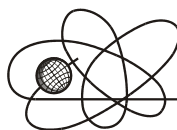




*Российская Академия Наук*

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК

**ИНСТИТУТ ПРОБЛЕМ  
БЕЗОПАСНОГО РАЗВИТИЯ  
АТОМНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ**



**ИБРАЭ**

RUSSIAN ACADEMY OF SCIENCES

**NUCLEAR SAFETY  
INSTITUTE**

Препринт ИБРАЭ № IBRAE-2011-07

Preprint IBRAE-2011-07

**Р.В. Арутюнян, Р.И. Бакин, Л.А. Большов, Д.В. Дзама, Д.А. Припачкин,  
В.Н. Семенов, О.С. Сороковикова, А.В. Фокин, С.Н. Цаун, А.В. Шикин.  
(ИБРАЭ РАН)**

**Р.Ю. Игнатов, К.Г. Рубинштейн, М.М. Смирнова  
(ГУ «Гидрометцентр России»)**

**НЕКОТОРЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ПО  
МОДЕЛИРОВАНИЮ РАДИАЦИОННОЙ  
ОБСТАНОВКИ И ОЦЕНКЕ ИСТОЧНИКА  
АВАРИЙНОГО ВЫБРОСА НА АЭС ФУКУСИМА-1  
С УЧЕТОМ ТРЕХМЕРНЫХ ПОЛЕЙ  
МЕТЕОДАНЫХ**

Москва  
2011

Moscow  
2011

Арутюнян Р.В., Бакин Р.И., Большов Л.А., Дзама Д.В., Припачкин Д.А., Семенов В.Н., Сороковикова О.С., Фокин А.В., Цаун С.Н., Шикин А.В. (ИБРАЭ РАН), Игнатов Р.Ю., Рубинштейн К.Г., Смирнова М.М. (ГУ «Гидрометцентр России»). Некоторые результаты по моделированию радиационной обстановки и оценке источника аварийного выброса на АЭС Фукусима-1 с учетом трехмерных полей метеоданных. Препринт № IBRAE-2011-07. М. : ИБРАЭ РАН, 2011. — 18 с. — Библиогр.: 5 назв. — 72 экз.

#### Аннотация

Представлены результаты оценки источника выброса при аварии на АЭС Фукусима-1 и моделирования радиационной обстановки на территории Японии с использованием подробных трехмерных полей метеоданных. Показано, что поля ветра, температур и осадков полученные по модели WRF-ARW с разрешением 10 км, находятся в хорошем согласии с результатами анализа NCAR (Национальный центр прогнозирования поведения окружающей среды, США). Полученные, на основе моделирования, оценки мощности дозы в точках контроля радиационной обстановки на территории Японии отличаются от результатов аэрогаммасъемки не более чем 2 раза. Предложенные нами оценки источников аварийных выбросов в атмосферу в течение 15 марта 2011 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 Cs-137 на основе данных мониторинговых служб.

©ИБРАЭ РАН, 2011

Arutyunyan R.V., Bakin R.I., Bolshov L.A., Dzama D.V., Pripachkin D.A., Semyonov V.N., Sorokovikova O.S., Fokin A.V., Tsaun S.N., Shikin A.V. (IBRAE RAN), Ignatov R.Y., Rubinstein K.G., Smirnova M.M. (State Institution "Hydrometeorological Centre of Russia"). Some results of modeling the radiation conditions and assessing the source term at Fukushima-1 NPP with three-dimensional fields of meteorological data. Preprint No. IBRAE-2011-07. Moscow, Nuclear Safety Institute of the Russian Academy of Sciences (IBRAE RAN), 2011, 20 p.

#### Abstract

The results of assessment of source term in the accident at Fukushima-1 NPP and modeling of the radiation situation in Japan territory using detailed three-dimensional fields of meteorological data are presented. It is shown that the wind, temperature and precipitation fields found from the WRF-ARW model with resolution of 10 km are in good agreement with the results of NCEP (National Centers for Environmental Prediction, USA). The dose rates assessed on the basis of modeling at the points of radiation monitoring in Japan differ from results of airborne gamma survey no more than 2 times. Proposed assessments of the sources of accidental releases into the atmosphere during March 15, 2011 due to a series of accidents at the units of Fukushima-1 NPP, on the whole, correspond to the real radiation conditions. This is confirmed by the simulation results, data of dose rate measurements, results of airborne gamma survey and estimates of Cs-137 fallout based on the data of monitoring services.

©Nuclear Safety Institute, 2011

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

*Арутюнян Р.В., Бакин Р.И., Большой Л.А., Дзама Д.В., Припачкин Д.А., Семенов В.Н.,  
Сороковикова О.С., Фокин А.В., Цаун С.Н., Шикин А.В. (ИБРАЭ РАН)  
Игнатов Р.Ю., Рубинштейн К.Г., Смирнова М.М. (ГУ «Гидрометцентр России»)*

ИНСТИТУТ ПРОБЛЕМ БЕЗОПАСНОГО РАЗВИТИЯ АТОМНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ  
115191, Москва, ул. Б. Тульская, 52  
тел.: (495) 955-23-50, факс: (495) 955-22-20, эл. почта: [prad@ibrae.ac.ru](mailto:prad@ibrae.ac.ru)

## Содержание

1 Введение.....	3
2 Подготовка метеорологических данных для моделирования распространения выбросов радиоактивных веществ в атмосферу при аварии на АЭС Фукусима-1 над территорией Японии .....	4
3 Анализ результатов локальных прогнозов атмосферных условий в точке с координатами АЭС ФУКУСИМА-1 на основе использования модели WRF-ARW .....	5
4 Сопоставление результатов моделирования с данными мониторинга радиационной обстановки на территории Японии, результатами аэрогаммасъемки и оценкой выпадений в районах расположения точек контроля.....	11
Заключение .....	18
Литература.....	18

## 1 Введение

Произошедшее 11 марта 2011 года землетрясение в Японии с эпицентром в Тихом океане привело, к образованию цунами с высотой волны на побережье около 15 метров. Волна стала причиной возникновения аварийной ситуации на целом ряде АЭС в Японии. При этом на АЭС Фукусима-1 (Даичи) сложилась наиболее тяжелая обстановка. Развитие аварии на АЭС Фукусима-1, 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 Дальнего Востока РФ и Японии; выработка рекомендаций по защите населения и объектов окружающей среды; оценка эффективности защитных мероприятий и их оптимизация для конкретных условий с учетом радиологических, экономических и социальных условий. Кроме того, проводился анализ поступающей 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.

Для оценки 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 её 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 ОЯТ, 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, №2, №3 и №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. Модель является составной частью расчетного кода НОСТРАДАМУС, разработанного в ИБРАЭ РАН. Расчетный код НОСТРАДАМУС является верифицированным на международных экспериментах [2] и аттестованным программным средством [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) [[http://www.mmm.ucar.edu/wrf/users/download/get\\_source2.html](http://www.mmm.ucar.edu/wrf/users/download/get_source2.html)] с пространственным разрешением 10 км.

Данные радиационного мониторинга ситуации 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 при аварии на АЭС Фукусима-1.

## **2 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 ФГБУ «Гидрометцентр России» была создана система гидродинамического прогноза метеорологических полей для территории Японии и Дальнего Востока России. В рамках данной работы для прогноза метеорологических полей создана конфигурация региональной негидростатической гидродинамической модели WRF-ARW Weather (Погода), Research (Исследование), Forecast (Прогноз) с пространственным разрешением 10 км. Эта модель свободно распространяется через Интернет, достаточно хорошо описана и внедрена в ФГБУ «Гидрометцентр России» для решения большого числа прикладных метеорологических задач и оперативной работы. На рис. 1 представлена область моделирования и орография местности, которая использовалась 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 минуту. Частота выдачи метеорологических полей для расчета с помощью кода НОСТРАДАМУС варьировалась от часа до 10 минут.

В качестве начальных данных использовался анализ, а для граничных условий прогноз NCEP (Национальный центр прогнозирования поведения окружающей среды, США) с пространственным разрешением 0.5 градуса по горизонтали, 27 уровней по вертикали с временным шагом 6 часов. Кроме орографии в расчетах учитываются тип подстилающей поверхности (океан и типы подстилающей поверхности на суше). Расчеты для территории Японии и Дальнего Востока России проводились 2 раза в сутки – в срок 00 и 12 СГВ (Среднего времени по Гринвичу).

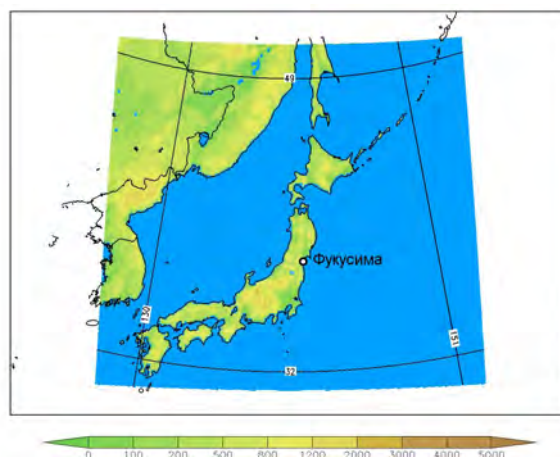


Рис. 1. Область прогнозирования для территории Японии и Дальнего востока России и ее орография

### 3 Анализ результатов локальных прогнозов атмосферных условий в точке с координатами АЭС ФУКУСИМА-1 на основе использования модели WRF-ARW

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

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

№ события	Блок	Дата и Время (по Японии)	Событие	Примечание
1	1	12марта 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

На основе прогностических данных по вертикальному градиенту температур на высотах 2-300 метров и данных о ветре были оценены классы устойчивости. Для этого была использована методика оценки класса устойчивости по типовым значениям разности температур и ветра [4]. Вертикальный профиль температуры и векторы скорости ветра приведены на рис. 2. и рис. 3.

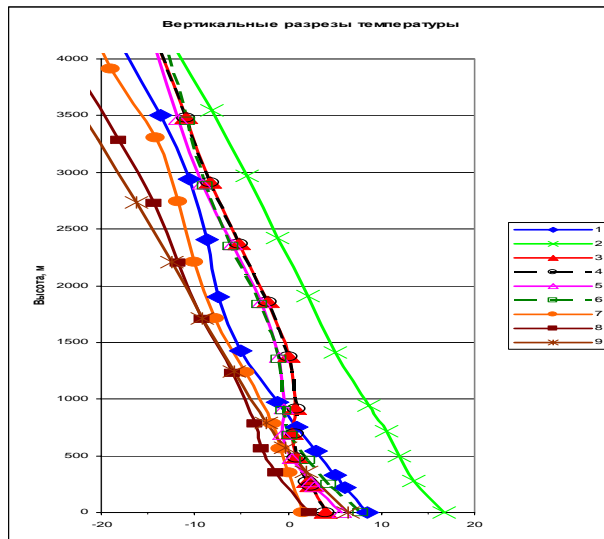


Рис. 2 Вертикальные профили прогнозируемых температур воздуха в точке с координатами АЭС Фукусима-1 (Даичи) с 11 по 16 марта 2011г



Рис. 3 Направления и скорости прогнозируемого ветра в точке с координатами АЭС Фукусима-1 (Даичи) с 11 по 16 марта 2011г

Можно видеть, что в случаях событий 1-4 и 6 ветер был крайне переменчив по направлению. На графиках вертикальных профилей температуры можно видеть, что наблюдались и значительные изменения приземной температуры за это время (от нуля 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, переменчивой. 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 таблице 2.

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 течение 15 марта по предварительному прогнозу по модели WRF-ARW ветра, соответствующего сформировавшемуся северо-западному следу не наблюдалось.

Для повышения точности оценки движения газо-аэрозольных облаков и учета особенностей местности были использованы детальные дополнительные прогнозы метеорологических полей с 11 по 18 марта 2011 года. В течение периода с 11 по 26 марта 2011 года 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, и 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, действительно могло быть крайне неблагоприятно, так как способствовало осаждению с дождём 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 (Национальный центр прогнозирования поведения окружающей среды, США), на те же моменты времени с разрешением около 50 км. Некоторые результаты этого сравнения приведены на рис.4-6. На этих рисунках представлены поля ветра на высоте 10 м 15 марта в 00, 06 и 12 СГВ (Среднего времени по Гринвичу). Видно, что в некоторые моменты времени поля ветра по обеим моделям близки. Но в модели NCEP нет имевшего место юго-восточного ветра, сформировавший след загрязнения 15 марта в северо-западном направлении от АЭС Фукусима-1.

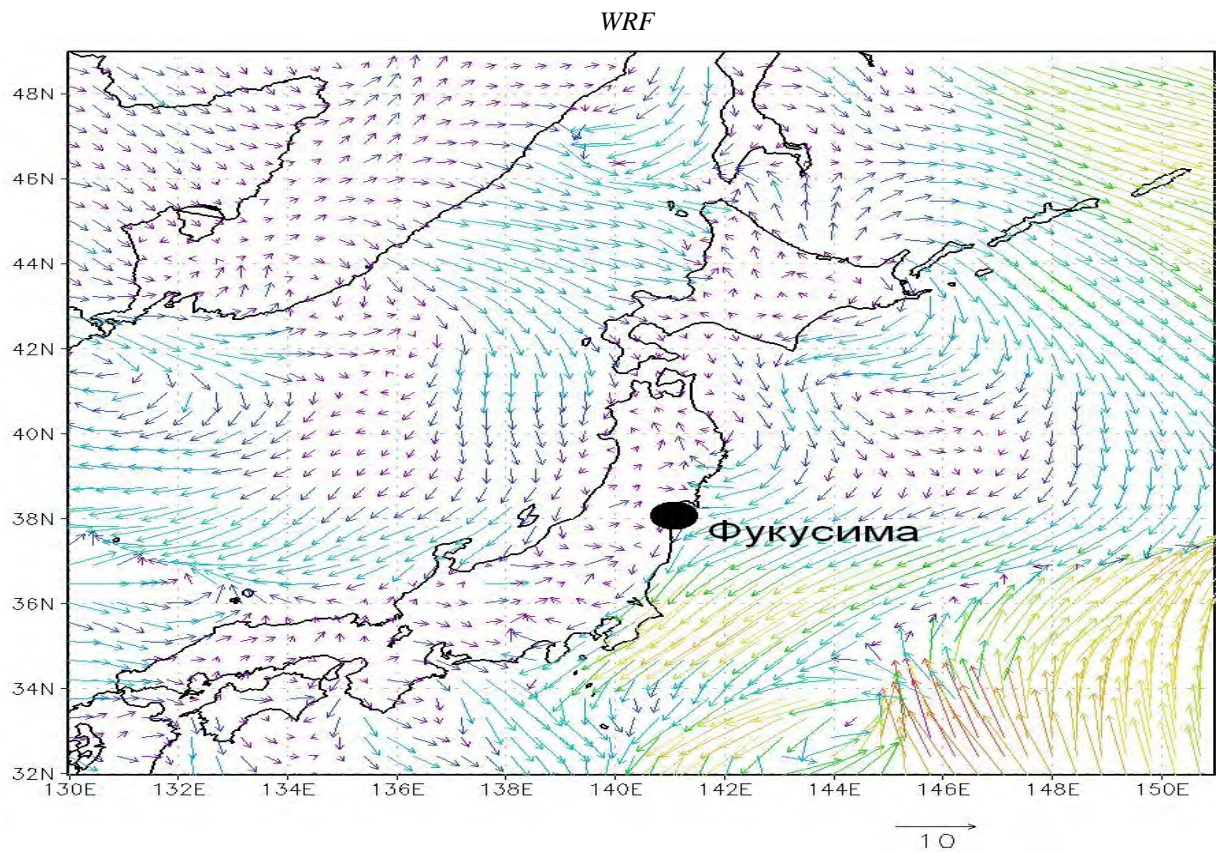
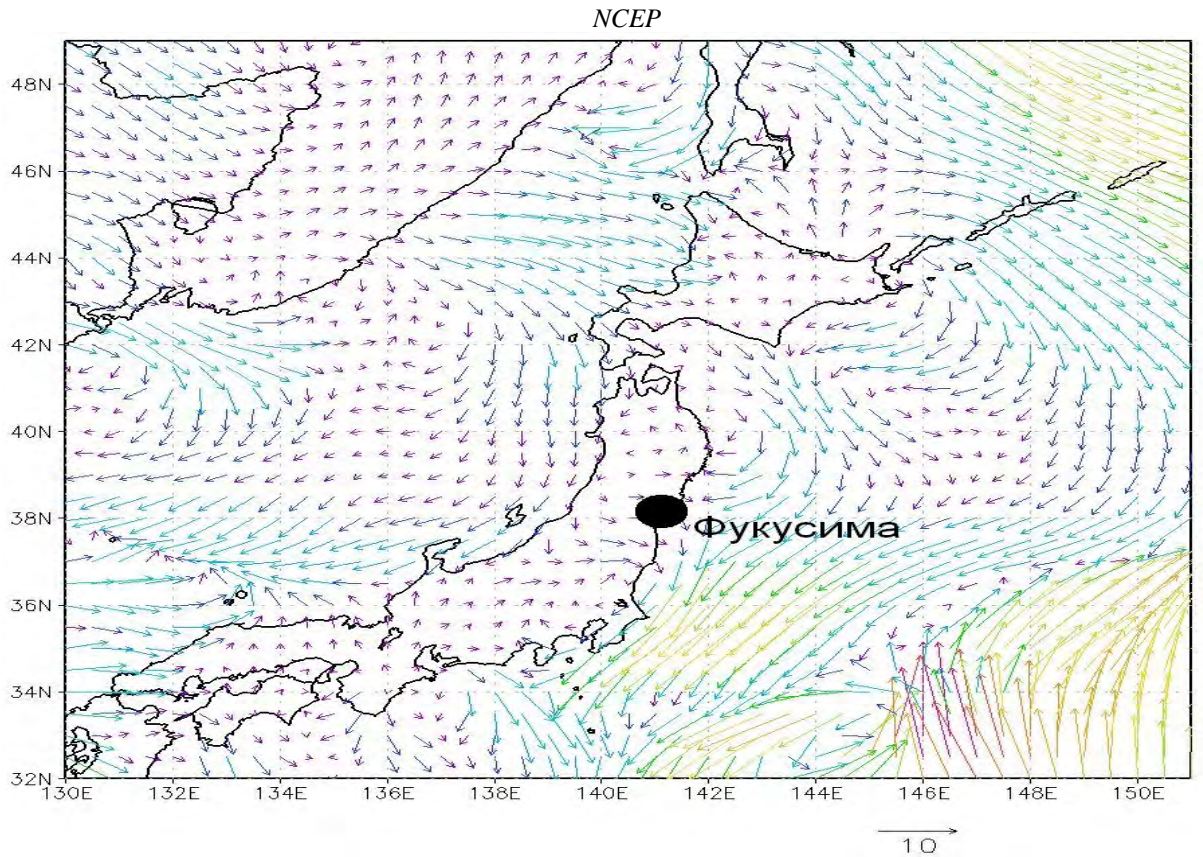
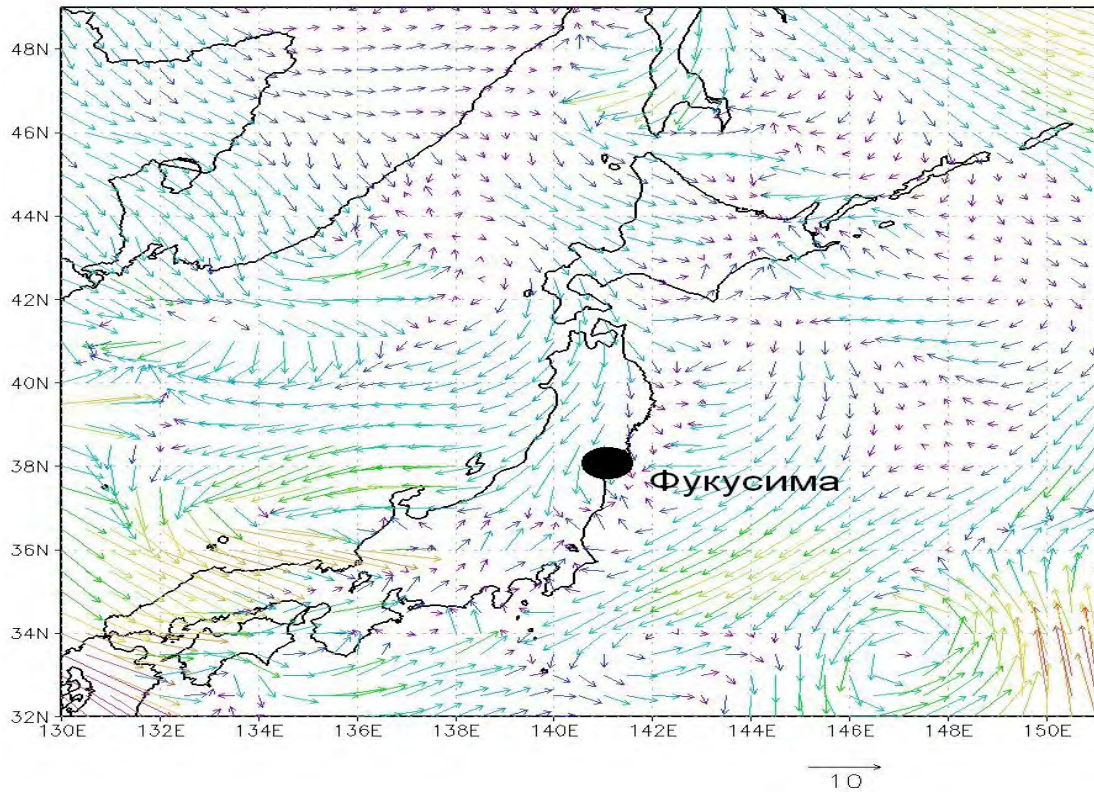


Рис. 4 Карты ветра на высоте 10 м. за 00 часов 15 марта 2011 г (СГВ) из анализа NCEP с разрешением 50км и прогноза по WRF с разрешением 10 км



NCEP



WRF

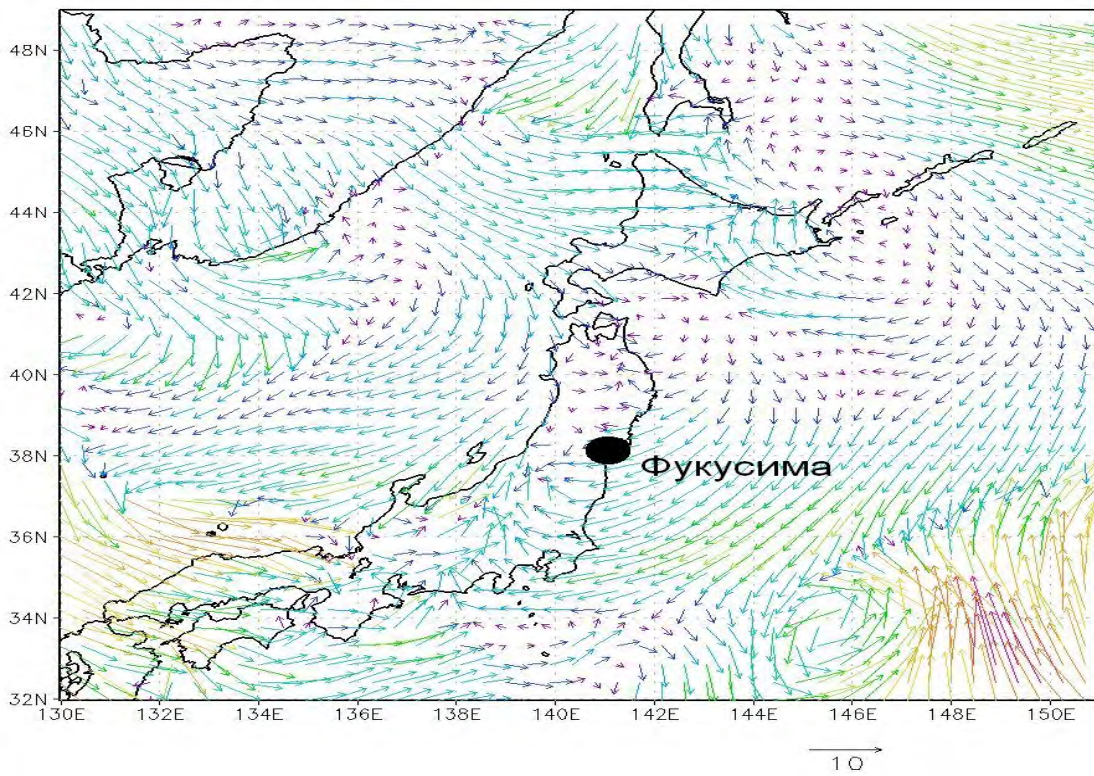


Рис. 5 Карты ветра на высоте 10 м. за 06 часов 15 марта 2011 г (СГВ) из анализа NCEP с разрешением 50км и прогноза по WRF с разрешением 10км

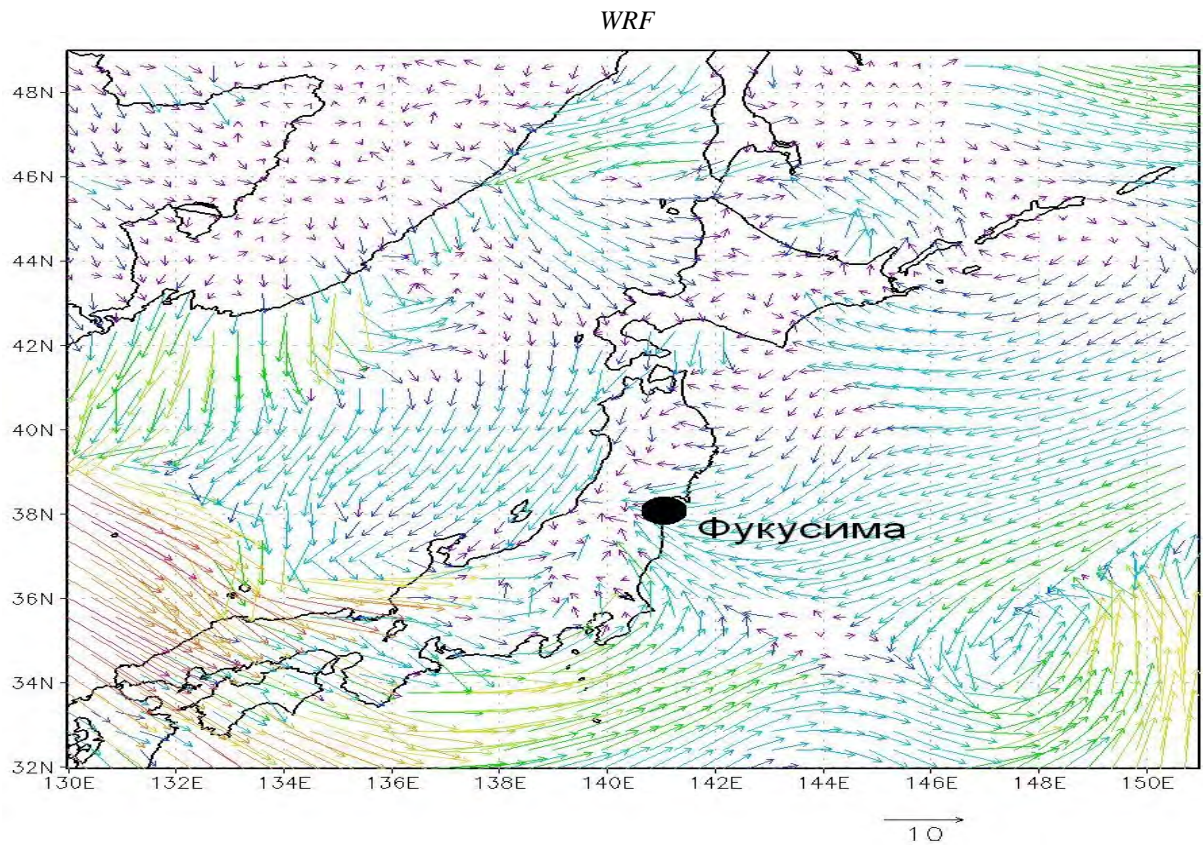
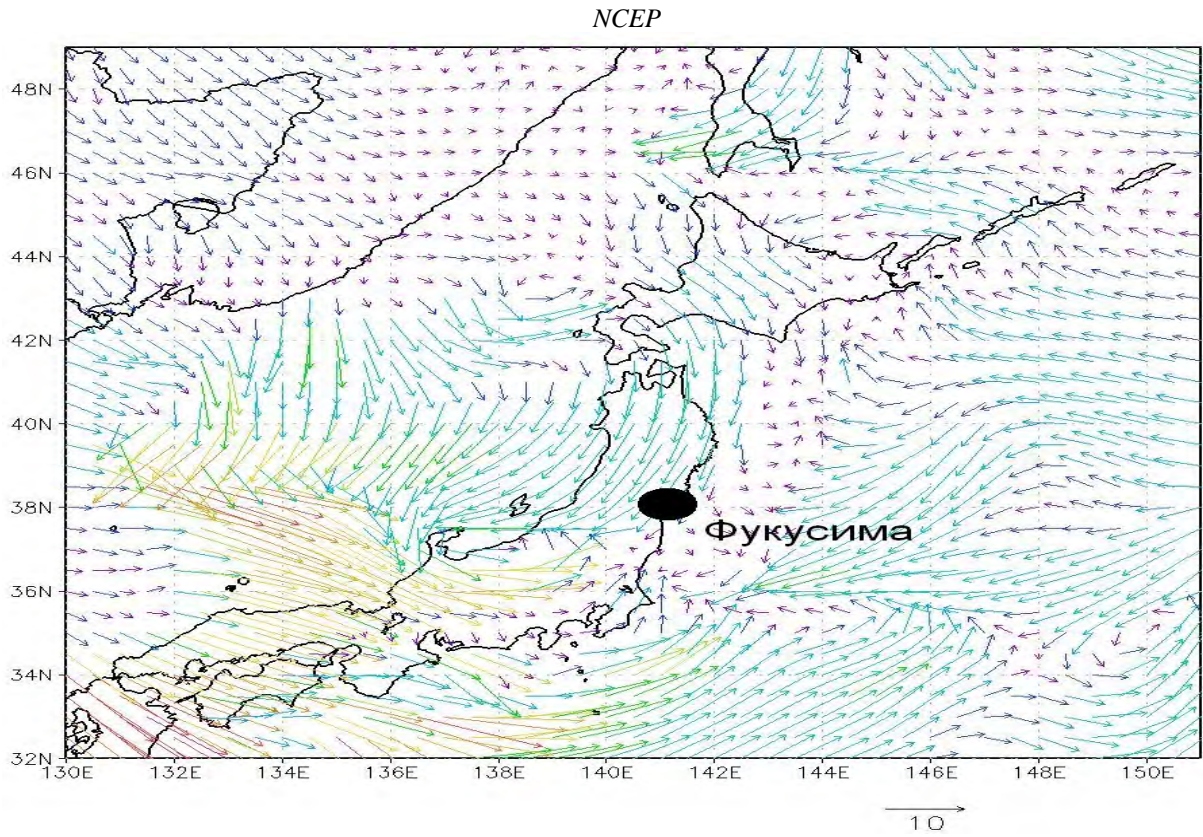


Рис. 6 Карты ветра на высоте 10 м. за 12 часов 15 марта 2011 г (СГВ) из анализа NCEP с разрешением 50км и прогноза по WRF с разрешением 10км

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, так называемый «Зdvar». С 15 марта, в связи с подходом с юго-запада циклона, начались интенсивные дожди. Некоторые карты прогностических осадков приведены на рис. 7.

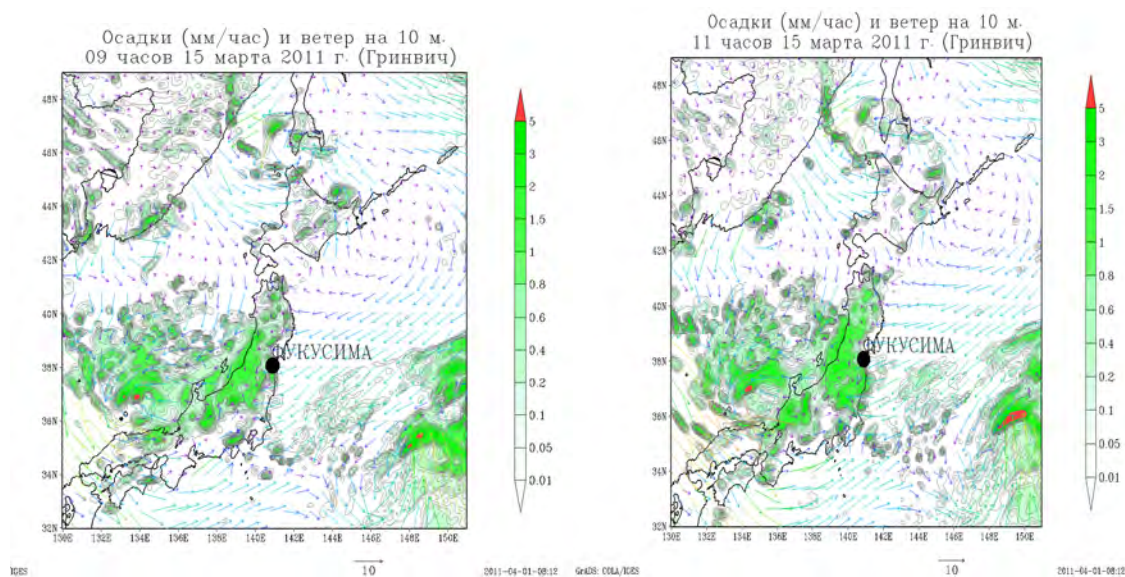


Рис. 7 Карты прогностических осадков над Японией в 9 и 11 часов 15 марта 2011г (СГВ)

#### 4 Сопоставление результатов моделирования с данными мониторинга радиационной обстановки на территории Японии, результатами аэрогаммасыёмки и оценкой выпадений в районах расположения точек контроля

По данным мониторинга радиационной обстановки на территории Японии до 15 марта 2011 года 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 на территории Японии 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 0:00 до 10:00 за 15 марта 2011 были зарегистрированы следующие события:

- 0:00** – начало вентилирования на блоке № 2;
- 5:45** – замечено возгорание в районе бассейна ОЯТ на блоке №4;
- 6:00** – громкий звук внутри защитной оболочки на блоке № 2;
- 9:40** – потушен пожар на блоке №4.

Кроме того, установлено, что на датчиках мониторинга радиационной обстановки (рис.8.) на промплощадке АЭС Фукусима-2 (Даини), расположенной в префектуре Фукусима в 12 км к югу от АЭС Фукусима-1 мощность дозы в 4:00 15 марта составляла 145 мкЗв/час, 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/час. На рис. 9 представлена динамика изменения мощности дозы за 15 марта 2011 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.

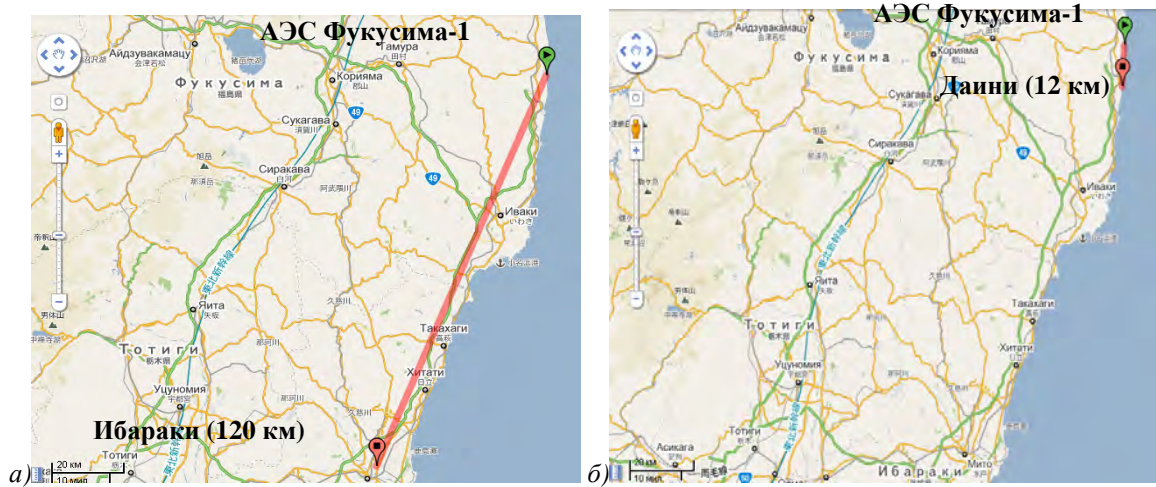


Рис. 8 Расположение точек мониторинга радиационной обстановки

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

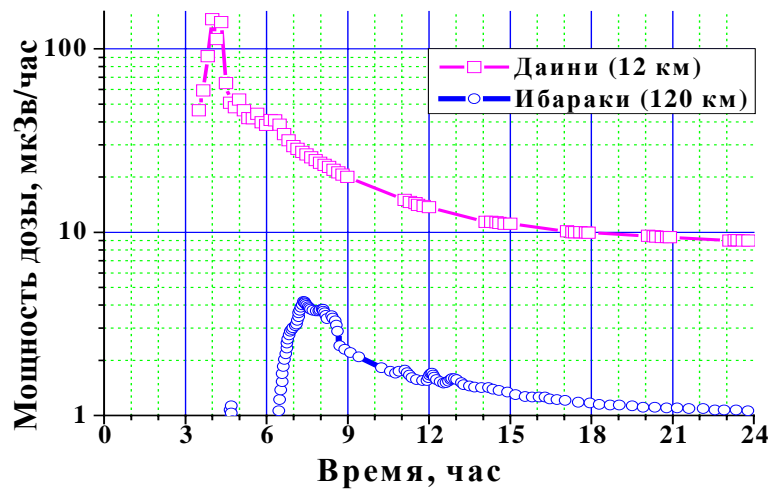


Рис.9 Показания датчиков мониторинга радиационной обстановки

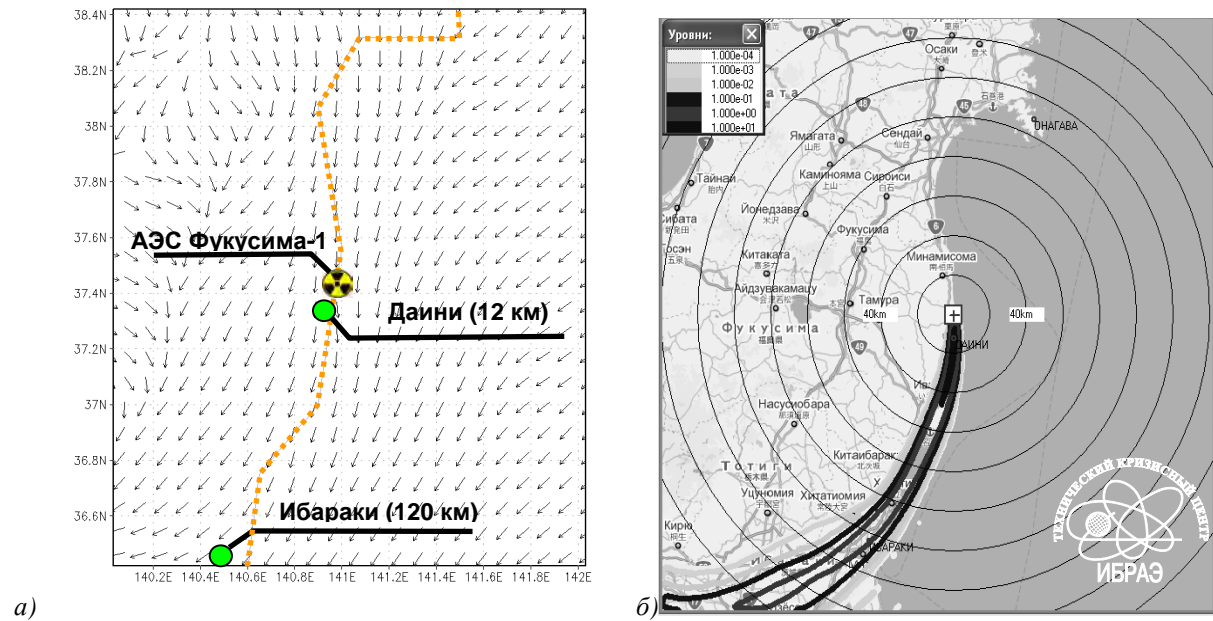
Результаты моделирования с разными вариантами предположений о выходе в атмосферу продуктов деления и сопоставление с данными мониторинга позволили предположить, что в ночное и утреннее время 15 марта в окружающую среду поступило не более 5-6 % РБГ, 0,5 % йода и 0,3% цезия от находящегося в топливе на блоке №2 и в бассейне ОЯТ на блоке №4 (Таблица 2). Аварийный источник вероятнее всего определяется радионуклидами из газового зазора твэлов на блоках №2 и №4.

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

Нуклид	Выход, Бк	Примечание
Kr-85	$2,7 \cdot 10^{15}$	Из бассейна ОЯТ блока №4 и активной зоны блок № 2
Xe-133	$1,7 \cdot 10^{17}$	Из бассейна ОЯТ блока №4 и активной зоны блок № 2
Xe-135	$2,3 \cdot 10^{15}$	Из бассейна ОЯТ блока №4 и активной зоны блок № 2
I-131	$7,5 \cdot 10^{15}$	Из активной зоны блока № 2
I-132	$8,0 \cdot 10^{15}$	Из активной зоны блока № 2
I-133	$1,7 \cdot 10^{15}$	Из активной зоны блока № 2
Te-132	$7,8 \cdot 10^{14}$	Из активной зоны блока № 2
Cs-134	$2,2 \cdot 10^{15}$	Из бассейна ОЯТ блока №4 и активной зоны блока № 2
Cs-137	$1,4 \cdot 10^{15}$	Из бассейна ОЯТ блока №4 и активной зоны блока № 2

На основе подробных данных о состоянии атмосферы за 15 марта с учетом полей скорости ветра в слое до 2-3 км, высоты выброса 100 м при возможном взрыве водорода и высоты выброса 300 м при пожаре были выполнены расчеты мощности дозы в точках мониторинга с помощью модели из программного пакета «НОСТРАДАМУС». При этом предполагалось, что выброс при взрыве водорода распределен во времени - 10 % от суммарной активности выброса в течение 1-2 мин и 90% в течение 60 мин. Длительность выброса при пожаре 4 часа (240 мин).

На рис. 10 показаны поле приземного ветра 15 марта в 6:00 (по Японии) в районе аварийной АЭС, датчиков мониторинга радиационной обстановки на АЭС Даини и в префектуре Ибараки, а также показана мощность дозы (мкЗв/час) от поверхности земли после прохождения радиоактивного облака.



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

Анализ результатов моделирования показал, что в районе площадки АЭС Фукусима-2 Даини мощность дозы после прохождения облака составляла 10-20 мкЗв/час, а в префектуре Ибараки 1-2 мкЗв/час. 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 Даини и в префектуре Ибараки.

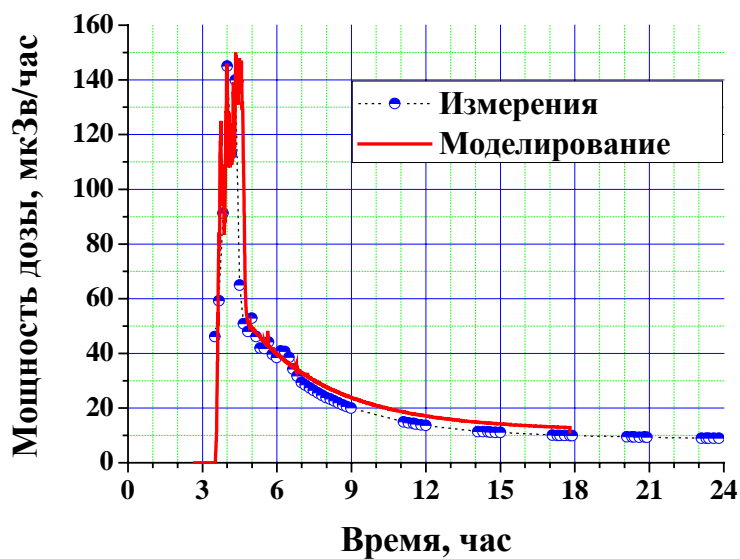


Рис.11 Мощность дозы на промплощадке АЭС Фукусима-2 Даини

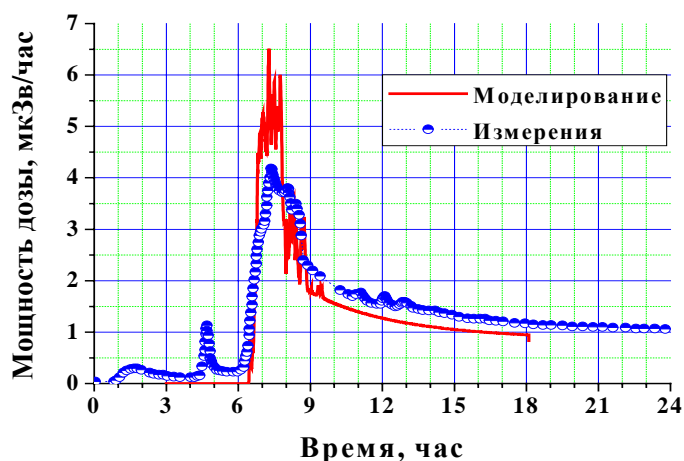


Рис.12 Мощность дозы в префектуре Ибараки

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 Даини 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 (десятки мин). 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 (Таблица 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 в это время, существенно превосходило выброс в первой половине дня. При этом официально не сообщалось о каких-либо происшествиях на АЭС в этот период. Возможно это свя-

зано с частичной или полной эвакуацией персонала с АЭС из-за существенного ухудшения радиационной обстановки на территории АЭС. 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 суток) не было достоверных данных о прохождении радиационного облака и формировании выпадений на поверхность земли в этом направлении. Ближайшей точкой, где проводили непрерывный мониторинг с 15 марта с 12:00 с повторяемостью 2 раза в час, был город Фукусима-сити, 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. Из-за того, что информации о мощности дозы во время выбросов радиоактивных веществ и переноса их в северо-западном направлении от АЭС недостаточно. Для оценки источника выброса за вторую половину дня 15 марта использовали 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-сити. Кроме того, было проведено сравнение расчетных значений мощности дозы в опорных точках контроля радиационной обстановки с измерениями мощности дозы с помощью аэрогаммаъемки местности (по данным Департамента Энергетики, США) [5].

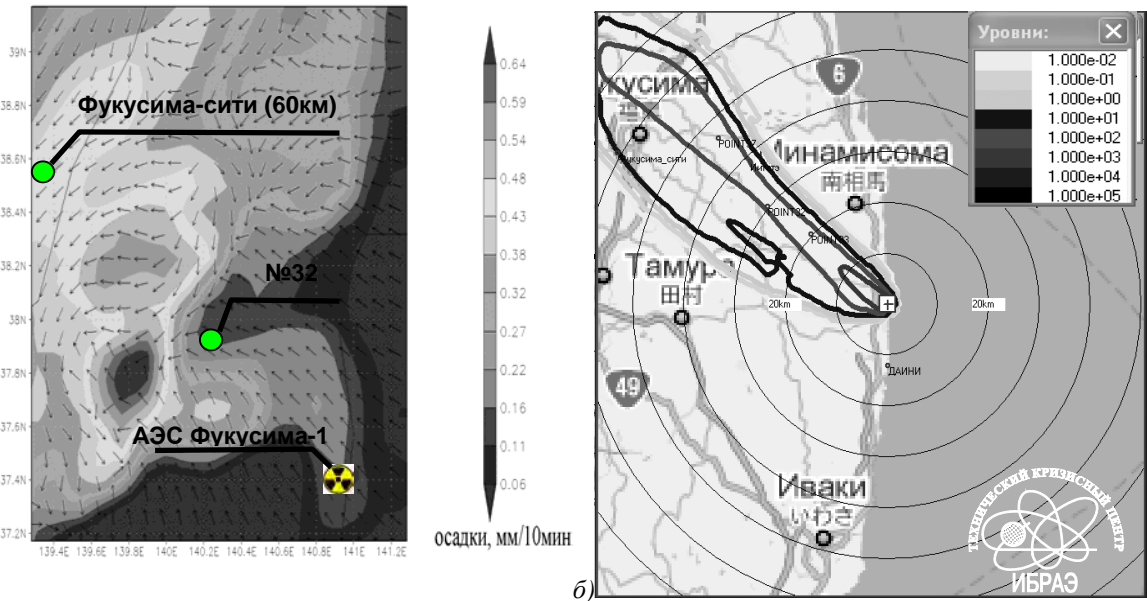
По нашим оценкам во второй половине дня 15 марта в окружающую среду в северо-западном направлении было выброшено не более 10-15 % РБГ, йода, теллура и цезия от находящегося в топливе реактора №2 (Таблица 3). Официально подтверждается разрушение мокрой части контаймента на блоке № 2 (данные JAIF, Япония). 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	Примечание
Kr-85	$3,7 \cdot 10^{15}$	Из активной зоны блока № 2
Xe-133	$2,4 \cdot 10^{17}$	
Xe-135	$3,3 \cdot 10^{15}$	
I-131	$1,8 \cdot 10^{17}$	
I-132	$2 \cdot 10^{17}$	
I-133	$3 \cdot 10^{17}$	
Te-132	$1,3 \cdot 10^{17}$	
Cs-134	$4,8 \cdot 10^{16}$	
Cs-137	$2,9 \cdot 10^{16}$	

При моделировании распространения выброса в атмосфере с помощью программного средства «НОСТРАДАМУС» предполагалось, что длительность выброса составляла 3 часа (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 произойти 15 марта не раньше 15:00 и не позднее 18:00. В противном случае распространение радиоактивных веществ в северо-западном направлении от АЭС не возможно. При этом предполагалось, что выброс распределен по времени - 50 % от суммарной активности выброса в течение 2 часов и 50 % в течение последующих 60 мин.

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



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

Анализ результатов моделирования показал, что в точке № 32 мощность дозы после прохождения облака составляла 170 мкЗв/час, а через 24 часа 160 мкЗв/час. В районе г.Фукусима-сити мощность дозы после прохождения облака составляла 8 мкЗв/час, а через 24 часа 7,5 мкЗв/час. 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 г. Фукусима-Сити в префектуре Фукусима за 20 дней с 15 марта по 3 апреля (в часах).

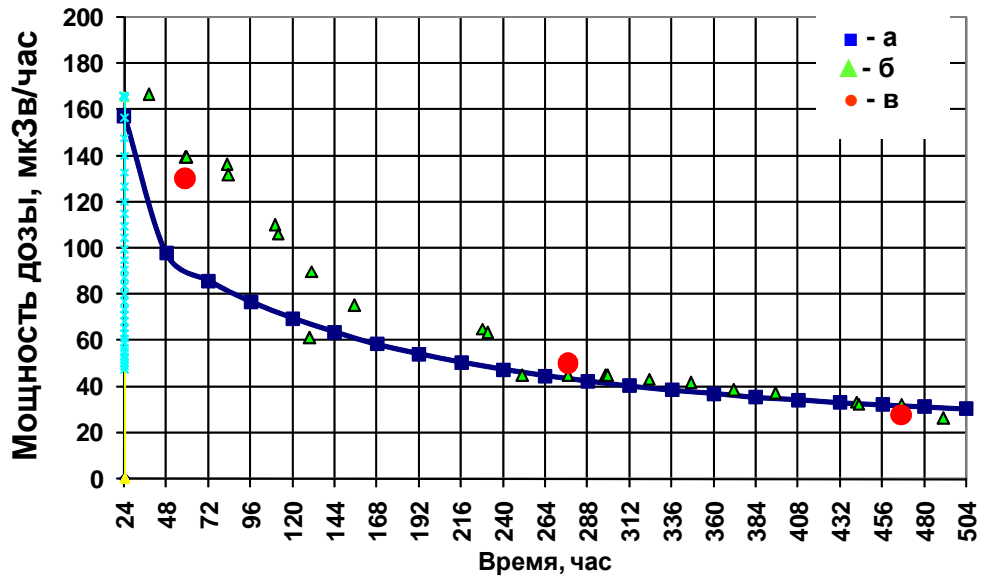


Рис. 14 Мощность дозы в точке № 32. Расчет по ПС «НОСТРАДАМУС» (а), измерение по данным МЕХТ (б), результаты аэрогаммасъемки, данные Департамента Энергетики США (в).



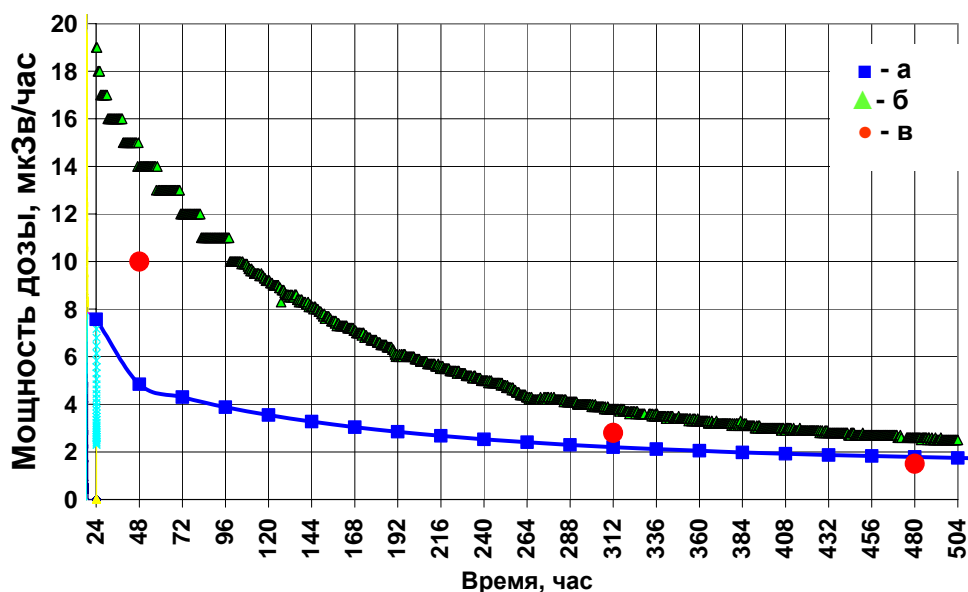


Рис. 15 Мощность дозы в г.Фукусима-сити. Расчет по ПС «НОСТРАДАМУС» (а), измерение по данным МЕХТ (б), результаты аэрогаммасъемки, данные Департамента Энергетики США (в).

Из рисунков 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, Япония) и измерениями, полученными при аэрогаммасъемке местности (по данным Департамента Энергетики, США). Если в течение первых суток результаты расчета отличаются от измерений в 2-3 раза, то к 20 суткам (т.е. к 3-4 апреля) разница не превышает 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 с радионуклидным составом выброса можно считать, что результаты расчет с помощью ПС «Нострадамус» приемлемы для оценки источника выброса. В долгосрочной перспективе радиационная обстановка на территории Японии, загрязненной вследствие 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 суток после выброса).

Для подтверждения полученной нами оценки аварийного выброса, кроме сравнения результатов моделирования с данными измерений мощности дозы, были выполнены расчеты выпадений Cs-137 в районах размещения точек контроля радиационной обстановки. В таблице 4 представлены результаты расчетов выпадений Cs-137, полученные с помощью ПС «Нострадамус», основанные на измерениях мощности дозы по данным МЕХТ и оценки выпадений Cs-137 по данным Департамента Энергетики США.

Таблица 4. Выпадения Cs-137 вблизи точек контроля радиационной обстановки

Точка контроля	Выпадения Cs-137, Ки/км <sup>2</sup>		
	«Нострадамус»	МЕХТ, Япония	Департамент Энергетики США
АЭС Даини	11	13	12
преф. Ибараки	3	1,3	<8
Точка № 32	102	173	120
г.Фукусима-сити	6	9	12
деревня Иитате	50	30	54
Точка № 83	200	300	450

Сравнение результатов расчета выпадений Cs-137, полученных с помощью ПС «НОСТРАДАМУС», с расчетами на основе данных мониторинга радиационной обстановки (МЕХТ, Япония) и оценками Департамента Энергетики США 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 %. Полученные оцен-

ки выпадений свидетельствуют о том, что моделирование переноса радионуклидов в атмосфере в течение 15 марта корректно, а их изначальное количество в выбросе из помещений аварийной АЭС достаточным для создания подобных уровней загрязнения территории Японии.

## Заключение

В статье приведены оценки источников аварийных выбросов, происходивших в течение 15 марта 2011 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 на территории Японии. При этом расчетные значения мощности дозы отличаются от результатов аэрогаммасъемки не более чем 2 раза. При тех уровнях неопределенностей, которые возникают при измерениях мощности дозы, можно считать, что расчетные значения мощности дозы хорошо совпадают с результатами аэрогаммасъемки. Кроме измерений мощности дозы была проведена оценка выпадений Cs-137 вблизи некоторых точек контроля радиационной обстановки. Показано, что выпадения Cs-137 рассчитанные по результатам моделирования отличаются от данных мониторинговых служб не более чем на 40 %. По нашим оценкам за 15 марта 2011 в атмосферу было выброшено: радионуклидов йода  $\sim 4 \cdot 10^{17}$  Бк и цезия  $\sim 1 \cdot 10^{17}$  Бк; РБГ  $\sim 4 \cdot 10^{17}$  Бк. В таблице 5 приведены выбросы I-131 и Cs-137 в атмосферу по нашим оценкам за 15 марта и оценкам NISA, NSC (Япония) на 12 апреля и IRSN (Франция) на 22 марта, а также сравнение с выбросом при аварии на Чернобыльской АЭС.

**Таблица 5. Оценки выброса I-131 и Cs-137 в атмосферу**

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

Наша оценка выброса за 15 марта превышает оценки NISA и NSC в 2 раза, и оценку IRSN в 3 раза, соответственно. Оценка выброса по I-131 составляет  $\sim 11$  % и по Cs-137 составляет  $\sim 35$  % от выброса при аварии на Чернобыльской АЭС. При этом оценки NISA, NSC, IRSN и наша оценка выброса соответствуют 7 Уровню по Международной шкале Ядерных Событий (INES). Таким образом, предложенные нами оценки источников аварийных выбросов в атмосферу в течение 15 марта 2011 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 Cs-137 на основе данных мониторинговых служб.

## Литература

1. Федеральный надзор России по ядерной и радиационной безопасности. Аттестационный паспорт программного средства СОКРАТ (для моделирования внутрикорпусной стадии запроектных аварий на реакторных установках с водой под давлением). Регистрационный номер паспорта аттестации 275 от 13.05.2010.
2. Моделирование распространения радионуклидов в окружающей среде. Труды ИБРАЭ РАН под редакцией чл.-кор. Л.А. Большова. Выпуск 9. Москва Наука 2008 — 229 с.
3. Федеральный надзор России по ядерной и радиационной безопасности. Аттестационный паспорт программного средства НОСТРАДАМУС. Регистрационный номер паспорта аттестации 158 от 28.03.2003.
4. Атмосфера. Справочник. Ленинград. Гидрометеиздат 1991., с.184.
5. <http://nnsa.energy.gov/mediaroom/pressreleases/fukushimadata>