

УДК 681.742.535.361

Интенсивность ионообразования в районе аварийного выброса АЭС «Фукусима-1»

Г.А. Колотков, С.Т. Пенин*

Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН
634021, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1

Поступила в редакцию 22.03.2012 г.

Детальный анализ аварийных выбросов АЭС «Фукусима-1» показал, что наибольший вклад в интенсивность ионообразования вносят изотопы с длительным периодом полураспада ^{129}I , ^{134}Cs , ^{135}Cs , ^{137}Cs , ^{125}Sb , ^{85}Kr . Методы оценки, использовавшиеся после аварии на Чернобыльской АЭС, позволяют провести анализ интенсивности ионообразования в районе АЭС «Фукусима-1».

Ключевые слова: АЭС «Фукусима-1», радиоактивный выброс, ионообразование; Fukushima Daiichi nuclear power plant, radioactive release, ion formation.

Введение

В результате аварии 11 марта 2011 г. на АЭС (атомная электростанция) «Фукусима-1» (Япония) в атмосферу было выброшено порядка 10^{16} Бк [1]. Основными радионуклидами, входящими в состав выброса, были ^{129}I , ^{134}Cs , ^{135}Cs , ^{137}Cs , ^{125}Sb . Известно, что наибольший вклад в изменение интенсивности ионообразования в приземном слое атмосферы вносит уровень радиоактивности подстилающей поверхности. В условиях повышенной ионизации воздуха происходят изменения концентраций ионных, аэрозольных и газовых компонентов атмосферы.

При уровнях ионизации выше $10^{-7} \text{ см}^{-3} \cdot \text{с}^{-1}$ наблюдаются рост концентрации аэрозолей и молекул примесных газов, а также изменение химизма частиц и появление новых газов [2]. Все это может приводить к нарушению санитарно-гигиенических требований и норм, к погоднo-климатическому изменению и изменению условий радиосвязи. Радиолокационные методы мониторинга радиоактивного загрязнения обладают рядом преимуществ перед прямыми методами: дальность и пространственная разрешающая способность [3]. Методы дистанционного мониторинга радиоактивного загрязнения

могут основываться на определении концентрации молекулярных ионов [4]. В настоящей статье рассмотрен процесс ионообразования в районе аварийного радиоактивного выброса АЭС «Фукусима-1» по данным [5, 6].

Аварийные выбросы АЭС «Фукусима-1»

Данные по выбросам АЭС «Фукусима-1» различаются по количеству и по составу радионуклидов. За 12 и 13 марта, по данным IRSN (Radioprotection and Nuclear Safety Institute), было выброшено цезия $3 \cdot 10^{15}$ Бк, йода $2 \cdot 10^{16}$ Бк, а по данным СТВТО (Comprehensive Nuclear-Test-Ban Treaty Organization) – $1,3 \cdot 10^{17}$ и $5 \cdot 10^{15}$ Бк соответственно. Детальный состав аварийного выброса рассчитывался IRSN на основе знания реакторов, работавших на тот момент: 1-й реактор – 400 ТВЭЛов, 2-й и 3-й по 548 в каждом [5].

Ученые, занимающиеся проблемами радиоактивного загрязнения окружающей среды, особое внимание уделяют радионуклидам: ^{85}Kr , ^{129}I , ^{134}Cs , ^{137}Cs , ^{125}Sb (в табл. 1 выделены жирным шрифтом), в связи с их большим периодом полураспада.

Таблица 1

Детальный состав радионуклидного выброса АЭС «Фукусима-1» [5, 7]

Изотоп	Количество, Бк	Тип распада	Период полураспада	Изотоп	Количество, Бк	Тип распада	Период полураспада
^{85}Kr	$2 \cdot 10^{16}$	β^-	10,73 г	^{134}Cs	10^{16}	β^-, β^+	2,065 г
^{85m}Kr	10^{14}	β^-	4,48 ч	^{136}Cs	$6 \cdot 10^{15}$	β^-	13,16 д
^{87}Kr	$7 \cdot 10^{11}$	β^-	1,27 ч	^{137}Cs	10^{16}	β^-	30,2 г
^{88}Kr	$5 \cdot 10^{13}$	β^-	2,84 ч	^{138}Cs	$3 \cdot 10^9$	β^-	32,2 м
^{83m}Kr	10^{13}	ИП	1,86 ч	^{134m}Cs	10^{12}	ИП	2,91 ч

* Геннадий Александрович Колотков (kolotkov@iao.ru); Сергей Тимофеевич Пенин (penin@iao.ru).

Изотоп	Количество, Бк	Тип распада	Период полураспада	Изотоп	Количество, Бк	Тип распада	Период полураспада
^{133}Xe	$2 \cdot 10^{18}$	β^-	5,243 д	$^{133\text{m}}\text{Te}$	$4 \cdot 10^{10}$	β^-	55,4 м
$^{133\text{m}}\text{Xe}$	$2 \cdot 10^{16}$	ИП	2,19 д	^{134}Te	$6 \cdot 10^9$	β^-	42 м
^{135}Xe	$2 \cdot 10^{16}$	β^-	9,1 ч	^{127}Te	$5 \cdot 10^{15}$	β^-	9,4 ч
^{138}Xe	90	β^-	14,1 м	$^{129\text{m}}\text{Te}$	$7 \cdot 10^{15}$	ИП, β^-	33,6 д
$^{131\text{m}}\text{Xe}$	$2 \cdot 10^{16}$	ИП	11,9 д	$^{125\text{m}}\text{Te}$	10^{14}	ИП	58 д
$^{135\text{m}}\text{Xe}$	$6 \cdot 10^{14}$	ИП	15,3 м	$^{132\text{m}}\text{Te}$	$6 \cdot 10^{16}$		—
^{131}I	$9 \cdot 10^{16}$	β^-	8,021 д	$^{127\text{m}}\text{Te}$	10^{15}	ИП	109 д
^{132}I	$7 \cdot 10^{16}$	β^-	2,28 ч	^{131}Te	$5 \cdot 10^{14}$	β^-	25 м
^{133}I	$2 \cdot 10^{16}$	β^-	20,8 ч	$^{131\text{m}}\text{Te}$	$2 \cdot 10^{15}$	β^- , ИП	1,35 д
^{134}I	$4 \cdot 10^{11}$	β^-	52,6 м	^{133}Te	$7 \cdot 10^9$	β^-	12,4 м
^{135}I	$2 \cdot 10^{15}$	β^-	6,57 ч	^{130}Sb	10^{15}	β^-	38,4 м
^{129}I	$2 \cdot 10^9$	β^-	$1,7 \cdot 10^7$ г	^{125}Sb	$6 \cdot 10^{14}$	β^-	2,758 г
$^{132\text{m}}\text{I}$	$2 \cdot 10^{10}$	ИП	1,39 ч	^{127}Sb	$4 \cdot 10^{15}$	β^-	3,84 д
^{128}I	$4 \cdot 10^4$	β^-	25 м	^{128}Sb	10^{10}	β^-	9,1 ч
^{130}I	$5 \cdot 10^{13}$	β^-	12,36 ч	$^{128\text{m}}\text{Sb}$	10^{13}	β^-	10,1 м
^{83}Br	$2 \cdot 10^{12}$	β^-	2,4 ч	^{129}Sb	$4 \cdot 10^{13}$	β^-	17,7 м
^{84}Br	$7 \cdot 10^7$	β^-	31,8 м	^{131}Sb	$8 \cdot 10^5$	β^-	23 м
^{88}Rb	$5 \cdot 10^{13}$	β^-	17,7 м	^{89}Rb	$3 \cdot 10^2$	β^-	15,4 м

Примечания: Количество, Бк — сколько было выброшено радиоактивного вещества за период 12–22 марта; тип распада — наиболее вероятный тип распада для данного радионуклида (β^- — радиоактивный бета-распад с испусканием электрона; β^+ — радиоактивный бета-распад с испусканием позитрона, ИП — изомерный переход, или гамма-излучение); период полураспада — время, за которое распадается половина изотопов (г — год, д — день, ч — час, м — минута).

Большинство научных публикаций, вызванных аварией на АЭС «Фукусима-1», направлено на изучение: а) состава выброшенных радионуклидов; б) их распространения в локальном и глобальном масштабах; в) их оседания и замывания в почвах. Кроме того, исследуется радиологическое воздействие нуклидов на человека, в том числе и через продукты питания.

Цель настоящей статьи — рассчитать интенсивность ионообразования в районе аварийного выброса АЭС «Фукусима-1».

Основные источники ионизации тропосферы

Основными источниками ионизации тропосферы являются радиоактивность почвы, воздуха и космическое излучение. Ионизация почв обусловлена продуктами распада радона и торона, воздуха — содержанием радиоизотопа ^{85}Kr и радиоактивного углерода. Космическое излучение — потоки высокоэнергетических частиц, проникающих сквозь атмосферу Земли. Средняя интенсивность ионообразования основных источников фоновой ионизации атмосферы Земли и почвы представлена в табл. 2.

Таблица 2

Источник ионизации	Почва	Воздух	Космическое излучение
Интенсивность ионизации ν , $\text{см}^{-3} \cdot \text{с}^{-1}$	3–5	3–4	1–2 На высоте 20 км → 5

Интенсивность ионообразования

На рисунке представлены результаты самолетного мониторинга уровня радиации выпавшего радиоактивного вещества на поверхности земли: ^{134}Cs с периодом полураспада 2 года и ^{137}Cs — 30 лет. Измерения были проведены МЕХТ (Министерство образования, культуры, спорта, науки и технологий Японии) и DOE (Министерство энергетики США) внутри 80-км зоны АЭС «Фукусима-1» в период 6–29 апреля 2011 г. [6].

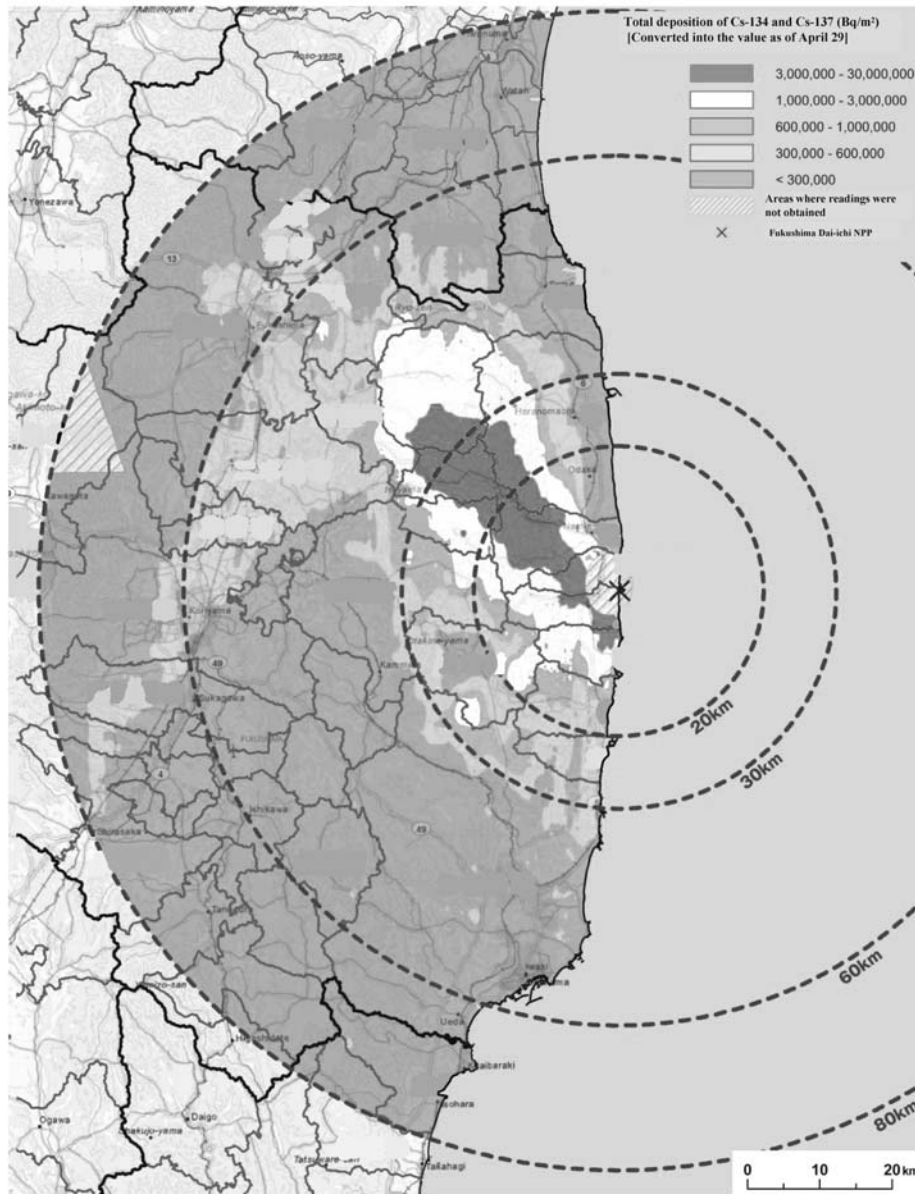
Для расчетов интенсивности ионообразования в зоне повышенной радиоактивности использовалась практическая формула, показавшая свою достоверность при расчетах для Чернобыльской АЭС: $\nu = 3,7 E_p \sigma / (l \varepsilon_i)$, где E_p — энергия распада изотопа, осредненная по его спектральному составу, эВ; l — характерная длина пробега электронов бета-распада, см; ε_i — эффективный потенциал ионизации воздуха, эВ; σ — плотность загрязнения, Бк/м $^{-2}$.

Данные для изотопов Cs: $E_p \sim 6 \cdot 10^5$ эВ, характерная длина пробега электронов бета-распада составляет ~ 100 см; $\varepsilon_i \sim 30$ эВ [2]. В табл. 3 показаны результаты расчета интенсивности ионообразования в 80-км зоне АЭС «Фукусима-1».

Таблица 3

σ , Бк/м $^{-2}$	ν , $\text{см}^{-3} \cdot \text{с}^{-1}$
$3 \cdot 10^6$ – $30 \cdot 10^6$	$6 \cdot 10^3$ – $6 \cdot 10^6$
10^6 – $3 \cdot 10^6$	$2 \cdot 10^3$ – $6 \cdot 10^5$
$6 \cdot 10^5$ – 10^6	$1,8 \cdot 10^4$ – $2 \cdot 10^5$
$3 \cdot 10^5$ – $6 \cdot 10^5$	$6 \cdot 10^3$ – $1,8 \cdot 10^4$
$3 \cdot 10^5$	$< 6 \cdot 10^3$

Results of airborne monitoring by MEXT and DOE
Total surface deposition of Cs-134 and Cs-137 inside 80 km zone of Fukushima Dai-ichi NPP



Общая площадь осадения ¹³⁴Cs и ¹³⁷Cs внутри 80-км зоны АЭС «Фукусима-1» [6]

Сравнение полученных результатов

Результаты, полученные для АЭС «Фукусима-1», сравнивались с результатами для ЧАЭС [2]. Для большей наглядности данные по последствиям двух аварий сведены в табл. 4.

Т а б л и ц а 4

Характеристика	ЧАЭС (¹³⁷ Cs)	«Фукусима-1» (¹³⁴ Cs и ¹³⁷ Cs)	Фон
Интенсивность ионообразования, см ⁻³ · с ⁻¹	~ 10 ³	~ 10 ⁶	~ 10
Время проведения измерений	Август 1986 г.	Апрель 2011 г.	—
Плотность загрязнения, Ки/км ²	5	30	< 0,3

Полученные результаты ионообразования в районе «Фукусима-1» значительно (на 3 порядка величины) превышают интенсивность ионообразования в районе ЧАЭС, несмотря на то что последняя расценивается как крупнейшая авария за всю историю мировой атомной энергетики. Различие в результатах расчетов можно объяснить следующими причинами:

- 1) в случае с ЧАЭС расчеты были проведены только для одного изотопа ¹³⁷Cs, в то время как для АЭС «Фукусимы-1» двух: ¹³⁴Cs и ¹³⁷Cs;
- 2) вымыванием радионуклидов осадками и степенью заглубления изотопов в почву на момент проведения измерений.

Необходимо отметить, что в рассматриваемом регионе Институтом оптики атмосферы СО РАН проводятся систематические комплексные исследования

пространственно-временной изменчивости микрофизического и химического состава аэрозоля [8, 9]. Ионный состав аэрозоля в зоне Японского моря до 80% определяется континентальными источниками, а поскольку ионы являются центрами конденсации для образования жидкокапельного аэрозоля, то над загрязненными участками будет повышенная концентрация аэрозоля, в том числе и радиоактивного, что может существенно увеличить концентрацию маркеров. Это позволит обнаруживать меньшие локальные участки с повышенным уровнем загрязнения дистанционными методами.

1. *Brumfiel G.* Fallout forensics hike radiation toll // *Nature* (Gr. Brit.). 2011. V. 478, N 7370. P. 435–436.
2. *Смирнов В.В.* Ионизация в тропосфере. СПб.: Гидрометеиздат, 1992. 312 с.
3. *Чистякова Л.К.* Дистанционные методы обнаружения радиоактивных аномалий в приземной атмосфере // *Оптика атмосф. и океана*. 2001. Т. 14, № 5. С. 465–472.
4. *Боярчук К.А., Свирко Ю.П.* Оценка концентрации элементарных ионов при радиоактивном загрязнении тропосферы // *Письма в ЖТФ*. 1996. Т. 22, вып. 14. С. 47–52.

5. URL: http://www.irsn.fr/EN/news/Documents/IRSN_fukushima-radioactivity-released-assessment-EN.pdf (дата обращения: 31.03.2011).
6. URL: http://radioactivity.mext.go.jp/en/1280/2011/05/1304797_0506.pdf (дата обращения: 30.11.2011).
7. URL: <http://www.phs.d211.org/science/smithcw/AP%20Chemistry/Posted%20Tables/Table%20of%20Isotope%20Decays.pdf> (дата обращения 19.02.2012).
8. *Сакерин С.М., Павлов А.Н., Букин О.А., Кабанов Д.М., Корниенко Г.И., Полькин В.В., Столярчук С.Ю., Турчинович Ю.С., Шмирко К.А., Майор А.Ю.* Результаты комплексного аэрозольного эксперимента в переходной зоне «материк–океан» (Приморье и Японское море). Часть 1. Вариации аэрозольной оптической толщи атмосферы и вертикальные профили // *Оптика атмосф. и океана*. 2010. Т. 23, № 8. С. 691–699.
9. *Козлов В.С., Полькин В.В., Панченко М.В., Голобокова Л.П., Турчинович Ю.С., Ходжер Т.В.* Результаты комплексного аэрозольного эксперимента в переходной зоне «материк–океан» (Приморье и Японское море). Часть 3. Микрофизические характеристики и ионный состав аэрозоля в приземном и приподнятом слоях // *Оптика атмосф. и океана*. 2010. Т. 23, № 11. С. 967–977.

G.A. Kolotkov, S.T. Penin. **Intensity of ion formation in the area of Fukushima Daiichi nuclear power plant.**

Detailed analysis of emergency emission of radioactive material from Fukushima Daiichi nuclear power plant has shown that long-lived radionuclides considerably contribute to the intensity of ion formation. The evaluation technique, used after Chernobyl disaster, allows to make the analysis of intensity of ion formation in the area of Fukushima Daiichi nuclear power plant.