental Emergency Dose Information (SPEEDI). Кроме того, для выработки согласованных предложений и рекомендаций по снижению возможных послед-

ствий радиационных аварий для населения NUSTEC близко сотрудничает с правительством страны, местными органами власти и другими организациями, вовлеченными в ликвидацию последствий аварии.

NUSTEC проводит исследования, способствующие повышению эффективности мероприятий в случае возникновения ядерной или радиационной аварии, а также организует учебные курсы для специалистов, вовлеченных в работу по противоаварийному реагированию.

NUSTEC также обеспечивает функционирование работающей через Интернет системы быстрого оповещения, предоставляющей вовлеченным в противоаварийную готовность организациям и населению информацию о реальной ситуации на радиационно-опасных объектах в режиме их нормальной эксплуатации и при возникновении аварийных ситуаций. В то же время реальный опыт реагирования на национальном, региональном и даже локальном уровнях во время аварии на АЭС «Фукусима-1» показал, что на практике реализация мер защиты населения и территорий не была обеспечена должным уровнем оперативности, достоверности прогнозов развития ситуации и четкими консолидированными рекомендациями по мерам защиты.

В России решение вопросов защиты населения и территорий от чрезвычайных ситуаций возложено (в редакции федерального закона от 4 декабря 2006 г. № 206-ФЗ) на Единую государственную систему предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций (РСЧС), состоящую из функциональных и территориальных подсистем, которые действуют на федеральном, межрегиональном, региональном, муниципальном и объектовом уровнях (рис. 5).

РСЧС включает в себя функциональные подсистемы мониторинга и реагирования на ЧС с радиационным фактором, каждая из которых решает специализированную задачу в соответствии с функциями и зонами ответственности соответствующих ведомств. Координация принятия решений и управление реагированием осуществляется Правительственной комиссией на базе Национального центра управления кризисными ситуациями (НЦУКС) МЧС России (рис. 6).

Вместе с тем сложность выработки четких и эффективных мер защиты от радиации обусловлена объективной трудностью быстрого проведения адекватной оценки радиационной обстановки, прогноза ее изменения во времени и достоверной оценки радиологических и радиоэкологических последствий на длительный срок вследствие одновременного влияния многих факторов и высокой наукоемкости задачи.



Рис. 5. Общая схема управления при инцидентах и авариях с преимущественно радиационным фактором воздействия в России



Рис. 6. Структурная схема организации работы НЦУКС МЧС России

Опыт аварии на АЭС «Фукусима-1» еще раз подтвердил необходимость наличия в национальной системе реагирования важнейшего структурного элемента — находящейся в состоянии постоянной готовности специализированной организации, обеспечивающей все включенные в процессы аварийного реагирования организации и ведомства научно-технической поддержкой в случае ЧС с радиационным фактором.

Семь дней в неделю, 24 часа в сутки эксперты этой организации должны быть готовы обеспечить научно-техническую поддержку принятия решений по защите населения, территорий и минимизации возможных негативных социально-экономических последствий во взаимодействии с федеральными, ведомственными и территориальными системами.

Отсутствие должной координации работы среди различных элементов национальной системы реагирования на радиационные аварии оставило руководство Японии после аварии на АЭС «Фукусима-1» без четких оценок, прогнозов и рекомендаций по мерам защиты, а население — без своевременного и правильного информирования о сложившейся и прогнозируемой радиологической ситуации. Практически до середины 2011 г. не было четкой оценки и долгосрочного прогноза ожидаемых последствий радиационного загрязнения, не были выработаны обоснованные меры защиты, и населению сообщались кардинально отличавшиеся друг от друга оценки ситуации. В значительной мере именно это привело к росту в обществе резко негативных настроений по отношению к атомной энергетике и к фактически простую подавляющей части японских АЭС.

Реакция населения Дальневосточного федерального округа России на аварию на АЭС «Фукусима-1» была не менее острой, хотя расстояние до аварийной станции превышает тысячу километров. Ситуацию удалось стабилизировать лишь благодаря оперативным действиям по информированию населения, которые организовали представители МЧС России и Госкорпорации «Росатом» совместно со СМИ, во многом основываясь на выполненных уже на второй день после аварии специалистами ТКЦ ИБРАЭ РАН прогнозах. Заметим также, что ТКЦ ИБРАЭ РАН к 5 апреля 2011 г. выполнил оценки и прогнозы реализованных и ожидаемых доз облучения за первый год после аварии и пожизненных доз для населения Японии и сделал однозначные выводы об отсутствии необходимости реализации мер вмешательства на подавляющей части северо-западного следа и целесообразности проведения ограниченных мер вмешательства на небольшой территории с населе-

нием около 10 000 человек, где было возможно превышение доз облучения людей свыше 100 мЗв за первый год после аварии.

Следует отметить, что в период Чернобыльской аварии в СССР не было единого центра поддержки принятия решений в случае радиационных аварий подобного масштаба. В определенном смысле в период острой фазы Чернобыльской аварии роль такой специализированной структуры играли оперативные штабы, созданные в Институте атомной энергии им. И. В. Курчатова, Институте биофизики 3-го Главного управления Минздрава СССР и других институтах, каждый из которых действовал в рамках задач своих ведомств.

Однако не только аварии на АЭС и других предприятиях, использующих источники ионизирующих излучений, являются объектами высокой потенциальной опасности. Умышленное или даже неумышленное попадание радиоактивности в сферу жизнедеятельности человека может привести к серьезным социально-экономическим последствиям при ограниченности и даже отсутствии практически значимых радиологических последствий в случае неадекватной реакции властей и населения.

В документе [3] особо отмечается, что «решения, касающиеся реализации действий по защите пострадавшего населения, могут приниматься официальными лицами, которые не являются специалистами в области радиационной защиты, и, таким образом, эти решения базируются на их собственном понимании радиологических рисков, а также на социально-политических соображениях».

Яркий пример такой ситуации произошел в Гоянии, столице штата Гояс (Бразилия), когда облучатель из медицинской установки, выброшенный на свалку, был разбит, а 1 грамм хлорида цезия с активностью 48 ТБк (1300 Ки) был разнесен по населенному пункту. В результате этого инцидента 20 человек получили значимые и высокие дозы облучения, а 4 из них скончались от радиационных поражений.

Однако наиболее серьезным для этого штата Бразилии оказался социально-экономический ущерб вследствие неспособности к адекватной оценке сложившейся ситуации и непринятия эффективных мер по стабилизации обстановки. Это привело к падению цен на промышленную продукцию на 40%, на сельхозпродукцию на 50%, туризм сократился на 40%, а ВВП штата — на 20%, и на его восстановление ушло пять лет.

Социально-экономические и политические последствия умышленного или случайного диспергирования такого же количества радиоактивности в крупном мегаполисе были бы еще более тяжелыми и серьезно повлияли бы на экономику и жизнедеятельность при отсутствии быстрой и адекватной

реакции властей, вооруженных точными оценками специалистов. Расчеты, проведенные ИБРАЭ РАН для Москвы и американскими специалистами для Нью-Йорка [12; 13], показывают, что ожидаемый ущерб в случае неадекватной реакции будет измеряться для Москвы сотнями миллиардов рублей, а для Нью-Йорка — до 4 трлн долл.

Во всех описанных и других имевших место в прошлом ситуациях **ключевым фактором оказывалось отсутствие единой организации**, способной выполнить быструю, адекватную, системную оценку радиационной обстановки ожидаемых радиологических и социально-экономических последствий и выработать оптимальные меры вмешательства убедительным для общественности образом в условиях неизбежного тиражирования панических оценок и прогнозов по всем каналам СМИ.

Только быстрое и адекватное информирование общественности на основе достоверного понимания оперативной информации и надежных прогнозов может в таких случаях предупредить дестабилизацию социальной и политической обстановки в мегаполисах, густонаселенных регионах и критически важных объектах транспортной инфраструктуры.

Об этом же свидетельствует и успешный опыт более чем 15-летней работы ТКЦ ИБРАЭ РАН, участие его специалистов в ликвидации последствий аварии на Чернобыльской АЭС, землетрясения и возникших проблем на Армянской АЭС (1988 г.), аварии на заводе по производству топлива в Японии в городе Токаймура в сентябре 1999 г. (по запросу посольства Японии в России), при реагировании на аварию на АЭС «Фукусима-1» по поручению Правительства РФ от 14 марта 2011 г., а также в международном сотрудничестве в области аварийного реагирования с ведущими центрами во Франции, США и других странах.

Необходимость повышения научного, программно-технического и инструментального уровня поддержки принятия решений в случае ЧС с радиационным фактором

Для снижения радиационных рисков для населения до приемлемых величин как региональное, так и федеральное руководство уже на начальной фазе развития ЧС должно располагать четкой и достоверной информацией по параметрам сложившейся радиационной обстановки и убедительными оценками и прогнозами развития радиологической ситуации.

Необходимо подчеркнуть, что основным фактором, способствующим неоправданному масштабированию социально-экономических последствий радиационных аварий и усиливающим негативное воздействие общественного восприятия, является отсутствие действенных инструментов консолидированной оценки и прогнозов радиационной обстановки, радиологических и социально-экономических последствий, а также выработки рекомендаций по эффективным мерам реагирования.

В Японии для задач оперативной оценки радиационных последствий аварии на АЭС «Фукусима-1» использовалась система SPEEDI [14], созданная в 1986 г. и стоившая тогда примерно 140 млн долл. На первом этапе она включала в себя лишь АЭС Японии и перерабатывающие ядерное топливо заводы. Однако после аварии на ядерном объекте «Токаймура» в 1999 г. количество включенных в систему объектов было увеличено: в нее вошли исследовательские реакторы университетов и работающие с ядерным топливом подразделения НИИ. В результате количество площадок, включенных в SPEEDI, возросло с 34 до 43, они размещаются на территории 19 префектур. Система постоянно модернизируется как в инструментальном, так и в программном направлениях. В настоящее время SPEEDI позволяет в оперативном режиме производить расчеты в четырех масштабах рабочей сетки с размерами ячеек 20, 2, 0,5 и 0,25 км следующих показателей:

- направления и скорости ветра на различной высоте с учетом рельефа местности;
- концентрации радионуклидов в воздухе;
- плотности радиоактивных выпадений на местность;
- мощности дозы гамма-излучения на открытой местности;
- эквивалентной дозы облучения щитовидной железы за счет ингаляции.

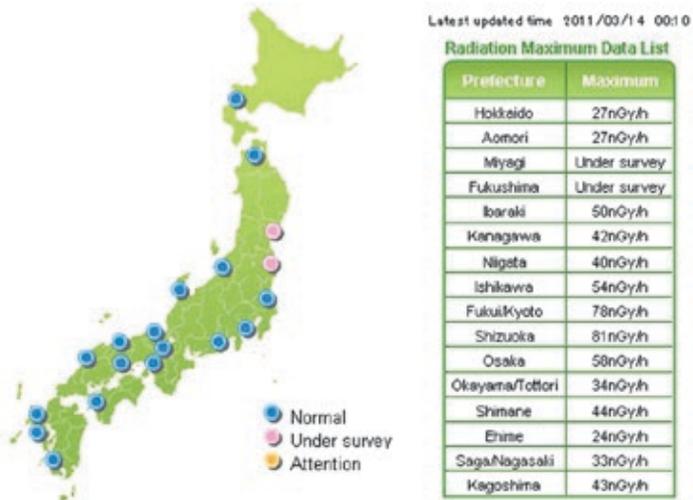
Расчеты проводятся на основании поступающих в постоянном режиме данных о параметрах метеобстановки в стране, выдаваемых системой Meteorological Information Comprehensive Online Service (MICOS) Погодной ассоциации Японии. Кроме того, анализируется информация, поступающая из локальных центров, в которых размещены датчики радиационного контроля системы SPEEDI (рис. 7). Большинство этих датчиков помимо измерений мощности дозы гамма-излучения проводят измерения и локальных метеопараметров (скорости и направления ветра, количества атмосферных осадков). Все результаты измерений размещаются в Интернете.



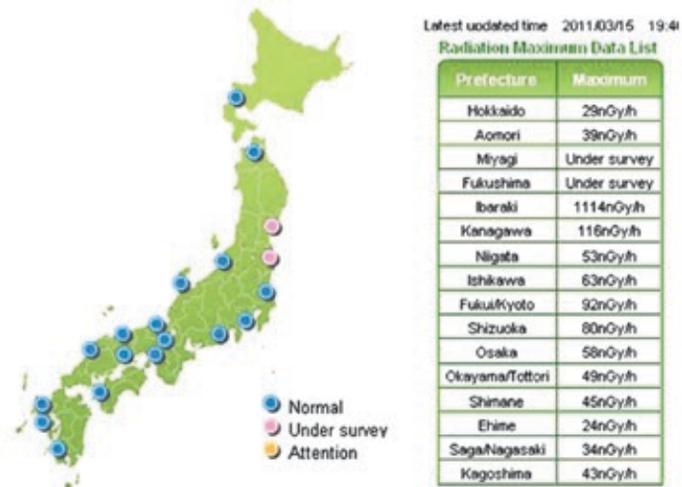
Рис. 7. Датчики контроля за радиационной обстановкой в рамках системы SPEEDI

Подтверждением сказанному может служить тот факт, что эксперты ТКЦ ИБРАЭ РАН, как и специалисты других стран, могли оперативно наблюдать за развитием радиационной ситуации на территории Японии уже с первых дней после аварии на АЭС «Фукусима-1», еще до серьезных выбросов радиоактивных веществ из реакторов аварийной АЭС, когда ситуация в префектурах Ибараки, Канагава, Аомори и др. была на уровне предаварийных фоновых значений (рис. 8а). После последовавшей 14 и 15 марта серии выбросов радиоактивных веществ в атмосферу ситуация резко изменилась, и радиационный фон в префектуре Ибараки вырос более чем в 20 раз (рис. 8б).

В России, в рамках реализации Федеральной целевой программы «Обеспечение ядерной и радиационной безопасности на 2008 год и на период до 2015 года», создается Единая государственная автоматизированная система контроля радиационной обстановки (ЕГАСКРО). Основной задачей этой системы, объединяющей ведомственные службы и сети радиационного контроля и мониторинга в единое целое, является выдача оперативной информации о состоянии и прогнозе радиационной обстановки на территории России на основе автоматизации процессов сбора, передачи и анализа данных.



а



б

Рис. 8. Показания датчиков радиационного контроля системы SPEEDI до начала серьезных выбросов радиоактивных веществ (а — местное время 00:10 14 марта 2011 г.) и после серии выбросов радионуклидов (б — местное время 19:40 15 марта 2011 г.)

Главный информационно-аналитический центр (ГИАЦ) системы ЕГАСКРО начал функционировать в конце 2010 г. на базе НПО «Тайфун». В режиме реального времени в ГИАЦ поступают данные от Гидрометцентра, результаты измерений метеорологических параметров, выполненных метеорологическими станциями Росгидромета, а также результаты контроля радиационной обстановки от сети Росгидромета и АСКРО Госкорпорации «Росатом». Ведомственная АСКРО Росатома предназначена для непрерывного автоматизированного контроля радиационной и метеорологической обстановки в районе промышленных площадок, санитарно-защитной зоне и зоне наблюдения при нормальной эксплуатации (для подтверждения радиационной безопасности) или аварийной эксплуатации радиационно-опасных объектов.

Результаты измерений параметров радиационной обстановки в районах размещения предприятий Росатома находятся в открытом доступе в Интернете на сайте <http://www.russianatom.ru> (рис. 9 а и б).

Еще раз подчеркивая высокую эффективность действующих в различных странах национальных и ведомственных систем радиационного мониторинга, нельзя не отметить и выявившиеся в условиях аварии на АЭС «Фукусима-1» недостатки такой системы в Японии, на которые следует обратить внимание при развитии подобных проектов в России:

- датчики системы SPEEDI в основном размещаются в районах расположения радиационно-опасных объектов Японии и не охватывают территорию всей страны. Это привело к определенным проблемам при попытках восстановления радиационной ситуации в регионах, где подобных датчиков вообще не было, а попытки измерить мощность дозы гамма-излучения на местности зачастую осуществлялись неквалифицированными специалистами и без всякой системы организации измерений. В России основное количество датчиков системы АСКРО также размещается в местах расположения АЭС и предприятий ядерной отрасли. По-видимому, необходимо в реальном будущем оснастить подобными датчиками все города России с населением более 100 тыс. человек, а таких городов в нашей стране согласно данным переписи 2010 г. 163 [15];

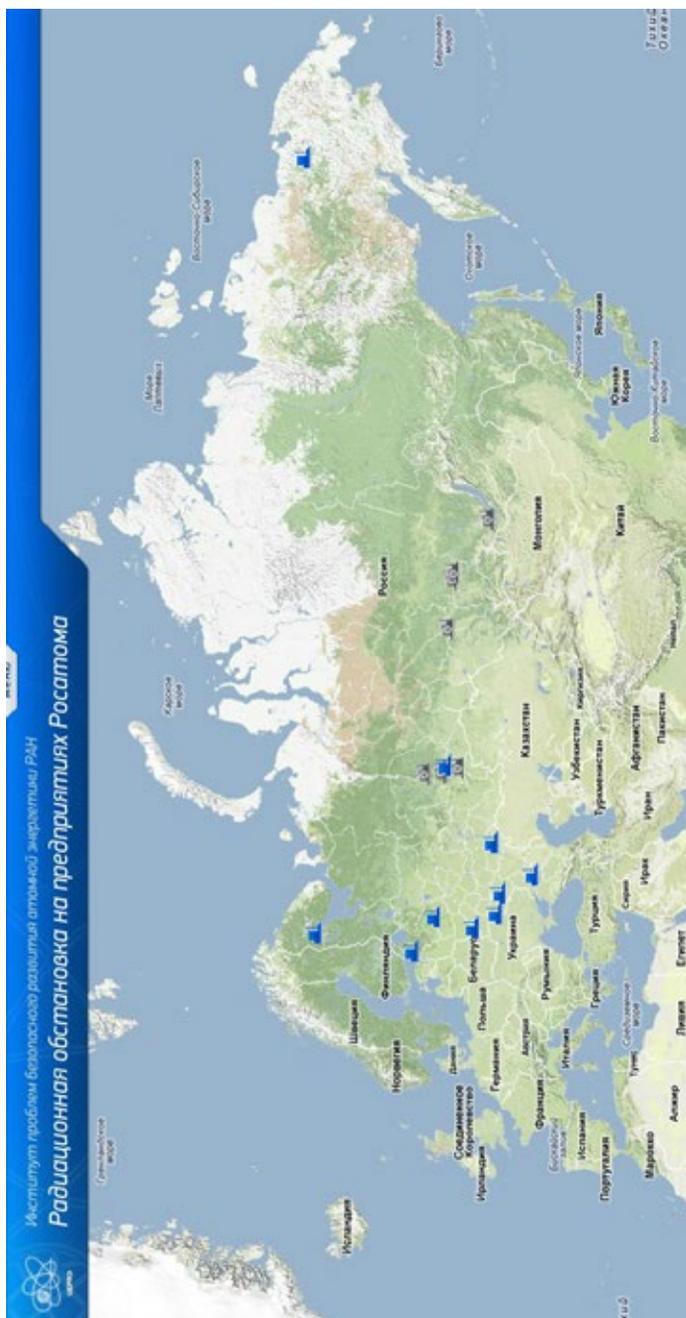


Рис. 9а. Включенные в систему АСКРО ГК «Росатом» радиационно-опасные предприятия России

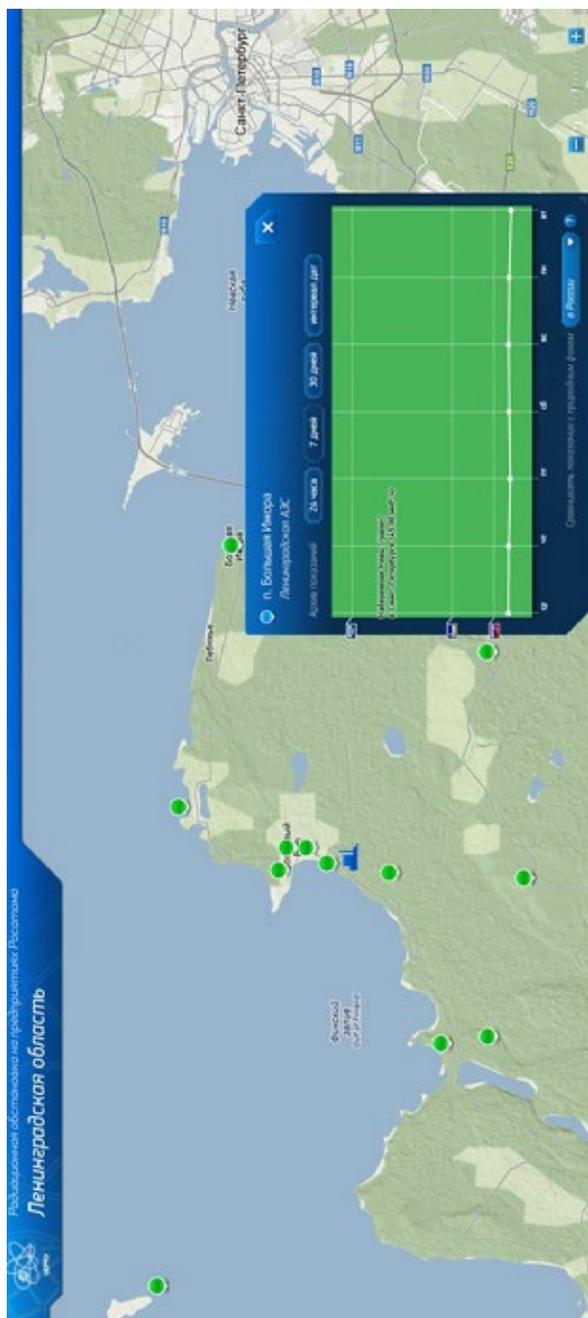


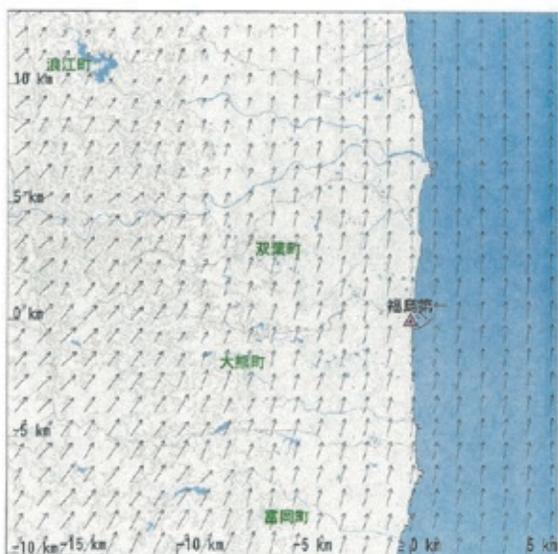
Рис. 9 б. Пример информации о состоянии радиационной обстановки в районе размещения Ленинградской АЭС по состоянию на 12 февраля 2013 г.

- из 218 датчиков после землетрясения 11 марта 2011 г. ни один из 23 датчиков в префектуре Фукусима и ни один из 7 в префектуре Мияги не передавали информацию в Интернет. Причин этого может быть много, но возможно, что отказы датчиков были связаны с сейсмическим воздействием на аппаратуру и места ее расположения, с потерей электропитания или коммуникационных связей. В любом случае при развитии подобных систем в России надо стараться защититься от сбоев в работе аппаратуры, обратив особое внимание на резервирование каналов передачи информации и надежное автономное энергообеспечение при автоматическом режиме работы устройств;
- стоит подумать и о целесообразности оснащения хотя бы части подобных датчиков системой автоматического анализа спектра гамма-излучения, обратив особое внимание на характерные линии, соответствующие изотопам йода и цезия.

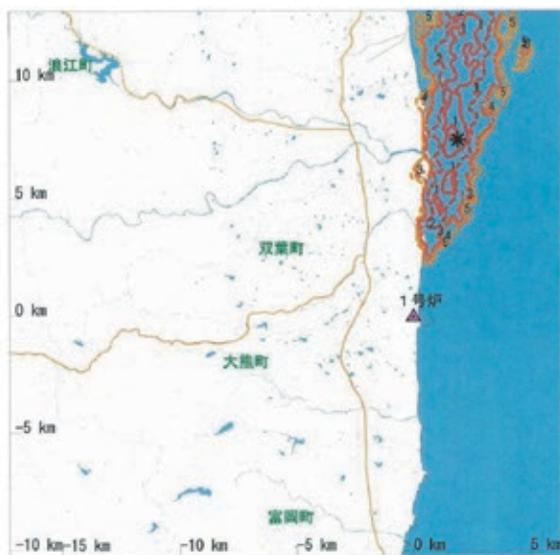
Примеры выдаваемых системой SPEEDI компьютерных оценок прогнозируемой радиационной ситуации в районе размещения АЭС «Фукусима-1» в графическом виде представлены на рис. 10а (распределение направлений и скоростей приземного ветра в 20-километровой зоне вокруг АЭС по состоянию на 19:00 местного времени 12 марта 2011 г.) и рис. 10б (результаты прогнозируемой плотности радиоактивных выпадений в районе аварии в результате условного выброса радионуклидов в этот момент).

Вообще подобных расчетов в разных странах мира было проведено и опубликовано большое количество, но, в основном, на значительно более крупных расчетных сетках, что давало возможность оценить последствия глобального переноса выбросов из зоны аварии и сравнить эти вычисления с данными натурных измерений (см., например, данные рис. 11 с расчетными значениями уровней приземного загрязнения воздуха ^{133}Xe в мире [16]). Основной ценностью этих расчетов следует считать возможность более корректной оценки динамики выбросов отдельных радионуклидов с аварийных блоков АЭС «Фукусима-1».

Как отмечалось в [17; 18], в России перенос радиоактивных веществ в атмосфере моделировался на основе современной лагранжевой стохастической модели дисперсии радионуклидов в атмосфере.



а



б

Рис. 10. Результаты моделирования системой SPEEDI поля ветров (а) и возможных плотностей радиоактивных выпадений (б) в районе расположения АЭС «Фукусима-1», проведенные 12 марта 2011 г.

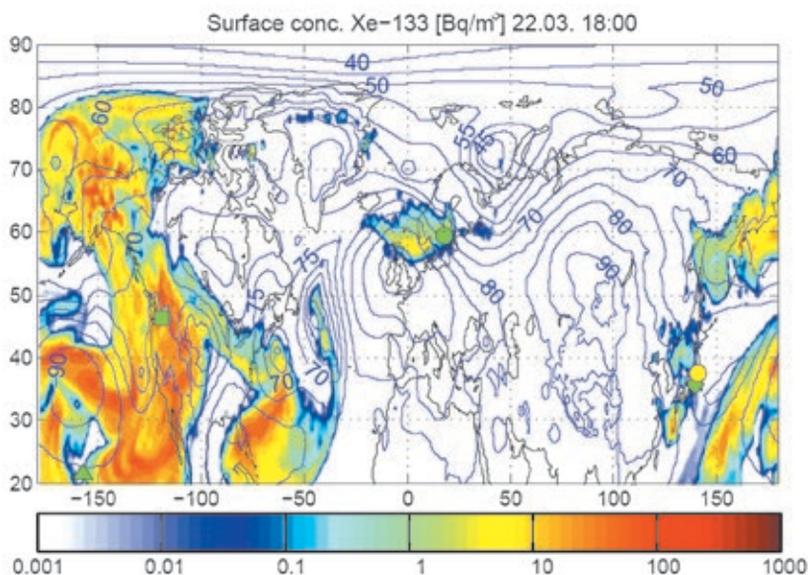


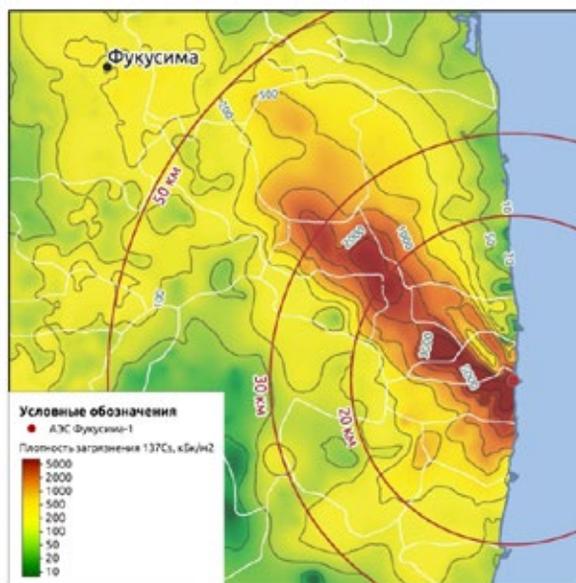
Рис. 11. Расчетные значения уровней приземного загрязнения воздуха ¹³³Xe (Бк/м³) по земному шару по состоянию на 16:00 UTC 22 марта 2011 г. на основе вычислений, проведенных в норвежском Институте воздушных исследований (NILU)

Эта модель является составной частью расчетного кода НОСТРАДАМУС, разработанного в ИБРАЭ РАН и предназначенного для моделирования переноса радиоактивных веществ в атмосфере (рис. 12), а также для оценки последствий аварийного выброса радионуклидов для населения. При оценках последствий аварии на АЭС «Фукусима-1» для территории Японии и приграничных с ней стран (с том числе России) учитывались реальные метеоусловия в данном регионе.

Таким образом, расчетный код НОСТРАДАМУС еще раз подтвердил на практике свою работоспособность в сложных метеоусловиях, при которых происходили выбросы радионуклидов с аварийных блоков АЭС «Фукусима-1». Но он пока не может работать в автоматическом режиме, нет постоянной подпитки актуальных данных о параметрах метеообстановки, отсутствует также стандартизованная система автоматической обработки результатов вычислений и выдачи сконцентрированной, но понятной для принимающих решения лиц информации. Над этим необходимо как можно скорее начать работать с привлечением всех заинтересованных организаций и ведомств.



а



б

Рис. 12. Северо-западный след. Загрязнение территории Фукусимы ^{137}Cs . Моделирование с помощью кода НОСТРАДАМУС (а) и реконструкция по натурным данным (б)

Актуальность совершенствования национальной системы нормирования в области обеспечения радиационной безопасности населения

Сложившаяся как в мире, так и в России система норм и критериев в области радиационной, радиологической и радиоэкологической безопасности и защиты населения и территорий неоднозначна, что неизбежно приводит к противоречивым рекомендациям на уровне ведомств, а это зачастую вынуждает политическое руководство пострадавших от радиационной аварии стран, уступая давлению общественности и СМИ, применять необоснованно жесткие критерии и меры вмешательства. В результате этого происходит многократное, в десятки раз, расширение затронутых аварией территорий и, соответственно, увеличение численности населения, оказывающегося в зоне реализации неоправданных мер защиты. Тем самым на большой территории без должных оснований нарушается нормальная экономическая и социальная деятельность, дестабилизируется социально-политическая обстановка не только в затронутом аварией регионе, но и в стране в целом.

В документе [3] отмечается: «Реагирование на аварии в Чернобыле и Гоянии продемонстрировало, что решения, касающиеся реализации действий по защите пострадавшего населения, могут приниматься официальными лицами, которые не являются специалистами в области радиационной защиты, и, таким образом, эти решения базируются на их собственном понимании радиологических рисков, а также на социально-политических соображениях». Приходится с сожалением констатировать, что и в ходе ликвидации последствий аварии на АЭС «Фукусима-1» неадекватная оценка радиологических рисков привела к необоснованному расширению зоны эвакуации населения. В нормативных документах, действовавших в Японии на момент аварии в 2011 г., указывалось, что только если прогнозируемые эффективные дозы облучения людей превысят уровень 50 мЗв (или 500 мГр по дозе на отдельный орган), следует проводить укрытие населения в специальных убежищах, а при невозможности осуществить эту меру защиты рекомендовалось проводить эвакуацию людей. Согласно рекомендациям МКРЗ [19] уровнем дозы, при котором эвакуация населения практически всегда оправданна, является пороговое значение 100 мЗв. А в реальной жизни, находясь под грузом сложнейших проблем на площадке АЭС «Фукусима-1», пытаясь хоть как-то решить вопросы обеспечения жизненно важных условий для пострадавшего от землетрясения и цунами населения, правительство Японии пошло на популистский шаг и постановило провести

эвакуацию жителей всех населенных пунктов, в которых прогнозируемая доза за первый год после аварии могла превысить 20 мЗв. Это решение необоснованно расширило зону эвакуации населения в северо-западном направлении от АЭС до 45 км (см. рис. 13; [20]).

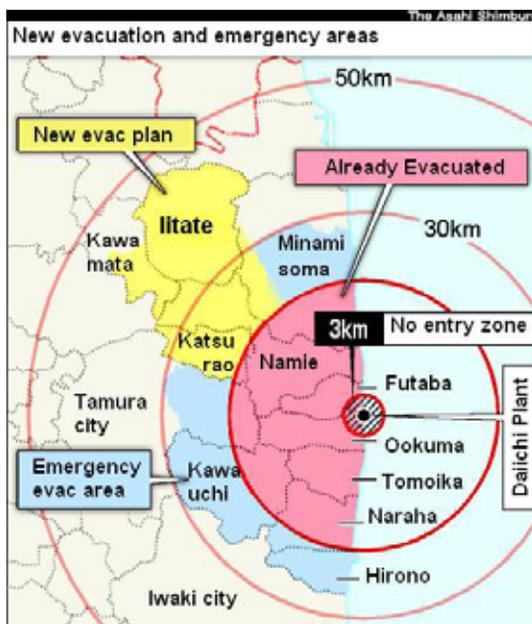


Рис. 13. Схема осуществленной эвакуации населения из 20-километровой зоны и планы ее расширения согласно принятой концепции (20 мЗв за первый после аварии год)

Следует понимать, что нормативное регулирование радиационных рисков в области малых и сверхмалых доз, в десятки и сотни раз меньших региональной вариабельности доз облучения населения от природного фона, действующие в России чернобыльское законодательство и практика, вместе с «чернобыльской мифологией», делает общество чрезвычайно уязвимым к любым возможным уровням воздействия радиации. Срабатывает цепочка: радиация всегда опасна независимо от доз облучения людей, любое, даже незначительное, превышение нормативно и законодательно установленных пределов доз и уровней вмешательства для нормальных и аварийных условий облучения непременно приведет к опасности для здоровья. Все это, помноженное на обостренное восприятие радиации обществом и очевидную реакцию СМИ, может привести к масштабным неблаго-

приятным социально-экономическим последствиям. Любая радиационная авария, инцидент с радиоактивными веществами, особенно в условиях территорий с высокой плотностью населения и значительным экономическим потенциалом, даже в случае пренебрежимо малых радиологических ущербов может привести к масштабным неблагоприятным социально-экономическим последствиям.

Население, опираясь не только на стереотипы общественного сознания, сложившиеся после аварий на Чернобыльской АЭС и АЭС «Фукусима-1», но и на формулировки действующих законодательных и нормативных актов в области радиационной безопасности, воспринимает (и не может воспринимать иначе) превышение пределов доз для нормальных условий как возникновение «ненормальной», опасной ситуации для своего здоровья и жизни. Неадекватное восприятие радиационного риска существует не только на уровне обыденного сознания. Предубеждения против радиации существуют практически во всех профессиональных и социальных группах включая представителей законодательной и исполнительной власти, занимающихся вопросами экологического регулирования. Работа по обеспечению адекватного восприятия обществом радиационных рисков требует дифференцированного подхода к каждой целевой группе. Скажем, информация для лиц, принимающих политические и экономические решения, должна включать не только данные по уровням радиационного риска и мерам защиты населения, но и по экономической эффективности осуществления именно этих мер или проведения альтернативных мероприятий по улучшению качества жизни людей или их здоровья с учетом социальной приемлемости, необходимости и достаточности таких мероприятий.

Важной причиной принятия и использования необоснованно жестких дозовых критериев защиты людей на случай аварийного облучения является отсутствие нормативно утвержденных значений допустимых пределов дозы по годам после аварийного облучения, основанных на недопустимости превышения предела пожизненной дозы. Независимо от того, верна или нет линейная беспороговая концепция действия радиации на организм человека (ЛБК), представляется разумным для ограничения облучения населения в случае возникновения радиационной аварии и ликвидации ее последствий установить предел пожизненной дозы для лиц из населения на уровне 350—500 мЗв. Нижняя граница предлагаемого предела пожизненной дозы (350 мЗв) численно равна произведению средней годовой дозы (5 мЗв/год) на среднюю продолжительность жизни человека (70 лет).

Здесь необходимо подчеркнуть, что приведенная в НРБ-99/2009 и в Публикации 103 МКРЗ величина предела дозы для лиц из населения на уровне 1 мЗв/год фактически не является годовым дозовым пределом. В НРБ-99/2009 говорится, что предел дозы для населения равен «1 мЗв в год в среднем за любые последовательные 5 лет, но не более 5 мЗв в год».

В табл. 6 Публикации 103 МКРЗ формулировка несколько другая: «1 mSv in a year» («1 мЗв в год»), и имеется примечание: «In special circumstances, a higher value of effective dose could be allowed in a single year, provided that the average over 5 years does not exceed 1 mSv per year» («При определенных обстоятельствах более высокое значение эффективной дозы может быть позволено в единственном году при условии, что среднее значение за более чем 5 лет не превышает 1 мЗв/год»). Таким образом, в НРБ-99/2009 прямо указывается, что предел дозы для населения может достигать 5 мЗв/год. В Публикации 103 МКРЗ это значение предела дозы не указывается, но отмечается, что оно может превышать 1 мЗв/год. Из этого следует, что установление предела дозы для населения на уровне 5 мЗв/год вполне соответствует принципам нормирования облучения населения исходя из отечественных и международных рекомендаций. В свою очередь, верхняя граница предлагаемого предела пожизненной дозы (500 мЗв) является такой дозой, при которой согласно современным оценкам в ограниченной по численности группе населения будет невозможно выявить неблагоприятные эффекты действия хронических доз радиационного воздействия.

Какой может быть допустимая динамика формирования доз аварийного облучения населения по годам после аварии? Нам представляется, что на первый год это может быть предел дозы 100 мЗв, на второй — 50 мЗв и далее за последующие 10 лет еще 100 мЗв (т. е. в среднем 10 мЗв/год). На оставшиеся годы жизни среднего стандартного человека (примерно 50 лет) можно будет считать допустимым облучение в суммарной дозе 100 или 250 мЗв (т. е. со среднегодовой дозой в диапазоне 2—5 мЗв/год).

Сказанное не противоречит и основным положениям Публикации 103 МКРЗ о том, что осуществление мероприятий по защите населения на острой фазе аварийной ситуации (несколько недель или месяцев, но не более года после аварии) становится обоснованным только в случае, если прогнозируемые дозы облучения людей могут находиться в интервале 0,1—0,5 Гр. Реальное осуществление оптимизированного на основе сложившейся радиологической ситуации перечня защитных мероприятий должно быть заранее спланировано, обеспечено материально и технически, а также учитывать возможные негативные социально-экономические последствия.

В то же время, если прогнозируемые дозы облучения людей за 10 дней после аварии могут превысить 0,5 Гр, необходимо срочное проведение всех реально возможных мер по защите населения, несмотря на финансовые, материальные и социально-экономические потери, связанные с их реализацией. В этом плане рекомендуется ввести ужесточение нормативов по сравнению с установленным в табл. 6.1 НРБ-99/2009 уровнем 1 Гр на все тело за первые двое суток после аварии для осуществления «срочного вмешательства».

Область допустимых доз аварийного облучения в первый год после аварии в диапазоне 20—100 мЗв должна стать зоной действия процессов оптимизации, основанных на сравнении стоимости планируемых к осуществлению мер по снижению доз облучения людей и пользы для них в виде снижения коэффициентов пожизненного риска (снова повторимся: если применение ЛБК в этом диапазоне доз приемлемо!) Естественно, что в этом случае необходимо будет принять и законодательно утвердить величину экономический эквивалент оценки человеческой жизни или потери одного чел./года жизни. Реальная практика компенсации ущерба родственникам погибших в результате аварий и катастроф показывает, что для современной России эта величина близка к 1 млн руб. Исходя из этого значения, можно оценить, что снижение дозы облучения человека со 100 до 20 мЗв/год будет оправданно только в случае, если затраты на данное мероприятие будут на уровне 2500 руб. на одного человека. При существенно более высоких затратах осуществление этого мероприятия по защите человека от воздействия радиации будет не только экономически не обоснованно, а фактически будет наносить ущерб интересам, в том числе здоровью людей, за счет неоправданного перераспределения средств на неэффективные меры.

В чем, на наш взгляд, преимущество предлагаемых изменений в принципах нормирования, связанное с предложением о введении дозовых ограничений именно на пожизненную дозу (350 мЗв для лиц из населения)? Существующая сложная многоступенчатая структура системы радиационной безопасности во многом обязана ЛБК, следование которой и привело к неоправданному ужесточению требований к радиационной безопасности и весьма существенным экономическим, социальным и психологическим издержкам. Предлагаемые нормативы полностью исключают не только детерминированные, но и стохастические эффекты, а также упрощают систему производных уровней (концепцию ограничений). Это позволит сократить число подобных ограничений и сделать их более адекватными и последовательными, существенно либерализовать требования к оценке или изме-

рению годовых доз облучения людей. При этом соблюдение предлагаемых стандартов защиты человека не вводит никаких дополнительных ограничений деятельности или образа жизни человека.

Авария на АЭС «Фукусима-1» еще раз показала, что реализация крупномасштабных радиационных аварий на данном этапе развития технологий и их практической реализации, к сожалению, возможна и приводит к серьезным социально-экономическим последствиям, не смотря на ограниченность радиологических последствий. Это ставит перед обществом неотложные задачи по совершенствованию систем безопасности и надежности самих установок и устройств, а также по развитию и обеспечению готовности к адекватному реагированию на радиационные аварии.

Как уже отмечалось выше, ключевыми направлениями в этой деятельности следует считать:

- усиление научного, программно-технического и экспертного уровня поддержки принятия решений в случае ЧС с радиационным фактором;
- развитие совершенствования и обеспечения надежности национальной системы контроля и оперативного мониторинга радиационной обстановки в случае ЧС радиационного характера;
- совершенствование национальной системы нормирования в области обеспечения радиационной защиты населения.

Литература

1. Reactor Safety Study: An Assessment of Accident Risks in U.S. Commercial Nuclear Power Plants [NUREG-75/014 (WASH-1400)] // <http://www.nrc.gov/reading-rm/doc-collections/nuregs/staff/sr75-014/>.
2. Руководство для пользователей международной шкалы ядерных и радиологических событий / INES. — Вена: МАГАТЭ, 2010. — 235 с.
3. IEAR-EPR. Lessons Learned from the Response to Radiation Emergencies (1945—2010) / IAEA. — Vienna, 2012. — 154 p.
4. *Bolshov L. A., Arutyunyan R. V., Pavlovskiy O. A.* Scientific and technical aspects of the mitigation of possible consequences of the use of a radioactive source in a terrorist attack // Proceedings of an international conference held in Vienna, Austria, 10—13 March 2003, organized by the International Atomic Energy Agency. — [S. l.], 2003. — P. 411—419.

5. *Arutyunian R. V., Bolshov L. A., Pavlovskiy O. A.* Radiological Terrorism: Threat, Priorities in Prevention, and Minimization of Consequences // Social and Psychological Effects of Radiological Terrorism / Ed. by I. Khripunov, L. Bolshov, D. Nikonov. — [S. l.], 2007. — P. 25—46. — (NATO Science for Peace and Security Series, E: Human and Societal Dynamics. Vol. 29).
6. Three Mile Island Accident / WNA. March 2001, minor update Jan 2012 // <http://www.world-nuclear.org/info/default.aspx?id=500&terms=TMI-2>.
7. TMI-2 Lessons Learned Task Force: Final Report / US NUREG. — Washington, DC. 1979. — 55 p. — (NUREG-0585).
8. Three Mile Island: A report to the commissioners and to the public. — Vol. 1 / Nuclear regulatory commission special inquiry group. — [S. l.], 1980. — 196 p.
9. *Rambo S. H.* Three Mile Island: The Judge's Ruling // FrontLine. — 1996. — June 7 (<http://www.pbs.org/wgbh/pages/frontline/shows/reaction/readings/tmi.html>).
10. Nuclear power reactors in the world: Reference Data Series No. 2, 2012 Edition / IAEA. — Vienna, 2012. — 86 p. — (IAEA-RDS-2/31).
11. Assessment on the 66th day of projected external doses for populations living in the north-west fallout zone of the Fukushima nuclear accident — outcome of population evacuation measures: IRSN Report DRPH/2011-10. — Paris, 2011. — 27 p.
12. Testimony of Dr. Henry Kelly, President Federation of American Scientists before the Senate Committee on Foreign Relations. March 6, 2002 // http://www.fas.org/ssp/docs/kelly_testimony_030602.pdf.
13. *Bolshov L., Arutyunyan R., Melihova E., Pavlovski O.* Unauthorized Use of Radiation Sources: Measures to Prevent Attacks and Mitigate Consequences // Proceedings of a Workshop “Countering Urban Terrorism in Russia and the United States”. — Washington, D.C.: The National Academies Press, 2006. — P. 133—150.
14. *Chino M., Ishikawa H., Yamazawa H.* SPEEDI and WSPEEDI: Japanese Emergency Response Systems to Predict Radiological Impacts in Local and Workplace Areas due to a Nuclear Accident // Radiation Protection Dosimetry. — 2011. — 50 (2—4). — P. 145—152.

15. Итоги Всероссийской переписи населения 2010 года. — Т. 1: Численность и размещение населения // http://www.gks.ru/free_doc/new_site/perepis2010/croc/perepis_itogi1612.htm.
16. *Stohl A., Seibert P., Wotawa G.* et al. Xenon-133 and caesium-137 releases into the atmosphere from the Fukushima Daiichi nuclear power plant: determination of the source term, atmospheric dispersion, and deposition // *Atmos. Chem. Phys. Discuss.* — 2011. — 11. — P. 28319—28394.
17. *Арутюнян Р. В., Большов Л. А., Киселев А. Е.* и др. Оперативный анализ аварии на АЭС «Фукусима-1» (Япония) и прогнозирование ее последствий // *Атом. энергия.* — 2012. — Т. 112, № 3. — С. 151—159.
18. *Арутюнян Р. В., Большов Л. А., Припачкин Д. А.* и др. Оценка выброса радионуклидов при аварии на АЭС «Фукусима-1» (Япония) 15 марта 2011 г. // *Атом. энергия.* — 2012. — Т. 112, № 3. — С. 159—163.
19. Публикация 103 Международной комиссии по радиационной защите (МКРЗ): Пер. с англ. / Под общ. ред. М. Ф. Киселева и Н. Д. Шандалы. — М.: ОО ПКФ «Алана», 2009. — 312 с.
20. Expected Doses Over a Year and Evacuation of Fukushima Towns // *The Neutron Economy.* — 2011. — Apr. 28.

Научное издание

ТРУДЫ ИБРАЗ

Под общей редакцией чл.-кор. РАН Л. А. Большова

Выпуск 13

**АВАРИЯ НА АЭС «ФУКУСИМА-1»:
ОПЫТ РЕАГИРОВАНИЯ И УРОКИ**

*Утверждено к печати Ученым советом
Института проблем безопасного развития атомной энергетики
Российской академии наук*

Редактор *А. И. Иоффе*

Издательство «Наука»
117997, Москва, Профсоюзная ул., 90
Зав. редакцией *Е.Ю. Жолудь*
Редактор издательства *Р.С. Головина*

Оригинал-макет подготовлен ООО «Комтехпринт»
Иллюстрации приведены в авторской редакции

Формат 60x90 ¹/₁₆. Бумага офсетная 80 г/м²
Печать офсетная. Гарнитура «Оффицина»
Уч.-изд. л. 8,6. Заказ № 25462

Заказное

Отпечатано с готовых диапозитивов типографией ООО «Инфолио-Принт»