

Техногенные радионуклиды в приземном слое атмосферы вследствие аварии на АЭС «Фукусима»

В.Г. Булгаков, С.М. Вакуловский, В.М. Ким, О.Н. Полянская, А.Д. Уваров, В.Н. Яхрюшин

ФГБУ Научно-производственное объединение «Тайфун», Обнинск

В статье приведена информация об основных результатах наблюдений радиометрических подразделений Федеральной службы по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды за изменением радиационной обстановки на территории России вследствие аварии на АЭС «Фукусима». Полученные экспериментальные данные позволили сделать заключение о том, что объемные активности радионуклидов в приземном слое атмосферы были на 3–6 порядков ниже допустимой объемной активности, установленной Нормами радиационной безопасности (НРБ-99/2009), а добавка к плотности загрязнения почвы цезием-137 – на 2–3 порядка меньше убыви плотности загрязнения этим изотопом глобального происхождения за счет радиоактивного распада.

Ключевые слова: радиационная авария, АЭС «Фукусима», радионуклиды, объемная активность радионуклидов.

По данным МАГАТЭ, первый выброс радионуклидов в атмосферу на поврежденном реакторе АЭС «Фукусима» произошел 12 марта на энергоблоке № 1 в результате взрыва водорода, 14 марта подобный взрыв произошел на энергоблоке № 3 и 15 марта – взрыв неуставленной природы на энергоблоке № 2. В таблице 1 приведены данные о выбросе радионуклидов в атмосферу с АЭС «Фукусима» [1] и для сравнения с 4-го блока Чернобыльской АЭС [2].

Таблица 1

Выбросы в атмосферу на АЭС «Фукусима» и Чернобыльской АЭС

АЭС	Выброс, Бк	
	¹³¹ I	¹³⁷ Cs
Фукусима	$1,5 \cdot 10^{17}$	$(6-15) \cdot 10^{15}$
Чернобыльская	$2,7 \cdot 10^{17}$	$8,9 \cdot 10^{16}$

Как видно из таблицы 1, выброс на АЭС «Фукусима» ¹³¹I в пределах ошибок оценки выброса был в 2 раза меньше, чем из Чернобыльской АЭС, а по ¹³⁷Cs – меньше на порядок.

Изменение объемной активности радионуклидов в воздухе в районе АЭС «Фукусима», по данным ТЕРСО, с 19.03 по 30.03. 2011 г. приведено в таблице 2. Отношение объемных активностей ¹³¹I/¹³⁷Cs в воздухе в районе станции «Фукусима» изменялось в широких пределах от 2 до 248. Отношение объемных активностей суммы изотопов йода к сумме изотопов цезия в воздухе в районе станции «Фукусима» изменялось от 1,1 до 178.

Радионуклиды вместе с воздушными массами в северо-восточном направлении пересекли Тихий оке-

ан и 17 марта были зарегистрированы в Северной Америке, 19–20 марта – в Исландии, 19–21 марта – в скандинавских странах и 23–24 марта наблюдались в большинстве европейских государств. ¹³¹I наблюдался в аэрозольной ¹³¹I_а и молекулярной формах ¹³¹I_м, а ¹³⁷Cs – в аэрозольной форме.

Таблица 2

Объемная активность радионуклидов в воздухе в районе АЭС «Фукусима» с 19.03 по 30.03.2011 г.

Радионуклид	Объемная активность, Бк/м ³	
	Молекулярная форма	Аэрозольная форма
¹³¹ I	31–5,9 · 10 ³	64–880
¹³² I	28–2,2 · 10 ³	32–230
¹³⁷ Cs	8,1–75	3–820
¹³⁴ Cs	8,9–82	9,9–870
¹³⁶ Cs	4,5–6,5	–

По данным европейской сети радиометрических наблюдений, среднее отношение ¹³¹I_а/¹³⁷Cs с 22.03 по 11.04.2011 г. уменьшилось от 20 до 4 [3].

Наблюдения за радиационной обстановкой на территории России осуществляются сетью радиационного мониторинга (СРМ) Росгидромета. Виды наблюдений и количество пунктов наблюдения, действующих на СРМ, представлены в таблице 3.

Схема расположения пунктов радиационного контроля представлена на рисунке 1.

Таблица 3

Виды наблюдений и количество пунктов наблюдения на СРМ

МЭД	Радиоактивные атмосферные выпадения	Объемная активность радионуклидов	Тритий		Стронций-90	
			осадки	реки	реки	морья
1312	410	52	33	15	44	10

МЭД – мощность экспозиционной дозы.



Рис. 1. Схема расположения радиационно опасных объектов и пунктов радиационного контроля Росгидромета:

- – отбор радиоактивных аэрозолей с помощью воздухофильтрующих установок;
- – отбор радиоактивных выпадений с помощью планшета; Δ – АЭС; □ – радиационно опасные объекты

На СРМ Росгидромета работают 41 радиометрическая группа и лаборатория. Из них 14 выполняют гамма-спектрометрический анализ проб аэрозолей и выпадений, 5 – радиохимический анализ и 1 лаборатория выполняет анализ на изотопы плутония и тритий.

После получения информации об аварии на АЭС «Фукусима» сеть радиационного мониторинга Дальнего Востока и некоторые пункты наблюдения на всей территории РФ были переведены в режим повышенной готовности с изменением регламента наблюдений и ежесуточным измерением загрязнения воздуха техногенными радионуклидами: все пункты наблюдения за мощностью дозы в Дальневосточном регионе были переведены на ежечасные наблюдения; в большинстве УГМС было прекращено озонирование проб аэрозолей (радиоактивный йод улетучивается при озонировании проб) и суточные пробы отправлялись в лабораторию на гамма-спектрометрический анализ для определения содержания йода-131 и других гамма-излучающих радионуклидов. Дополнительно на о. Сахалин в г. Южно-Сахалинск, находящемся ближе всех к аварийной АЭС, из НПО «Тайфун» была направлена машина радиационной разведки, оснащенная современным дозиметрическим и гамма-спектрометрическим оборудованием и высококвалифицированные специалисты, имевшие опыт работы во время аварии на Чернобыльской АЭС. Вся информация из радиометрических подразделений Росгидромета ежесуточно поступала в НПО «Тайфун», анализировалась, обобщалась и передавалась в оперативный штаб Росгидромета.

Лаборатория радиационной разведки в г. Южно-Сахалинске приступила к измерениям проб 22 марта. Первые измерения суммарной бета-активности озоненных суточных проб выпадений за предшествующую неделю, поступивших морем из Южно-Курильска, показали, что воздушные массы, содержащие радионуклиды от АЭС «Фукусима», достигли Южно-Курильска, расположенного на острове Кунашир Курильской гряды, 14–15 марта. 20–21 марта аварийные радионуклиды были обнаружены в Южно-Сахалинске по результатам измерений выпадений и аэрозолей. Во Владивостоке неозоленные пробы стали анализироваться с 26 марта и сразу в пробах был получен $^{131}\text{I}_a$ и изотопы $^{134,137}\text{Cs}$. Из анализа присылаемых по почте неозоленных проб из Благовещенска и Хабаровска было получено, что в Благовещенске и Хабаровске радионуклиды от АЭС «Фукусима» в приземной атмосфере появились 24–25.03.2011.

Всего по результатам наблюдений СРМ в период 12.03–30.04.2011 поступление воздушных масс, содержащих радиоактивные продукты аварии на АЭС «Фукусима», было зарегистрировано в приземной атмосфере в 30 пунктах наблюдения за радиоактивными аэрозолями и 25 пунктах наблюдения за радиоактивными выпадениями.

На европейской территории России (ЕТР) $^{131}\text{I}_a$ впервые был зарегистрирован 23 марта в Подмосковной, Курске и Обнинске, 26 марта – на юге и севере Сибири в Омске и Салехарде. С 27 марта $^{131}\text{I}_a$ с невысокой объемной актив-

ностью от 1×10^{-5} Бк/м³ до 30×10^{-5} Бк/м³ наблюдался уже на всей территории страны.

28–30 марта (рис. 2) произошло резкое увеличение, практически на два порядка, объемной активности ¹³¹I_a в воздухе на территории ЕТР – до $3,0 \times 10^{-3}$ Бк/м³. В странах Центральной Европы резкое увеличение содержания ¹³¹I_a в воздухе наблюдалось на сутки раньше – 27–29 марта и достигало $6,0 \times 10^{-3}$ Бк/м³ (Краков, Польша). Одновременно с повышением содержания ¹³¹I_a в воздухе появились ¹³⁴Cs, ¹³⁶Cs, ¹³⁷Cs, ¹³²I, ¹³²Te (рис. 3). Максимальное количество всех радионуклидов наблюдалось в центре ЕТР 3–4 апреля: по ¹³¹I_a – до $4,0 \times 10^{-3}$ Бк/м³,

по ¹³⁴Cs – до $1,04 \times 10^{-3}$ Бк/м³, по ¹³⁷Cs – до $1,15 \times 10^{-3}$ Бк/м³. На севере ЕТР содержание радионуклидов было в 5–10 раз меньше. С 4–5 апреля началось уменьшение содержания радионуклидов в воздухе и к концу апреля объемная активность радионуклидов на ЕТР стала ниже предела обнаружения 1×10^{-6} Бк/м³.

На юге азиатской территории России (АТР) резкое увеличение содержания ¹³¹I_a в воздухе наблюдалось с 31 марта (рис. 4), но максимальные значения за счет разбавления при дальнем переносе, естественного распада (период полураспада составляет 8,2 суток), вымывания и других процессов были в 2 раза ниже, чем в центре ЕТР.

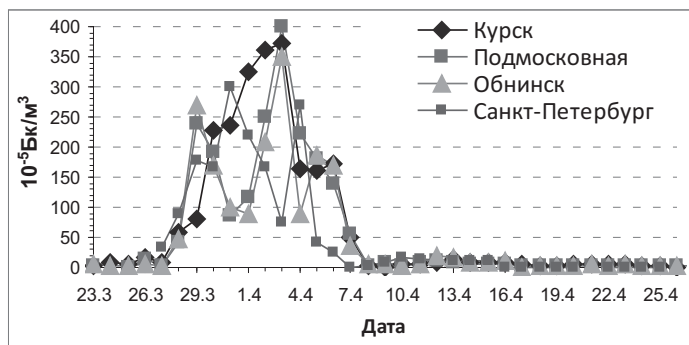


Рис. 2. Изменение объемной активности ¹³¹I_a в центре ЕТР

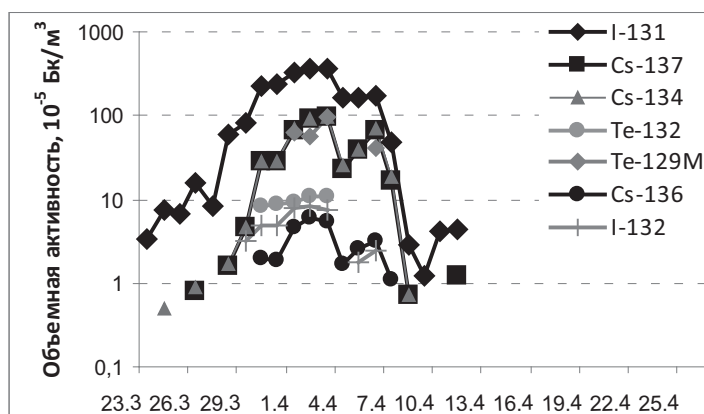


Рис. 3. Объемная активность радионуклидов, зарегистрированных в г. Курске

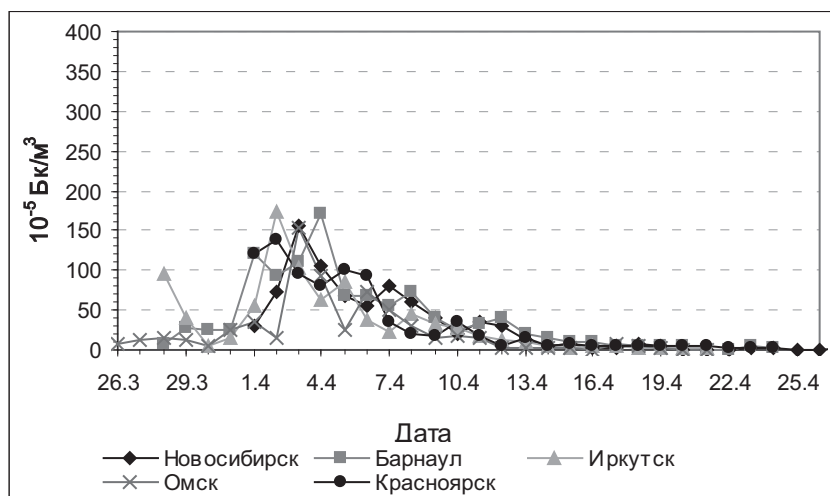


Рис. 4. Изменение объемной активности ¹³¹I_a на юге АТР

На севере АТР (Ханты-Мансийск, Салехард) максимум наблюдался 5–6 апреля, а содержание $^{131}\text{I}_a$ в приземном слое атмосферы было в 3–8 раз ниже.

На Дальнем Востоке резкое увеличение содержания $^{131}\text{I}_a$ в воздухе за счет переноса с запада началось 1–2 апреля (рис. 5). Максимальная объемная активность $^{131}\text{I}_a$ была в 2–4 раза ниже, чем в центре ЕТР. Наименьшие значения наблюдались на о. Сахалин. Присутствие $^{131}\text{I}_a$ и других радионуклидов в приземном слое атмосферы Дальнего Востока до 1 апреля, по-видимому, вызвано региональным переносом радионуклидов от АЭС «Фукусима-1».

Все приведенные выше данные относятся к йоду-131 в аэрозольной форме. Вклад молекулярной формы в сумму изотопов йода изменялся со временем и колебался в Обнинске в период с 23.03 по 21.04.2011 в пределах от 16% до 100% при среднем значении 50%.

Кроме изотопов йода, в приземном слое атмосферы на территории России постоянно наблюдались ^{134}Cs и ^{137}Cs . Содержание изотопов цезия коррелировало с суммарной бета-активностью радионуклидов в воздухе с коэффициентом корреляции, близким к единице. Это хорошо видно на рисунке 6, по данным, полученным в

г. Обнинске. Отношение содержания ^{137}Cs к содержанию ^{134}Cs по всем полученным на сети данным близко к 1. Однако отношение объемных активностей $^{131}\text{I}_a/^{137}\text{Cs}$ в воздухе изменялось в широких пределах. С 23 марта по 4–5 апреля отношение колебалось в пределах 11–34, с 4–5 по 20 апреля отношение снизилось и изменялось в пределах 1,5–7,7, далее оно стало менее 1.

С 31 марта по 7 апреля было зарегистрировано 46 случаев 5-кратного превышения суммарной бета-активности приземного слоя воздуха по сравнению со среднесуточным значением за предыдущий месяц [4]. Эти случаи дали дополнительную информацию по содержанию изотопов цезия в воздухе пунктов, удаленных от гамма-спектрометрических лабораторий, например по пунктам юга ЕТР (Астрахань, Волгоград, Ростов-на-Дону, Цимлянск), для которых данные прямых измерений изотопов цезия в реальное время отсутствовали, а также подтвердили правильность выбора ведомственного критерия ВЗ (высокое загрязнение), позволяющего определять по суммарной бета-активности присутствие в воздухе техногенных радионуклидов с объемной активностью 1×10^{-4} Бк/м³. Это на 5 порядков ниже допустимой объемной активности для ^{137}Cs в соответствии с НРБ-99/2009.

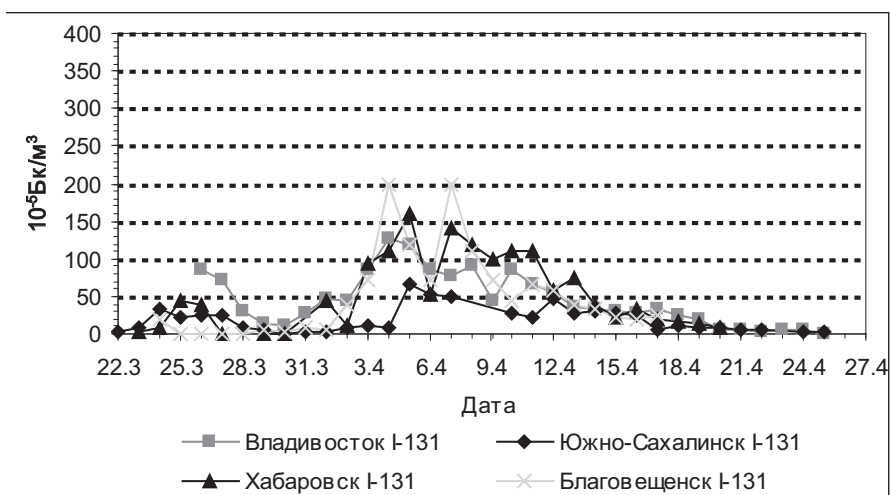


Рис. 5. Изменение объемной активности I-131 на Дальнем Востоке

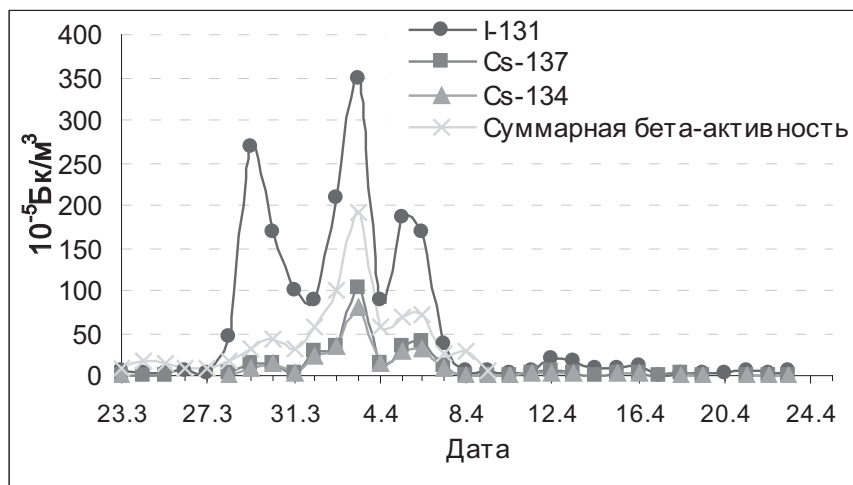


Рис. 6. Объемная активность радионуклидов в г. Обнинске

На рисунке 7 приведены результаты среднесуточной объемной активности изотопов цезия в воздухе всех пунктов наблюдения на территории Дальнего Востока во 2-м квартале 2011 г. Наибольшая среднесуточная объемная активность ^{137}Cs наблюдалась в Алдане и Якутске, наименьшая – в Южно-Сахалинске, Магадане и Чите. Объемная активность ^{137}Cs в этих пунктах в 100 и более раз выше, чем в 2010 г. Во втором квартале 2010 г. объемные активности ^{137}Cs в Алдане, Мирном, Магадане и Южно-Сахалинске были ниже предела обнаружения, в остальных пунктах – не превышали 7×10^{-7} Бк/м³.

На территории ЕТР содержание ^{131}I и изотопов цезия в суточных выпадениях было в основном ниже предела обнаружения. На территории АТР получены отдельные данные по суточным выпадениям радионуклидов в Южно-Курильске, Южно-Сахалинске и по югу АТР. Поэтому величина вклада изотопов цезия в загрязнение подстилающей поверхности на территории России была определена по результатам гамма-спектрометрического анализа объединенных за 2-й квартал проб для всех территорий

УГМС. На рисунке 8 представлены квартальные выпадения ^{134}Cs , отсутствующего в составе глобального техногенного фона, и ^{137}Cs на территории Дальнего Востока. Для сравнения, на территории Приморского УГМС выпадения цезия-137 во 2-м квартале 2010 г. составляли 0,01 Бк/м², на территории Забайкальского УГМС – 0,05 Бк/м², на остальных представленных территориях – были ниже предела обнаружения. В Сахалинскую сеть входит Южно-Курильск, где во время аварии наблюдались наибольшие выпадения радионуклидов.

Представляется интересным сделать оценку интенсивности суммарных выпадений ^{137}Cs за март и апрель 2011 г. и оценить по соотношению $^{134}\text{Cs} / ^{137}\text{Cs}$ вклад «фукусимского» ^{137}Cs . В таблице 4 представлены обобщенные результаты этой оценки, проведенные по данным 51 пункта наблюдений, расположенных в европейской части России. Как видно из таблицы, добавка «фукусимского» ^{137}Cs сопоставима с уровнем годовых выпадений в центре ЕТР, но на 2 порядка меньше убыли глобального запаса этого изотопа в почве за счет радиоактивного распада.

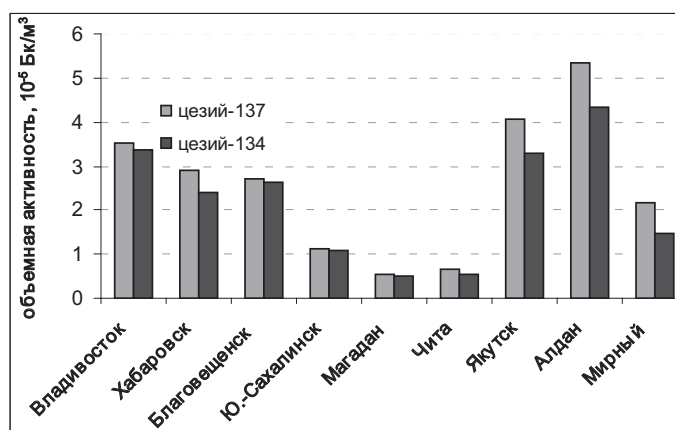


Рис. 7. Среднесуточная объемная активность изотопов цезия в воздухе на территории Дальнего Востока во 2-м квартале 2011 г.

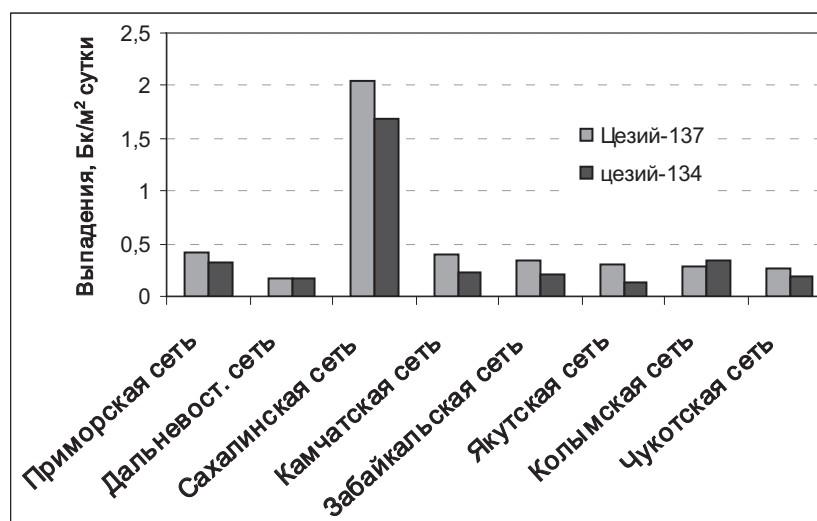


Рис. 8. Выпадения изотопов цезия во 2-м квартале 2011 г. на Дальнем Востоке

Таблица 4
 ^{137}Cs в почве и атмосферных выпадениях, Бк/м²

Глобальный уровень запаса ^{137}Cs в почве в 2011 г. в центре ЕТР	1660
Убыль запаса ^{137}Cs в почве за 1 год за счет радиоактивного распада	38
Добавка к запасу за счет «фукусимского» ^{137}Cs	0,024–0,54
Сумма годовых выпадений ^{137}Cs в 2007–2010 гг.	0,3–0,4

Экспериментальные данные по объемной активности радионуклидов $Q(\text{Бк}/\text{м}^3)$ и плотности выпадений из атмосферы на подстилающую поверхность $P(\text{Бк}/\text{м}^2)$, полученные по одному пункту наблюдения, позволяют рассчитать скорость осаждения радионуклидов на подстилающую поверхность $V_g = P/Q$. По результатам измерений этих параметров для 5 пунктов в период с 30.03 по 08.04 2011 г. значение V_g колебалось от 0,5 см/с до 3,2 см/с при среднем значении 2 см/с. Для сравнения можно указать, что после аварии на ЧАЭС средние скорости осаждения для различных радионуклидов в период с 30 апреля по 10 мая 1986 г. колебались в пределах 0,4–4,7 см/с [5]. Используя это значение V_g , можно оценить объемную активность радионуклидов в приземном слое атмосферы в тех населенных пунктах, где проводились наблюдения только за интенсивностью выпадений из атмосферы. В качестве примера представляется полезным оценить величину объемной активности с точностью до порядка в Южно-Курильске, расположенном ближе всего к месту расположения АЭС «Фукусима». Максимальные уровни выпадений в этом пункте наблюдались 24 марта и составляли 13 Бк/м² в сутки по $^{131}\text{I}_a$. Объемная активность аэрозольной фракции $^{131}\text{I}_a$, рассчитанная указанным способом, могла составлять 7,5⁻³ Бк/м³.

Для оценки вклада изотопов стронция в загрязнение воздуха были выбраны пробы, отобранные в пункте, в котором наблюдались максимальные концентрации радионуклидов (п. Подмосковная, пробы аэрозолей за 29–30 марта, 2–3 и 3–4 апреля 2011 г.). Измеренная объемная активность ^{89}Sr , отсутствующего в составе глобального фона, составляла в эти дни 1,0, 3,8 и 4,6 · 10⁻⁷ Бк/м³ соответственно, что на 7 порядков ниже допустимой средне-

годовой активности для этого радионуклида (19 Бк/м³) в соответствии с НРБ-99/2009. Средняя объемная активность ^{90}Sr в эти дни составляла 0,33 · 10⁻⁷ Бк/м³, что не превышает средней объемной активности в этом пункте за 2-й квартал 2010 г. (0,76 · 10⁻⁷ Бк/м³).

Измерения мощности экспозиционной дозы гамма-излучения, проведенные в марте и апреле 2011 г. на всей СРМ, не выявили ни одного случая превышения пределов обычных фоновых колебаний этого параметра радиационной обстановки.

Результаты наблюдений за изменением радиационной обстановки после аварии на АЭС «Фукусима» радиометрическими подразделениями России позволили получить надежные экспериментальные данные по пространственно-временному распределению радионуклидов, соотношению радионуклидов в воздушных массах по мере их продвижения по территории России и сделать заключение о том, что содержание радионуклидов на всей территории России было на 3–6 порядков ниже значений допустимой среднегодовой объемной активности для населения, установленной нормами радиационной безопасности НРБ-99/2009.

Литература

1. Официальный сайт Агентства ядерной и промышленной безопасности- NISA [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.nisa.meti.go.jp/english/files/en20110412-4.pdf> (Nuclear and Industrial Safety Agency, Japan) (accessed May 3rd 2011) and http://www.kantei.go.jp/foreign/kan/topics/201106/iaea_houkokusho_e.html (Prime Minister of Japan and his Cabinet web site; accessed June 7th 2011)
2. Сивинцев, Ю. В. Оценка радиоактивного выброса при аварии 1986 г. на 4-м энергоблоке Чернобыльской АЭС / Ю. В. Сивинцев, А. А. Хрулев // Атомная энергия. – Т. 78, вып. 6. – С. 403–417.
3. Masson, O. Tracking of radionuclides from the damaged Fukushima Dai-Ichi nuclear reactors by European networks / O. Masson [et.al.] // Environmental Sciences und Technology. – 2011, – № 45 (18). – P. 7670–7677.
4. Приложение № 2 к Приказу Росгидромета от 31.10.2000 № 156 «О введении в действие порядка подготовки и представления информации общего назначения о загрязнении окружающей природной среды».
5. Израэль, Ю. А. Чернобыль: радиоактивное загрязнение природных сред / Ю. А. Израэль [и др.]. – Л.: Гидрометеоздат, 1990. – С. 296.

V.G. Bulgakov, S.M. Vakulovsky, V.M. Kim, O.N. Polyanskaya, A.D. Uvarov, V.N. Yahryushin
Man-made Radionuclides in the Near-the-ground Atmospheric Layer due to the Fukushima Accident

Federal State Budget Institution Scientific and Production Association «Typhoon», Obninsk

Abstract. The article presents information about the main observation results of radiometric departments of the Federal Service for Hydrometeorology and Environmental Monitoring for changes in the radiation situation on the territory of Russia following the accident at the Fukushima NPP. The obtained experimental data allowed to conclude that the volumetric activities of radionuclides in the near-the-ground atmospheric layer were by 3 to 6 orders of magnitude below the permissible volumetric activity set by Radiation Safety Standards (NRB-99/2009), and the correction to the density of soil contamination by cesium-137 was by 2 to 3 orders of magnitude less than the decrease of the density of contamination with this isotope of the global origin due to radioactive decay.

Key words: radiation accident, Fukushima NPP, radionuclides, volumetric activity of radionuclides.

С.М. Вакуловский
E-mail: vakulovsky@typhoon.obninsk.ru

Поступила: 08.11.2011 г.