

DOI: 10.21514/1998-426X-2019-12-1-36-51

УДК: 614.876(571.64):621.039.586(521.16)

Estimation of the air kerma rate from ^{137}Cs and ^{134}Cs deposited on the ground in the Sakhalin region of Russia after the Fukushima accident

Valery P. Ramzaev, Anatoly N. Barkovsky

Saint-Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene after Professor P.V. Ramzaev, Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Well-Being, Saint-Petersburg, Russia

Previous studies conducted by the Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Well-Being (Rosпотребнадзор) in Sakhalin Region, Russia in 2011–2012 have shown that soils on the southern Kuril Islands were contaminated with ^{137}Cs and ^{134}Cs due to the accident at the Fukushima-1 NPP. In this study, we evaluated the air kerma rate from ^{137}Cs and ^{134}Cs using earlier published data on the vertical distribution of Fukushima-derived radiocaesium in the soil at grasslands on the islands of Kunashir, Shikotan and Iturup. The air kerma rate due to gamma-rays from pre-Fukushima ^{137}Cs was estimated as well. In the period from May 2011 to September 2012, the air kerma rate due to the fresh fallout of radioactive caesium varied from 0.31 to 0.84 nGy h⁻¹. On average, the contribution of the radiation from Fukushima-derived ^{134}Cs and ^{137}Cs to the total air kerma rate from radioactive caesium was 35% in the fall of 2011 and 25% in the fall of 2012. The mean normalized kerma rate from Fukushima-derived ^{137}Cs was estimated at a level of 1.63 nGy h⁻¹ per kBq m⁻² in mid-May 2011, 1.53 nGy h⁻¹ per kBq m⁻² in autumn 2011 and 1.45 nGy h⁻¹ per kBq m⁻² in autumn 2012. The mean normalized air kerma rate from pre-Fukushima ^{137}Cs at reference undisturbed grasslands was estimated as 0.77 nGy h⁻¹ per kBq m⁻². The results of our calculations of the air kerma rate from Fukushima-derived ^{137}Cs were in good agreement with the forecast of the 2013 UNSCEAR model, which was used to estimate the external doses of the Japanese population after the Fukushima accident. For pre-Fukushima ^{137}Cs , the UNSCEAR model underestimated the calculated normalized air kerma rates in Sakhalin Region by approximately 40%. Our calculations showed that, overall, the aboveground biomass of herbaceous plants had practically no effect on the air kerma rate from radioactive caesium contained in the soil. The fallout of ^{134}Cs and ^{137}Cs after the accident at the Fukushima-1 NPP did not lead to any significant increase in the gamma dose rate in the air at grasslands on Kuril Islands. In 2019–2020, the contribution of radiocaesium to the total gamma dose rate in air will not exceed 5%.

Key words: the Fukushima accident, global fallout, ^{134}Cs , ^{137}Cs , soil, grasslands, air kerma rate, Kuril Islands.

Оценка мощности воздушной кермы гамма-излучения ^{137}Cs и ^{134}Cs , выпавших на почву в Сахалинской области России после Фукусимской аварии

В.П. Рамзаев, А.Н. Барковский

Санкт-Петербургский научно-исследовательский институт радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева, Федеральная служба по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, Санкт-Петербург, Россия

Предыдущие исследования, проведенные Федеральной службой по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека (Роспотребнадзор) в Сахалинской области (Россия) в 2011–2012 гг., показали, что почва на южных Курильских островах была загрязнена ^{137}Cs и ^{134}Cs вследствие аварии на АЭС «Фукусима-1». Мы вычислили мощность кермы в воздухе, используя ранее опубликованные данные о вертикальном распределении фукусимского радиоактивного цезия в почве на лугах островов Кунашир, Шикотан и Итуруп. Тем же методом была оценена мощность воздушной кермы от гамма-излучения ^{137}Cs , содержащимся в почве до фукусимских выпадений. В период с

Valery P. Ramzaev

Saint-Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene after Professor P.V. Ramzaev

Address for correspondence: Mira str., 8, Saint-Petersburg, 197101; E-mail: V.Ramzaev@mail.ru**Рамзаев Валерий Павлович**

Санкт-Петербургский научно-исследовательский институт радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева

Адрес для переписки: 197101, Россия, Санкт-Петербург, ул. Мира, д. 8; E-mail: V.Ramzaev@mail.ru

мая 2011 г. по сентябрь 2012 г. мощность кермы от новых выпадений радиоактивного цезия варьировала от 0,31 до 0,84 нГр/ч. В среднем вклад излучения фукусимских ^{134}Cs и ^{137}Cs в общую мощность воздушной кермы от радиоактивного цезия составил 35% осенью 2011 г. и 25% осенью 2012 г. Средняя нормализованная мощность кермы от излучения фукусимского ^{137}Cs составляла 1,63 (нГр/ч)/(кБк/м²) в середине мая 2011 г., 1,53 (нГр/ч)/(кБк/м²) осенью 2011 г. и 1,45 (нГр/ч)/(кБк/м²) осенью 2012 г. Средняя нормализованная мощность кермы излучения дофукусимского ^{137}Cs на целинных лугах составила 0,77 (нГр/ч)/(кБк/м²). Результаты наших расчетов для мощности кермы от фукусимского ^{137}Cs хорошо соответствовали прогнозу модели НКДАР ООН 2013 г., которая использовалась для оценки доз внешнего облучения населения Японии после Фукусимской аварии. Для дофукусимского ^{137}Cs модель НКДАР ООН недооценивала расчетную нормализованную мощность кермы в Сахалинской области примерно на 40%. Наши расчеты показали, что надземная биомасса травянистых растений практически не влияла на мощность воздушной кермы гамма-излучения радиоактивного цезия, содержащегося в почве. Выпадения ^{134}Cs и ^{137}Cs после аварии на АЭС «Фукусима-1» не привели к сколь-либо значимому увеличению мощности дозы гамма-излучения в воздухе над почвой Курильских островов. В 2019–2020 гг. вклад радиоактивного цезия в суммарную мощность дозы гамма-излучения в воздухе не будет превышать 5%.

Ключевые слова: Фукусимская авария, глобальные выпадения, почва, луг, ^{134}Cs , ^{137}Cs , мощность кермы в воздухе, Курильские острова.

Introduction

Estimation of gamma-ray dose rate in air at an open undisturbed field (grassland, meadow) is an essential component of a radiological survey after a nuclear accident resulting in a large-scale environmental contamination by gamma-ray emitting radionuclide(s) [1]. The value of gamma dose rate in air at such undisturbed (virgin) lands is often used as a reference parameter in dosimetric models for assessment of the external exposure of the public [2–5].

Since the beginning of the nuclear era (1945), caesium-137 has continued to be a subject of scientific interest and public concern due to its long period of decay ($T_{1/2} = 30.2$ y) and a relatively high energy of gamma quanta ($E = 661.6$ keV) emitted by its short-lived ($T_{1/2} = 2.55$ min) daughter product $^{137\text{m}}\text{Ba}$ [6, 7]. During the major nuclear reactor accidents at the Chernobyl and Fukushima-1 NPPs, the release of ^{137}Cs was accompanied by the release of ^{134}Cs ($T_{1/2} = 2.06$ y; the range of the gamma-ray energy, E , = 242–1365 keV), which contributed significantly to the gamma dose in air and the external gamma radiation dose of the population living in contaminated areas [8, 9].

Studies conducted in different countries after the Chernobyl accident have demonstrated significant spatial and temporal variability in the vertical distribution of ^{137}Cs and ^{134}Cs within the soil profile and in the resultant gamma dose rate in air in virgin lands [2, 10–15]. The influencing factors could be the atmospheric conditions (wet or dry fallout), physicochemical forms of fallout, soil properties, activity of soil fauna, and the use of land by man. However, based on numerous empirical data collected after the Chernobyl accident [8], it was possible to develop a general model describing time-dependent evolution of the air kerma rate for undisturbed open lands located at different distances from the Chernobyl NPP [2, 3, 16, 17]. An infinite plane source located below a soil slab of the mass thickness of 0.5 g cm^{-2} [3, 11, 16] was selected as the initial distribution of the radionuclides in the ground in the case of wet fallout. For this source, the calculated normalized kerma rate in air is 1.72 and 4.68 nGy h⁻¹ per kBq m⁻² for $^{137}\text{Cs} + ^{137\text{m}}\text{Ba}$ and ^{134}Cs , respectively (see Table 1 in [18]). The subsequent time-dependent decrease in the dose rate in air due to the vertical migration of the radionuclides in the soil column (excluding radioactive decay) can be presented by the attenuation function for air kerma rate, $r(t)$, [3, 16]:

Введение

Оценка мощности дозы гамма-излучения в воздухе на открытых целинных участках территории (луг, пастбище) является важным компонентом радиологического обследования после радиационной аварии, сопровождающейся крупномасштабным загрязнением окружающей среды гамма-излучающими радионуклидами [1]. Значение мощности дозы гамма-излучения в воздухе на таких целинных участках часто используется в качестве референтного параметра в дозиметрических моделях для оценки доз внешнего облучения населения [2–5].

С начала ядерной эры (1945 г.) цезий-137 продолжает оставаться предметом научного интереса и беспокойства в обществе из-за его длительного периода распада ($T_{1/2} = 30,2$ года) и из-за относительно высокой энергии гамма-квантов ($E = 661,6$ кэВ), испускаемых его короткоживущим ($T_{1/2} = 2,55$ мин) дочерним продуктом $^{137\text{m}}\text{Ba}$ [6, 7]. При ядерных авариях на Чернобыльской и Фукусимской АЭС выброс ^{137}Cs сопровождался выбросом ^{134}Cs ($T_{1/2} = 2,06$ года; диапазон энергий гамма-излучения $E = 242–1365$ кэВ), который также существенно влиял на мощность дозы гамма-излучения в воздухе и дозу внешнего облучения населения, проживающего на загрязненных территориях [8, 9].

Исследования, проведенные в разных странах после Чернобыльской аварии, продемонстрировали значительную пространственную и временную вариабельность вертикального распределения радиоактивного цезия в профиле почвы и результирующей мощности дозы гамма-излучения в воздухе на целинных участках [2, 10–15]. Влияющими факторами могут быть атмосферные условия во время выпадений (влажные или сухие выпадения), физико-химическая форма выпадений, свойства почвы, активность почвенной фауны и использование земли человеком. Тем не менее, на основе многочисленных эмпирических данных, собранных после Чернобыльской аварии, удалось разработать общую модель, описывающую динамику мощности кермы в воздухе для открытых целинных территорий, расположенных на разных расстояниях от Чернобыльской АЭС [2, 3, 16, 17]. В качестве начального распределения радионуклидов в почве при влажных выпадениях был выбран бесконечный плоский изотропный источник, экранированный слоем почвы толщиной

$$r(t) = p_1 \times \exp\left(-\frac{0.693}{T_1} \times t\right) + p_2 \times \exp\left(-\frac{0.693}{T_2} \times t\right), \quad (1)$$

where p_1 , p_2 , T_1 and T_2 are empirically-derived constants and t is the time (years) elapsed after the deposition.

For the aerosol form of caesium in fallout in Japan after the accident at the Fukushima-1 NPP, the following parameter values were proposed for Eq. (1): $p_1 = 0.5$, $p_2 = 0.5$, $T_1 = 1.5$ years, and $T_2 = 50$ years [8, 18].

The model of the reduction of the gamma dose rate in air due to radiocaesium vertical migration in undisturbed soils has remained unchanged in the UNSCEAR 2016 report [5].

The main objective of this study was to test the applicability of the UNSCEAR model [8, 18] to describe the dynamics of gamma-radiation dose rate in air from the radioactive caesium deposition in virgin soils outside Japan, in the southern part of Sakhalin Region (Russia), after the Fukushima accident. For this purpose, we calculated kerma rates in air using experimental data obtained by Ramzaev et al. [19–21] on the vertical distribution of radiocaesium in grassland soils on the islands of Kunashir, Shikotan and Iturup in 2011 and 2012. The same method was used to estimate the air kerma rate from the ^{137}Cs deposited in these soils before the Fukushima accident. Finally, we estimated the influence of grassy vegetation cover on the kerma rate in air.

Materials and methods

Study area

The surveyed grasslands are located in the southern part of Kunashir Island, on the western and eastern sides of Shikotan Island, and on the eastern side of Iturup Island (see Fig. 1 in [20]) at a distance of 800–1050 km to the north-east from the Fukushima-1 NPP. Geographical coordinates and a brief characteristic of the sites surveyed by three expeditions of the Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Well-Being (Rosпотребнадзор) on the Kuril Islands in 2011–2012 were provided in [19, 20].

This region has a moderate monsoon climate. In the 2011–2012 period, the average annual temperature for individual islands varied from 5.3 °C to 6.0 °C and the annual precipitation ranged from 1050 mm to 1570 mm. Detailed data on the main climatic characteristics of the region are given in [20]. The meadow-turf soils and black humus soils are common under meadows on the southern Kuril [22].

Overview of the source data for calculation of air kerma

Radionuclides from Fukushima fallout were first detected on the island of Kunashir at 14–17 March 2011 [23]. Therefore, the 15 March 2011 was selected as a reference date for the onset of the radioactive contamination of the southern Kuril Islands after the Fukushima accident [19, 20].

Soil sampling was conducted [19, 20] during the three time periods: in mid-May 2011 (10 plots), in September–October 2011 (12 plots) and in September 2012 (6 plots). In May 2011, a solid grass-soil block with an area of 20 × 20 cm and a thickness of 4 cm was cut from the wall a hole at each of 10 plots. The block was fractionated into horizontal layers of 0–1 cm (including the covering vegetation), 1–2 cm and 2–4 cm. In September–October 2011 and in September 2012, a 20-cm long dismountable sampler was used to obtain cores from

0.5 г/см² [3, 11, 16]. Для такого источника расчетное значение нормализованной мощности кермы в воздухе составляет 1,72 и 4,68 (нГр/ч)/(кБк/м²) для $^{137}\text{Cs}+^{137\text{m}}\text{Ba}$ и ^{134}Cs соответственно (см. Таблицу 1 в [18]). Последующее уменьшение мощности дозы в воздухе со временем из-за вертикальной миграции радионуклидов в почве (без учета радиоактивного распада) может быть представлено функцией ослабления мощности кермы в воздухе, $r(t)$, [3, 16]:

$$r(t) = p_1 \times \exp\left(-\frac{0.693}{T_1} \times t\right) + p_2 \times \exp\left(-\frac{0.693}{T_2} \times t\right), \quad (1)$$

где p_1 , p_2 , T_1 и T_2 – эмпирически полученные константы, а t – время (годы), прошедшее после выпадений.

Для аэрозольной формы цезия в выпадениях в Японии после аварии на АЭС «Фукусима-1» были предложены следующие значения параметров в уравнении (1): $p_1 = 0,5$, $p_2 = 0,5$, $T_1 = 1,5$ года и $T_2 = 50$ лет [8, 18]. Модель снижения мощности дозы гамма-излучения в воздухе, обусловленного вертикальной миграцией радиоактивного цезия в целинных почвах, осталась неизменной в отчете НКДАР ООН за 2016 год [5].

Основная цель данного исследования состояла в том, чтобы проверить применимость модели НКДАР ООН [8, 18] для описания динамики мощности дозы гамма-излучения в воздухе от выпадений радиоактивного цезия на целинной почве после Фукусимской аварии за пределами территории Японии, в южной части Сахалинской области (Россия). Для этого мы рассчитали мощность кермы в воздухе, используя экспериментальные данные, полученные Ramzaev et al. [19–21] в 2011 и 2012 годах по вертикальному распределению радиоактивного цезия в почвах на лугах островов Кунашир, Шикотан и Итуруп. Тем же методом была оценена мощность воздушной кермы от ^{137}Cs , накопившегося в этих почвах до Фукусимской аварии. Наконец, мы оценили влияние травяного растительного покрова на мощность кермы в воздухе.

Материалы и методы

Область исследования

Обследованные луга расположены в южной части острова Кунашир, на западной и восточной сторонах острова Шикотан, а также на восточной стороне острова Итуруп (см. рисунок 1 в [20]) на расстоянии 800–1050 км к северо-востоку от АЭС «Фукусима-1». Географические координаты и характеристика участков, обследованных тремя экспедициями Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека (Роспотребнадзор) на Курильских островах в 2011–2012 гг., приведены в [19, 20].

Данный регион имеет умеренный муссонный климат. В период 2011–2012 гг. среднегодовая температура для отдельных островов колебалась от 5,3 °C до 6,0 °C, а годовое количество осадков – от 1050 мм до 1570 мм. Подробные данные об основных климатических характеристиках региона приведены в [20]. На лугах Южных Курил распространение имеют лугово-дерновые и гумусовые почвы [22].

the topsoil after cutting off the grassy vegetation. Ten cores were collected at each plot. The soil core taken was cut into slices of 1 cm thick for the top 5 cm and of 5 cm thick for a depth of 5–20 cm. Wet and dry mass was determined for each soil sample. Activities of ¹³⁷Cs and ¹³⁴Cs in the soil samples were determined by gamma-ray spectrometry using high-purity germanium (HPGe) detectors. Activity concentrations of ¹³⁷Cs and ¹³⁴Cs were also determined in vegetation (mixed grass crop) collected at each plot in autumn 2011 and 2012 [19, 21].

The ratio of 1:1 between activities of ¹³⁷Cs and ¹³⁴Cs in Fukushima fallout (as of 15 March 2011) was used to calculate the contribution of ¹³⁷Cs fallout after the accident at the Fukushima-1 NPP to the total inventory of ¹³⁷Cs accumulated as a result of atmospheric nuclear tests (global fallout), the Chernobyl accident (Chernobyl fallout) and the Fukushima accident (Fukushima fallout) [19]. The maximum intensity of global fallout from nuclear weapon tests was observed in 1963 [6].

The term “pre-Fukushima ¹³⁷Cs” is used below to refer to ¹³⁷Cs accumulated in the environment as a result of global and Chernobyl fallout that preceded the accident at the Fukushima-1 NPP. Chernobyl-derived ¹³⁷Cs accounts for approximately 4% of the total activity of pre-Fukushima ¹³⁷Cs in the grassland soils in the Sakhalin region [19].

The summary statistics on sampling depth, water content in soil and current (as of the date of sampling) inventory of ¹³⁷Cs and ¹³⁴Cs in soil are provided in Table 1.

Обзор исходных данных для расчета воздушной кермы

Радионуклиды фукусимских выпадений были впервые зарегистрированы на острове Кунашир 14–17 марта 2011 г. [23]. Поэтому 15 марта 2011 г. было выбрано нами в качестве даты начала радиоактивного загрязнения южных Курильских островов после аварии на АЭС «Фукусима-1» [19, 20].

Отбор проб почвы [19, 20] проводили в течение трех периодов времени: в середине мая 2011 г. (10 участков), в сентябре – октябре 2011 г. (12 участков) и в сентябре 2012 г. (6 участков). В мае 2011 г. на каждом из 10 участков был вырезан травяно-почвенный блок площадью 20×20 см и толщиной 4 см. Блок разделяли на горизонтальные слои 0–1 см (включая покрывающую растительность), 1–2 см и 2–4 см. В сентябре – октябре 2011 г. и в сентябре 2012 г. для отбора кернов из верхнего слоя почвы после срезания травяной растительности использовали разборный пробоотборник длиной 20 см. На каждом участке отбиралось по десять кернов. Извлеченные керны разрезали на слои толщиной 1 см для верхних 5 см и толщиной 5 см для глубины 5–20 см. Для каждого образца почвы определяли влажную и сухую массу. Активность ¹³⁷Cs и ¹³⁴Cs в пробах почвы определяли гамма-спектрометрическим методом с использованием полупроводниковых детекторов из особо чистого германия (HPGe). Удельные активности ¹³⁷Cs и ¹³⁴Cs были также измерены в растительности (разнотравье), собранной на каждом участке осенью 2011 и 2012 гг. [19, 21].

Table 1

Sampling depth, moisture content and inventory of radiocaesium for soil samples from grassland plots surveyed on the islands of Kunashir, Shikotan and Iturup in May and September–October 2011, and in September 2012 (derived from [19, 20])

[Таблица 1

Глубина пробоотбора, содержание влаги и запас радиоцезия для проб почвы, отобранных на луговых участках островов Кунашир, Шикотан и Итуруп в мае и сентябре – октябре 2011 г. и в сентябре 2012 г. (по данным [19, 20])

Parameter [Параметр]	Sampling depth (g cm ⁻²) [Глубина пробоотбора (г/см ²)]		Moisture content (%) [Содержание влаги (%)]	Inventory in soil (Bq m ⁻²)* [Запас в почве (Бк/м ²)*]			
	w.w. [в.в.]	d.w. [с.в.]		¹³⁴ Cs	¹³⁷ Cs		
					Total [Сумма]	Fukushima [Фукусимский]	Pre-Fukushima [Дофукусимский]
May 2011 (n = 10) [Май 2011 г. (n = 10)]							
Minimum [Минимум]	2.02	1.22	40	50.1	126	52.6	55.8
Maximum [Максимум]	7.42	3.82	57	147	1160	155	1090
Median [Медиана]	3.94	2.09	47	67.0	399	70.5	270
Mean [Средняя]	4.25	2.25	47	77.4	453	81.5	371
SD [С.о.]	1.55	0.82	5	28.9	296	30.4	297
September–October 2011 (n = 12) [Сентябрь – октябрь 2011 г. (n = 12)]							
Minimum [Минимум]	20.08	7.20	21	53.0	428	62.8	289
Maximum [Максимум]	31.96	25.31	66	119	3150	141	3050
Median [Медиана]	25.81	14.82	40	86.9	2310	103	2230
Mean [Средняя]	25.91	15.07	43	89.6	2140	106	2040
SD [С.о.]	4.00	5.20	13	19.2	889	22.9	895

Parameter [Параметр]	Sampling depth (g cm ⁻²) [Глубина пробоотбора (г/см ²)]		Moisture content (%) [Содержание влаги (%)]	Inventory in soil (Bq m ⁻²)* [Запас в почве (Бк/м ²)*]			
	w.w. [в.в.]	d.w. [с.в.]		¹³⁴ Cs	¹³⁷ Cs		
					Total [Сумма]	Fukushima [Фукусимский]	Pre-Fukushima [Дофукусимский]
September 2012 (n = 6) [сентябрь 2012 г. (n = 6)]							
Minimum [Минимум]	19.20	9.31	29	55.1	1020	89.0	904
Maximum [Максимум]	29.10	20.26	52	69.6	3280	113	3180
Median [Медиана]	24.55	15.30	34	60.3	2570	97.0	2480
Mean [Средняя]	24.39	15.27	38	61.2	2370	98.7	2270
SD [С.о.]	4.16	4.51	10	5.0	889	8.1	896

* – the inventory of radionuclide in soil is given on the date of sampling;
w.w. – wet weight;
d.w. – dry weight;
n – number of plots sampled;
SD – standard deviation.
[* – запас радионуклида в почве приведен на дату отбора проб;
в.в. – влажный вес;
с.в. – сухой вес;
n – число опробованных участков;
С.о. – стандартное отклонение.]

In May 2011, the sampling depth was very shallow and it did not exceed 7.5 g cm⁻² (wet weight, w.w.). However, based on the vertical distributions of ¹³⁴Cs given in [19], one might reasonably assume that the upper 4 cm of soil contained almost 100% of the total Fukushima-derived radiocaesium deposit within the ground; 90% of this inventory was contained in the upper 1 cm layer. At the same time, the sampling depth of 4 cm was clearly insufficient for obtaining information on the actual inventory of pre-Fukushima ¹³⁷Cs in the areas surveyed in spring 2011 [19].

The average sampling depth in autumn 2011 and 2012 was about 25 g cm⁻² (w.w.), which corresponded to a soil density of approximately 1.25 g cm⁻³ (w.w.). This was lower by 22% compared to the value of 1.6 g cm⁻² (w.w.), which was adopted in the 2000 UNSCEAR report [6] as a representative value of soil density *in situ*. The moisture content in the soils from Kuril Islands was rather high: on average about 40%. This value was two times higher than the representative worldwide value of ~19% for soil moisture content [6].

For all plots surveyed in fall 2011–2012, the upper 5-cm layer of soil contained the entire inventory of Fukushima-derived radiocaesium. On average, 87% and 67% of the inventory was associated with the upper 1-cm layer in 2011 and 2012, respectively [19, 20]. Two examples of the vertical distribution of Fukushima-derived ¹³⁷Cs in soil sampled in 2011 are presented in Fig. 1.

The sites sampled in the autumn months of 2011–2012 can be divided into two categories based on the vertical distribution and value of pre-Fukushima ¹³⁷Cs inventory [19, 20]: 1) uncultivated pastures and virgin lands (reference group) and 2) cultivated pastures and meadows exposed to other anthropogenic and natural factors (non-reference group). Examples of the vertical distribution of pre-Fukushima ¹³⁷Cs in soil for the two groups are presented in Fig. 1.

For quantitative comparison of the vertical distributions of pre-Fukushima and Fukushima-derived radiocaesium in soil, the mean migration depth of the radionuclides in soil (for

Соотношение 1:1 между активностями ¹³⁷Cs и ¹³⁴Cs в фукусимских выпадениях (по состоянию на 15 марта 2011 г.) использовалось для расчета вклада выпадений ¹³⁷Cs после аварии на АЭС «Фукусима-1» в общий запас ¹³⁷Cs, накопившегося в результате ядерных испытаний в атмосфере (глобальные выпадения), аварии на Чернобыльской АЭС (чернобыльские выпадения) и аварии на АЭС «Фукусима-1» (фукусимские выпадения) [19].

Максимальная интенсивность глобальных выпадений наблюдалась в 1963 г. [6].

Термин «дофукусимский ¹³⁷Cs» используется ниже для обозначения ¹³⁷Cs, попавшего в окружающую среду в Сахалинской области в результате глобальных и чернобыльских выпадений, предшествовавших аварии на АЭС «Фукусима-1». Доля чернобыльского ¹³⁷Cs составляет приблизительно 4% от общей активности дофукусимского ¹³⁷Cs в луговых почвах в Сахалинской области [19].

Сводная статистика по глубине отбора проб, содержание воды в почве и текущим (на дату отбора проб) запасам ¹³⁷Cs и ¹³⁴Cs в почве представлена в таблице 1.

В мае 2011 года глубина отбора проб была очень небольшой и не превышала 7,5 г/см² [влажный вес (в.в.)]. Однако, основываясь на вертикальных распределениях ¹³⁴Cs, приведенных в [19], можно обоснованно предположить, что верхние 4 см почвы содержали почти 100% от общего запаса фукусимского радиоцезия в грунте; 90% этого запаса содержалось в верхнем 1-см слое. В то же время глубины отбора в 4 см было явно недостаточно для получения информации о фактическом запасе дофукусимского ¹³⁷Cs на участках, обследованных весной 2011 г. [19].

Средняя глубина отбора проб осенью 2011 и 2012 гг. составляла около 25 г/см² (в.в.), что соответствовало плотности почвы, равной приблизительно 1,25 г/см³ (в.в.). Это ниже на 22% по сравнению со значением 1,6 г/см² (в.в.), которое принято в отчете НКДАР ООН за 2000 г.

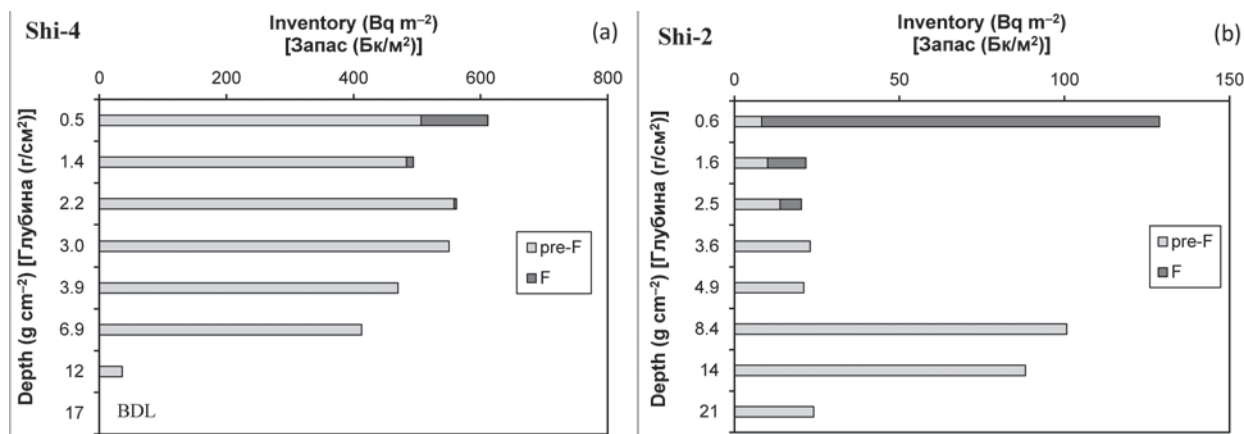


Fig. 1. Depth distribution of pre-Fukushima ¹³⁷Cs (pre-F) and Fukushima-derived ¹³⁷Cs (F) in the upper 20 cm layer of soil sampled at reference plot Shi-4 (a) and at non-reference plot Shi-2 (b) on Shikotan Island in October 2011. The total inventories of pre-Fukushima ¹³⁷Cs and Fukushima-derived ¹³⁷Cs are, respectively: 3020 Bq m⁻² and 120 Bq m⁻² for plot Shi-4, and 289 Bq m⁻² and 139 Bq m⁻² for plot Shi-2. The depth is expressed in the term of mass depth and it is presented on wet (fresh) weight basis. BDL – below detection limit. The figure is constructed based on data from the publication [19]

[Рис. 1. Вертикальное распределение дофукусимского ¹³⁷Cs (pre-F) и фукусимского ¹³⁷Cs (F) в верхнем 20 см слое почвы, отобранной на референтном участке Shi-4 (а) и на нереферентном участке Shi-2 (б) на острове Шикотан в октябре 2011 г. Суммарные запасы дофукусимского ¹³⁷Cs и фукусимского ¹³⁷Cs составляют 3020 Бк/м² и 120 Бк/м² на участке Shi-4 и 289 Бк/м² and 139 Бк/м² на участке Shi-2 соответственно. Глубина выражается в терминах массовой глубины и дается на влажный (свежий) вес. BDL – ниже предела детектирования. Рисунок построен по данным работы [19]

a brief review on this quantity see [15]) was calculated. The mean migration depth of “new” Fukushima-derived ¹³⁷Cs was systematically and significantly smaller when compared with that of “aged” pre-Fukushima ¹³⁷Cs [20].

Calculation of air kerma rate

The detailed data on the vertical distribution of radiocaesium in the grassland soils on Kuril Islands [19, 20] have allowed us to obtain the values of the air kerma using the calculation results [24] for gamma ray dose in the air due to sources in the ground. In accordance with the model described in [24], it was assumed that the radionuclide activity within each layer of soil (and in the aboveground vegetation layer) was presented in the form of a flat infinite isotropic source located in the middle of the layer. A depth of the source is expressed in terms of wet weight, g cm⁻². To provide data for possible further comparisons with results from other studies, dry mass depth was also taken into consideration.

Calculation of air kerma rate, nGy h⁻¹, from Fukushima-derived ¹³⁷Cs and pre-Fukushima ¹³⁷Cs at a height of 1 m above the ground was carried out for each layer of soil using tabulated transfer coefficients provided in [24]. The coefficients had been calculated by Saito and Jacob [24] for the following composition of soil: SiO₂ – 56%, Al₂O₃ – 16%, Fe₂O₃ – 8%, H₂O – 20%. The air kerma rate from ¹³⁴Cs was calculated by multiplication of the air kerma rate from Fukushima-derived ¹³⁷Cs by the factor of 2.72 (= 4.68/1.72; see above and in [18]).

Previously, this model of calculation of the air kerma was verified by means of comparison with an alternative calculation method [25] and with the results of direct measurements of the gamma dose rate in air at grasslands in the Bryansk region contaminated with ¹³⁷Cs as a result of the Chernobyl accident [13]. In general, the differences between the results obtained by these two methods of calculation were within ±3%.

[6] в качестве репрезентативного глобального значения плотности почвы *in situ*. Содержание влаги в почвах Курильских островов было довольно высоким: в среднем около 40%. Это значение было в два раза больше по сравнению с представительной глобальной величиной ~19% для содержания влаги в почве [6].

На всех участках, обследованных осенью 2011 и 2012 гг., верхний 5-сантиметровый слой почвы содержал весь запас фукусимского радиоцезия. В среднем 87% и 67% запаса было связано с верхним 1-см слоем в 2011 г. и 2012 г. соответственно [19, 20]. Два примера вертикального распределения фукусимского ¹³⁷Cs в почве, отобранной в 2011 г., представлены на рисунке 1.

Участки, обследованные в осенние месяцы 2011 и 2012 гг., можно разделить на две категории на основе вертикального распределения и значения запаса дофукусимского ¹³⁷Cs [19, 20]: 1) некультивируемые пастбища и целинные земли (референтная группа) и 2) культивируемые пастбища и луга, подверженные воздействию других антропогенных и природных факторов (нереферентная группа). Примеры вертикального распределения дофукусимского ¹³⁷Cs в почве для этих двух групп приведены на рисунке 1.

Для количественного сравнения вертикальных распределений дофукусимского и фукусимского радиоцезия в почве была рассчитана средняя глубина миграции радионуклидов в почве (для краткого обзора этой величины см. [15]). Средняя глубина миграции «нового» фукусимского ¹³⁷Cs была систематически намного меньше, чем «старого» дофукусимского ¹³⁷Cs [20].

Вычисление мощности воздушной кермы

Подробные данные о вертикальном распределении радиоактивного цезия в луговых почвах Курильских островов [19, 20] позволили нам получить значения воздушной

The calculated air kerma rates correlated with the measured absorbed dose rates in air very well. For large grassland plots, the measured dose rates were found to be on average 6% less than the calculated kerma rates. The calculation method used in this work is described in more detail in [13, 26].

Statistical analysis

Differences between groups were evaluated using the non-parametric Kruskal–Wallis and Mann–Whitney tests. The non-parametric Spearman correlation coefficient, R_{sp} , was used to evaluate an association between variables.

Results and discussion

Absolute kerma rate in air

Table 2 provides summary statistics for results of calculation of absolute air kerma rates from radiocaesium, based on the radioactivity inventory and its vertical distribution in wet soil.

кермы, используя результаты расчетов дозы гамма-излучения в воздухе от источника в земле [24]. В соответствии с моделью, изложенной в работе [24], предполагалось, что активность радионуклидов в каждом слое почвы (и в надземном растительном слое) была представлена в виде плоского бесконечного изотропного источника, расположенного в середине слоя. Глубина залегания источника выражена в терминах влажной массы ($г/см^2$). Чтобы предоставить данные для возможных дальнейших сравнений с результатами других исследований, была также учтена глубина в терминах сухой массы ($г/см^2$).

Расчет мощности воздушной кермы ($нГр/ч$) от дофукусимского и фукусимского ^{137}Cs на высоте 1 м над землей был выполнен для каждого слоя почвы с использованием табличных коэффициентов перехода, вычисленных Saito и Jacob [24] для следующего состава почвы: SiO_2 – 56%, Al_2O_3 – 16%, Fe_2O_3 – 8%, H_2O – 20%. Мощность воздушной кермы гамма-излучения ^{134}Cs была рассчитана путем умножения мощности воздушной кермы гамма-

Table 2

Contribution of Fukushima-derived radiocaesium and pre-Fukushima ^{137}Cs to the total air kerma rate due to the radionuclides deposit in soil at grassland plots sampled on Kunashir, Shikotan and Iturup Islands in 2011 and 2012

[Таблица 2]

Вклад фукусимского радиоцезия и дофукусимского ^{137}Cs в общую мощность воздушной кермы от этих радионуклидов, залегающих в почве луговых участков, опробованных на островах Кунашир, Шикотан и Итуруп в 2011 г. и 2012 г.

Parameter [Параметр]	Air kerma rate ($nGy\ h^{-1}$) [Мощность воздушной кермы ($нГр/ч$)]*				Fukushima contribution (%) [Вклад Фукусимы (%)]	
	Fukushima-derived radiocaesium [Фукусимский радиоцезий]			Pre-Fukushima ^{137}Cs [Дофукусимский ^{137}Cs]		
	^{137}Cs	^{134}Cs	$^{134}Cs+^{137}Cs$			
May 2011 (n = 10) [Май 2011 г. (n = 10)]						
Minimum [Минимум]	0.09	0.22	0.31	0.08	0.44	23
Maximum [Максимум]	0.25	0.64	0.87	1.45	1.89	85
Median [Медиана]	0.12	0.32	0.44	0.34	0.90	60
Mean [Средняя]	0.13	0.35	0.48	0.45	0.93	57
SD [C.o.]	0.05	0.13	0.18	0.40	0.43	18
September–October 2011 (n = 12) [Сентябрь – октябрь 2011 г. (n = 12)]						
Minimum [Минимум]	0.11	0.25	0.36	0.16	0.90	14
Maximum [Максимум]	0.22	0.52	0.74	3.33	3.99	82
Median [Медиана]	0.16	0.37	0.54	1.03	1.51	31
Mean [Средняя]	0.17	0.38	0.55	1.40	1.95	35
SD [C.o.]	0.04	0.08	0.12	1.00	1.00	20
September 2012 (n = 6) [Сентябрь 2012 г. (n = 6)]						
Minimum [Минимум]	0.12	0.20	0.31	0.63	0.99	14
Maximum [Максимум]	0.19	0.32	0.50	2.82	3.27	40
Median [Медиана]	0.15	0.25	0.39	1.24	1.56	22

Parameter [Параметр]	Air kerma rate (nGy h ⁻¹) [Мощность воздушной кермы (нГр/ч)]*					Fukushima contribution (%) [Вклад Фукусимы (%)]
	Fukushima-derived radiocaesium [Фукусимский радиоцезий]			Pre-Fukushima ¹³⁷ Cs [Дофукусимский ¹³⁷ Cs]	Total [Сумма]	
	¹³⁷ Cs	¹³⁴ Cs	¹³⁴ Cs+ ¹³⁷ Cs			
Mean [Средняя]	0.15	0.25	0.40	1.40	1.80	25
SD [С.о.]	0.03	0.05	0.08	0.80	0.82	11

* – the kerma rate in air is given for wet weight of soil on the date of sampling;

n – number of plots sampled;

SD – standard deviation.

[* – мощность воздушной кермы приведена для влажной почвы на дату отбора проб;

n – число опробованных участков;

С.о. – стандартное отклонение.]

The air kerma rate from pre-Fukushima ¹³⁷Cs for individual plots ranged widely between 0.1 and 3.3 nGy h⁻¹. The lowest values were determined for sites surveyed in May 2011. It can be explained by the fact that the depth of 4 cm for soil samples was not sufficient for assessing the total inventory of pre-Fukushima ¹³⁷Cs in soil and the gamma dose rate in air. The highest kerma rates in air were calculated for the virgin grasslands (the reference group) where the upper 20 cm of soil appeared to contain almost 100% of the total ¹³⁷Cs inventory.

The kerma rates in air from Fukushima-derived ¹³⁷Cs showed a difference with a factor of three between a minimum of 0.09 nGy h⁻¹ and a maximum of 0.25 nGy h⁻¹, which reflected the variability of the radionuclide inventory in soil (a range = 53–155 Bq m⁻²). On average, Fukushima derived ¹³⁴Cs+¹³⁷Cs contributed 35% and 25% to the total kerma rate from radiocaesium in autumn 2011 and in autumn 2012, respectively. The average ambient dose equivalent rate (from natural radionuclides, radiocaesium and cosmic radiation) at an open field on Kunashir Island and Shikotan Island in May 2011 was measured as 28 nSv h⁻¹ and 35 nSv h⁻¹, respectively [27]. Hence, radiocaesium contributed less than 10% to the total gamma dose rate in air in 2011–2012.

It is expected that by 2019–2020, the average air kerma rate from radiocaesium present in the environment due to all radioactive fallout will decrease to about 1.3 nGy h⁻¹ because of the physical decay of ¹³⁴Cs and ¹³⁷Cs. The contribution of radioactive caesium to the total gamma dose rate in air will not exceed 5%.

Normalised air kerma rate from ¹³⁷Cs

Normalized air kerma rate from Fukushima-derived ¹³⁷Cs showed a time-dependent decreasing trend: 1.66 ± 0.17 nGy h⁻¹ per kBq m⁻² in spring 2011, 1.56 ± 0.11 nGy h⁻¹ per kBq m⁻² in autumn 2011, 1.48 ± 0.22 nGy h⁻¹ per kBq m⁻² in autumn 2012 (Table 3). Mean migration depth of Fukushima-derived ¹³⁷Cs had an opposite trend: 0.68 ± 0.26 g cm⁻² in spring 2011, 0.90 ± 0.31 g cm⁻² in autumn 2011, 1.30 ± 0.71 g cm⁻² in autumn 2012. However, the Kruskal–Wallis and Mann–Whitney tests showed that the differences between the results corresponding to the three periods of soil sampling are not statistically significant (P > 0.05), both for kerma rate and mean migration depth. One of the possible reasons could be large variations in values of the parameters between individual plots. For example, the mean migration depth was in the

излучения фукусимского ¹³⁷Cs на 2,72 (= 4,68/1,72; см. выше и в [18]).

Ранее данная модель расчета воздушной кермы была проверена путем сравнения с альтернативным методом расчета [25] и с результатами прямых измерений мощности дозы гамма-излучения в воздухе над почвой в Брянской области, загрязненной ¹³⁷Cs в результате аварии на Чернобыльской АЭС [13]. В целом, различия между результатами, полученными этими двумя методами расчета, находились в пределах ±3%. Рассчитанные мощности кермы в воздухе очень хорошо коррелировали с измеренными значениями поглощенной дозы в воздухе. Было обнаружено, что для больших луговых участков измеренные значения мощности дозы были в среднем на 6% меньше, чем рассчитанные значения мощности кермы. Более подробно метод расчета, использованный в настоящей работе, описан в [13, 26].

Статистический анализ

Различия между группами оценивали с помощью непараметрических критериев Краскела – Уоллиса и Манна – Уитни. Непараметрический коэффициент корреляции Спирмена (R_{sp}) был использован для оценки связи между переменными.

Результаты и обсуждение

Абсолютная мощность кермы в воздухе

В таблице 2 приведены сводные статистические данные по результатам расчета абсолютных мощностей воздушной кермы от радиоактивного цезия на основе величин запаса радионуклидов и их вертикального распределения во влажной почве.

Мощность воздушной кермы от дофукусимского ¹³⁷Cs для отдельных участков широко варьировала в диапазоне от 0,1 до 3,3 нГр/ч. Самые низкие значения были определены для участков, обследованных в мае 2011 г. Основной причиной этого было то, что глубина 4 см для образцов почвы не является репрезентативной для оценки общего запаса дофукусимского ¹³⁷Cs и мощности дозы гамма-излучения в воздухе. Самые высокие значения воздушной кермы были получены для целинных лугов (референтная группа), где верхние 20 см почвы, по-видимому, содержали почти 100% общего запаса ¹³⁷Cs.

Table 3

Mean migration depth of Fukushima-derived ^{137}Cs in soil and the corresponding normalized (to 1 kBq ^{137}Cs per 1 m² of the soil surface) values of kerma rate (KR) in air at a height of 1 m above the ground for grassland plots sampled on Kunashir, Shikotan and Iturup Islands in 2011 and 2012

[Таблица 3]

Средняя глубина миграции фукусимского ^{137}Cs в почве и соответствующие нормализованные (на 1 кБк ^{137}Cs на 1 м² поверхности почвы) значения мощности кермы (МК) в воздухе на высоте 1 м над землей для луговых участков, опробованных на островах Кунашир, Шикотан и Итуруп в 2011 г. и 2012 г.]

Parameter [Параметр]	^{137}Cs mean depth (g cm ⁻²) [Средняя глубина для ^{137}Cs (г/см ²)]		Normalized KR (nGy h ⁻¹ per kBq m ⁻²) [Нормализованная МК (нГр/ч)/(кБк/м ²)]	
	w.w. [в.в.]	d.w. [с.в.]	w.w. [в.в.]	d.w. [с.в.]
May 2011 (n = 10) [Май 2011 г. (n = 10)]				
Minimum [Минимум]	0.37	0.15	1.43	1.71
Maximum [Максимум]	1.05	0.54	1.92	2.14
Median [Медиана]	0.68	0.33	1.63	1.90
Mean [Средняя]	0.68	0.34	1.66	1.93
SD [С.о.]	0.26	0.15	0.17	0.17
September–October 2011 (n = 12) [Сентябрь – октябрь 2011 г. (n = 12)]				
Minimum [Минимум]	0.53	0.21	1.33	1.63
Maximum [Максимум]	1.66	0.79	1.74	2.05
Median [Медиана]	0.79	0.36	1.58	1.87
Mean [Средняя]	0.90	0.42	1.56	1.85
SD [С.о.]	0.31	0.18	0.11	0.13
September 2012 (n = 6) [Сентябрь 2012 г. (n = 6)]				
Minimum [Минимум]	0.62	0.31	1.25	1.50
Maximum [Максимум]	1.99	1.10	1.69	1.91
Median [Медиана]	1.28	0.70	1.49	1.72
Mean [Средняя]	1.30	0.69	1.48	1.71
SD [С.о.]	0.71	0.37	0.22	0.19

w.w. – wet weight;
d.w. – dry weight;
n – number of plots sampled;
SD – standard deviation.
[в.в. – влажный вес;
с.в. – сухой вес;
n – число опробованных участков.
С.о. – стандартное отклонение.]

range of 0.37–1.05 g cm⁻² in May 2011 and in the range of 0.53–1.66 g cm⁻² in September–October 2011. Additionally, it is worth noting that in many cases soil samples were not obtained in the same plots in different time periods. The air kerma rate for dry soils was 15 percent higher than that for the same wet soils with natural water content.

Мощность воздушной кермы от фукусимского ^{137}Cs продемонстрировала примерно трехкратную разницу между минимумом 0,09 нГр/ч и максимумом 0,25 нГр/ч, что отражало вариабельность запаса радионуклида в почве (диапазон = 53–155 Бк/м²). В среднем фукусимские ^{134}Cs + ^{137}Cs внесли 35% и 25% в общую мощность воз-

Normalized air kerma rates from pre-Fukushima ^{137}Cs were calculated separately for the reference and non-reference groups. Results of the calculations are provided in Table 4 together with the data on the mean migration depth of the radionuclide in soil. The normalized air kerma rate for the reference group (mean = $0.79 \pm 0.25 \text{ nGy h}^{-1}$ per kBq m^{-2}) was about 1.5 times higher than that for the non-reference group (mean = $0.52 \pm 0.16 \text{ nGy h}^{-1}$ per 1 kBq m^{-2}). The reason was a deeper penetration of ^{137}Cs into the soil at plots from the non-reference group (the mean migration depth = $12.15 \pm 3.67 \text{ g cm}^{-2}$) compared to that at plots from the non-reference group (the mean migration depth = $7.10 \pm 3.58 \text{ g cm}^{-2}$). The Mann–Whitney test showed statistically significant differences between the two groups with respect to mean migration depth and normalized air kerma rate ($P < 0.01$). For dry soils, the normalized air kerma rates were about 30 percent higher compared to those for wet soils.

The normalized kerma rate in air and the mean migration depth of ^{137}Cs in the grassland soils of Kuril Islands were strongly negatively correlated with each other ($R_{\text{sp}} = -0.995$; $P < 0.01$, $n = 46$). This was expected because the values of these quantities were calculated for the same vertical distri-

душной кермы, обусловленную радиоактивным цезием, осенью 2011 г. и осенью 2012 г. соответственно. Средняя мощность амбиентного эквивалента дозы излучения (от естественных радионуклидов, радиоактивного цезия и космического излучения) в мае 2011 г. на открытой местности на островах Кунашир и Шикотан составила 28 нЗв/ч и 35 нЗв/ч соответственно [27]. Таким образом, в 2011–2012 гг. радиоактивный цезий вносил менее 10% в общую мощность дозы гамма-излучения в воздухе.

Ожидается, что к 2019–2020 гг. средняя мощность воздушной кермы от радиоцезия, накопившегося в окружающей среде за счет всех радиоактивных выпадений, снизится до уровня примерно 1,3 нГр/ч из-за физического распада ^{134}Cs и ^{137}Cs . Вклад радиоактивного цезия в суммарную мощность дозы гамма-излучения в воздухе не будет превышать 5%.

Нормализованная мощность воздушной кермы от ^{137}Cs

Нормализованная мощность воздушной кермы от фукусимского ^{137}Cs имела тенденцию к снижению со временем: $1,66 \pm 0,17$ (нГр/ч)/(кБк/м²) весной 2011 г., $1,56 \pm 0,11$ (нГр/ч)/

Table 4

Mean migration depth of pre-Fukushima ^{137}Cs in the top 20 cm of soil and the corresponding normalized (to 1 kBq ^{137}Cs per 1 m² of the soil surface) values of kerma rate (KR) in air at a height of 1 m above the ground at reference plots and at non-reference plots sampled on Kunashir, Shikotan and Iturup Islands in September–October 2011 and in September 2012

[Таблица 4

Средняя глубина миграции дофукусимского ^{137}Cs в верхнем 20 см слое почвы и соответствующие нормализованные (на 1 кБк ^{137}Cs на 1 м² поверхности почвы) значения кермы в воздухе на высоте 1 м над землей для референтных и нереферентных участков, опробованных на островах Кунашир, Шикотан и Итуруп в сентябре – октябре 2011 г. и в сентябре 2012 г.]

Parameter [Параметр]	^{137}Cs mean depth (g cm^{-2}) [Средняя глубина для ^{137}Cs (г/см^2)]		Normalized KR (nGy h^{-1} per kBq m^{-2}) [Нормализованная МК (нГр/ч)/(кБк/м ²)]	
	w.w. [в.в.]	d.w. [с.в.]	w.w. [в.в.]	d.w. [с.в.]
Reference plots (n = 8) [Референтные участки (n = 8)]				
Minimum [Минимум]	2.97	1.04	0.50	0.69
Maximum [Максимум]	12.02	7.23	1.10	1.55
Median [Медиана]	6.19	3.41	0.82	1.08
Mean [Средняя]	7.10	4.03	0.79	1.08
SD [С.о.]	3.58	2.64	0.25	0.35
Non-reference plots (n = 10) [Нереферентные участки (n = 10)]				
Minimum [Минимум]	5.88	2.83	0.38	0.51
Maximum [Максимум]	16.31	11.89	0.82	1.14
Median [Медиана]	13.10	8.03	0.47	0.68
Mean [Средняя]	12.15	7.53	0.52	0.74
SD [С.о.]	3.67	3.04	0.16	0.22

w.w. – wet weight;
d.w. – dry weight;
n – number of plots sampled;
SD – standard deviation.
[в.в. – влажный вес;
с.в. – сухой вес;
n – число опробованных участков;
С.о. – стандартное отклонение.]

butions of radionuclides in the soil. However, the relationship between the mean migration depth and the air kerma rate cannot be described by a simple linear regression; instead, a more complex (bi-exponential) relationship between these two parameters is apparent (Fig. 2).

Table 5 provides the ratios of the normalized air kerma rate values determined in this study (Tables 3 and 4) to the reference value of air kerma rate (1.72 nGy h^{-1} per kBq m^{-2}) used in the UNSCEAR 2013 model [8]. The ratios calculated with the model [Eq. (1)] for the same time points are also given in Table 5. Our experimental results for Fukushima-derived ^{137}Cs are highly consistent with the model's predictions, especially for the 0.2 y and 0.55 y time points. For pre-Fukushima ^{137}Cs (48 y after the peak fallout in 1963; the reference group), the model underestimates normalized kerma rate by approximately 40%. The significant discrepancy between the model prediction and the actual kerma rate in the latter case can be explained by the fact that the UNSCEAR 2013 model [8] is based on experimental data obtained during a relatively short time interval after the Chernobyl accident. Another reason could be differences in the radionuclide deposition modes: a single 'pulse' contamination event in the case of Chernobyl ^{137}Cs [28] and long-term fallout (from 1945 to ~1990 [6]) in the case of global ^{137}Cs .

(kBq/m^2) осенью 2011 г., $1,48 \pm 0,22$ (nГр/ч)/(kBq/m^2) осенью 2012 г. (табл. 3). Средняя глубина миграции для ^{137}Cs демонстрировала противоположную тенденцию: $0,68 \pm 0,26 \text{ г/см}^2$ весной 2011 г., $0,90 \pm 0,31 \text{ г/см}^2$ осенью 2011 г., $1,30 \pm 0,71 \text{ г/см}^2$ осенью 2012 г. Тесты Краскела – Уоллиса и Манна – Уитни показали, что различия между результатами, соответствующими трем периодам отбора проб почвы, не являются статистически значимыми ($P > 0,05$) как для мощности кермы, так и для средней глубины миграции. Одной из возможных причин этого могут быть большие различия в значениях параметров между отдельными участками отбора проб. Например, средняя глубина миграции находилась в диапазоне $0,37\text{--}1,05 \text{ г/см}^2$ в мае 2011 г. и в диапазоне $0,53\text{--}1,66 \text{ г/см}^2$ в сентябре – октябре 2011 г. Кроме того, стоит отметить, что во многих случаях образцы почвы не были получены на одних и тех же участках в разные периоды времени. Нормализованная мощность воздушной кермы для сухих почв была на 15% выше, чем для тех же влажных почв с естественным содержанием воды.

Нормализованная мощность воздушной кермы от дофукусимского ^{137}Cs была рассчитана отдельно для референтной и нереферентной групп. Результаты расчетов представлены в таблице 4 вместе с данными

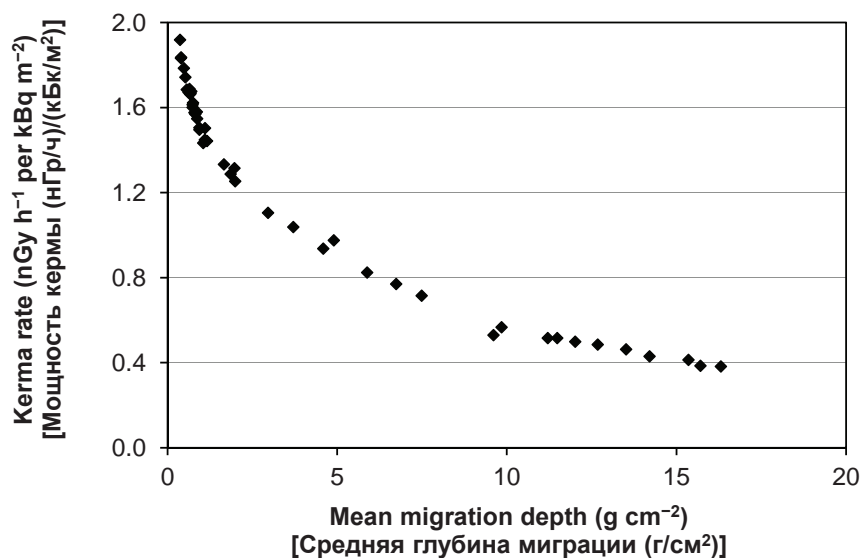


Fig. 2. Relationship between the mean migration depth for ^{137}Cs in soil and the corresponding normalized (to $1 \text{ kBq } ^{137}\text{Cs}$ per 1 m^2 of the soil surface) kerma rate in air at 1 m above the ground at grasslands sampled on Kunashir, Shikotan and Iturup Islands in 2011 and 2012. The scatter plot is constructed based on the vertical distributions of Fukushima-derived ^{137}Cs ($n = 28$) and pre-Fukushima ^{137}Cs ($n = 18$) in the soil
[Рис. 2. Соотношение между средней глубиной миграции ^{137}Cs в почве и соответствующим нормализованным (на $1 \text{ kBq } ^{137}\text{Cs}$ на 1 m^2 поверхности почвы) значением мощности кермы в воздухе на высоте 1 м над землей для лугов, обследованных на островах Кунашир, Шикотан и Итуруп в 2011 г. и 2012 г. Рисунок построен, основываясь на вертикальных распределениях фукусимского ^{137}Cs ($n = 28$) и дофукусимского ^{137}Cs ($n = 18$) в почве]

Table 5

Kerma rates in air from radiocaesium in soil at undisturbed open grasslands relative to that from an infinite plane source of radiocaesium located below a soil slab of the mass thickness of 0.5 g cm⁻² (the reference distribution of the radioactivity)

[Таблица 5

Мощность кермы в воздухе от радиоцезия в почве на целинных лугах по отношению к таковой от бесконечного плоского источника радиоцезия, расположенного под слоем почвы толщиной 0,5 г/см² (референтное распределение радиоактивности)]

Time after deposition (y) [Время после выпадений (год)]	Relative value of air kerma [Относительное значение воздушной кермы]		
	Sakhalin Region (Russia) [Сахалинская область (Россия)]		The UNSCEAR model [8, 18]** [Модель НКДАР ООН [8, 18]]**
	20% water content in soil* [20% содержание воды в почве*]	40% water content in soil [40% содержание воды в почве]	
0.2	0.97 ± 0.10	0.95 ± 0.10	0.95
0.55	0.91 ± 0.07	0.89 ± 0.07	0.88
1.55	0.86 ± 0.13	0.84 ± 0.13	0.73
48	0.46 ± 0.15	0.45 ± 0.15	0.26

* – the relative values of air kerma for the time points of 0.2, 0.55 and 1.55 y after deposition have been calculated for Fukushima-derived ¹³⁷Cs in wet soil using data in column 4 in Table 3, and for pre-Fukushima ¹³⁷Cs (48 y) using data in column 4 in Table 4. The reference normalized value of kerma rate in air at a height of 1 m above the ground is 1.72 nGy h⁻¹ per 1 kBq m⁻² for an isotropic plane source of ¹³⁷Cs located below a soil slab with a mass depth of 0.5 g cm⁻² [18].

** – the relative values of air kerma have been calculated using Eq. (1) and numeric values given in [18], see text.

[* – относительные значения воздушной кермы для временных точек 0,2, 0,55 и 1,55 года после выпадений были рассчитаны для фукусимского ¹³⁷Cs, основываясь на данных в колонке 4 таблицы 3, и для дофукусимского ¹³⁷Cs (48 лет) на основе данных, представленных в колонке 4 таблицы 4. Референтное нормализованное значение воздушной кермы на высоте 1 м над землей равно 1,72 (нГр/ч)/(кБк/м²) для изотропного плоского источника ¹³⁷Cs, расположенного под слоем почвы толщиной 0,5 г/см² [18].

** – относительные значения воздушной кермы были рассчитаны с использованием уравнения (1) и численных значений, приведенных в [18], см. текст.]

The soil-to-air conversion coefficients for air kerma rate were calculated by Saito and Jacob [24] for the 20% content of moisture in soil. The average water content in soils from Kuril Islands exceeds the reference value by a factor of 2 (Table 1). In this case, our calculations slightly overestimate (by ~2%) actual air kerma rates for the wet soils (Tables 2–4) because water attenuates gamma radiation 1.11 times more effectively compared to dry soil [29].

Assuming that the water content in the soils is equal to 40%, the mean normalized kerma rate from Fukushima-derived ¹³⁷Cs can be estimated at a level of 1.63 nGy h⁻¹ per kBq m⁻² in spring 2011, 1.53 nGy h⁻¹ per kBq m⁻² in autumn 2011 and 1.45 nGy h⁻¹ per kBq m⁻² in autumn 2012. The air kerma rate from pre-Fukushima ¹³⁷Cs at the reference sites can be calculated as 0.77 nGy h⁻¹ per kBq m⁻². Hence, the mean relative values of air kerma rate (column 2 in Table 5) should be also corrected (column 3 in Table 5). The correction for the water content improves the consistency between the predictions of the 2013 UNSCEAR model [8] and the normalized kerma rates calculated for the grassland soils on Kuril Islands.

Influence of the aboveground vegetation biomass on air kerma rate

The presence of radiocaesium in the vegetation cover of the grasslands on Kuril Islands [19, 21], which was not considered in the above calculations for the autumn period 2011–2012, could make a definite contribution to the gamma dose rate in air. At the same time, the aboveground biomass, as such, can absorb and scatter gamma radiation coming from the soil. In order to determine the net effect of these opposite influences, we calculated air kerma rate for the case of the presence of the radioactively contaminated plant biomass

о средней глубине миграции радионуклида в почве. Нормализованная мощность воздушной кермы для референтной группы [среднее значение = 0,79 ± 0,25 (нГр/ч)/(кБк/м²)] была примерно в 1,5 раза выше, чем для нереперентной группы [среднее значение = 0,52 ± 0,16 (нГр/ч)/(кБк/м²)]. Причиной этого было более глубокое проникновение ¹³⁷Cs в почву на участках из нереперентной группы (средняя глубина миграции = 12,15 ± 3,67 г/см²) по сравнению с таковым на участках из референтной группы (средняя глубина миграции = 7,10 ± 3,58 г/см²). Различия между двумя группами по средней глубине миграции и нормализованной мощности воздушной кермы были статистически значимыми (тест Манна–Уитни, P < 0,01). Для сухих почв нормализованные значения мощности воздушной кермы были примерно на 30% выше, чем для влажных почв.

Нормализованная мощность воздушной кермы сильно отрицательно коррелировала со средней глубиной миграции ¹³⁷Cs в почве на лугах Курильских островов (R_{sp} = -0,995; P < 0,01, n = 46). Это ожидалось потому, что значения этих величин были рассчитаны для одних и тех же вертикальных распределений радионуклидов в почве. Тем не менее, связь между средней глубиной миграции и нормализованной мощностью воздушной кермы не может быть описана простой линейной регрессией; вместо этого очевидна более сложная (би-экспоненциальная) зависимость между этими двумя параметрами (рис. 2).

В таблице 5 приведены отношения нормализованных значений мощности воздушной кермы, определенных в данном исследовании (см. табл. 3 и 4), к референтному значению мощности воздушной кермы [1,72 (нГр/ч)/(кБк/м²)], используемому в модели НКДАР ООН [8]. Отношения, рассчитанные с помощью модели [уравне-

above the soil surface. We used experimental data on the activity concentration of radionuclides in the herbaceous plants which were collected at each of the surveyed plots [19, 21]. The calculations were performed for the biomass density in the range from 0.5 to 2.0 kg m⁻² (0.05–0.2 g cm⁻², w.w.). This range generally corresponds to variations in the biomass density between individual sites [19, 21]. The results are provided in Table 6 as the ratio of kerma rates for the pair: (bare soil)/(soil with biomass). Despite the presence of pre-Fukushima ¹³⁷Cs in the plants, the terrestrial biomass slightly attenuated the kerma rate in air: by about 1% for the vegetation density of 1 kg m⁻². For gamma radiation from Fukushima-derived ¹³⁷Cs, the total effect was on average close to zero in autumn 2011. In autumn 2012, after a significant decrease of the transfer of Fukushima-derived radiocaesium from soil to plants [21], the aboveground plant biomass in all cases attenuated (by 1–7%) gamma radiation from Fukushima-derived radiocaesium accumulated in the soil.

Conclusions

1. We have calculated kerma rates in air using experimental data obtained by Ramzaev et al. [19–21] on the vertical distribution of radiocaesium in the soil in grasslands on the islands of Kunashir, Shikotan and Iturup in 2011 and 2012. In the period from May 2011 to September 2012, the air kerma rate due to fresh fallout of radioactive caesium from the Fukushima accident varied from 0.31 to 0.84 nGy h⁻¹. The fallout of ¹³⁴Cs and ¹³⁷Cs did not lead to a significant increase in gamma dose rate in air on the meadows of Kuril Islands.

ние (1)] для тех же временных точек, также приведены в таблице 5. Наши экспериментальные результаты для фукусимского ¹³⁷Cs хорошо согласуются с предсказаниями модели, особенно для временных точек 0,2 г. и 0,55 г. Для дофукусимского ¹³⁷Cs (48 лет после пиковых выпадений в 1963 г.; референтная группа) модель недооценивает нормализованный уровень кермы примерно на 40%. Значительное расхождение между прогнозом по модели и фактической мощностью кермы в последнем случае может быть объяснено тем фактом, что модель НКДАР ООН [8] основана на экспериментальных данных, полученных в течение относительно короткого интервала времени после Чернобыльской аварии. Другой причиной могут быть различия в режимах выпадений радионуклидов: единичное «импульсное» загрязнение в случае чернобыльского ¹³⁷Cs [28] и долговременные выпадения с меняющейся интенсивностью (с 1945 по 1990 г. [6]) в случае глобального ¹³⁷Cs.

Saito и Jacob [24] вычислили коэффициенты перехода от загрязнения почвы к мощности воздушной кермы для 20% содержания влаги в почве. Среднее содержание воды в почвах Курильских островов превышает это референтное значение в 2 раза (см. табл. 1). В этом случае наши расчеты слегка переоценивают (на ~2%) фактическую мощность воздушной кермы для влажных почв (см. табл. 2–4), поскольку вода ослабляет гамма-излучение в 1,11 раза более эффективно по сравнению с сухой почвой [29].

Предполагая, что содержание воды в почве было равно 40%, среднюю нормализованную мощность воз-

Table 6

Air kerma rate attenuation by the aboveground vegetation (mixed grass crop). The estimations are valid for specific conditions of radioactive contamination of grassland plots sampled on Kunashir, Shikotan and Iturup Islands in 2011 and 2012 [19–21]. For the calculations, activity concentrations of radionuclides in wet (fresh) samples of the vegetation and soil were considered

[Таблица 6

Ослабление мощности воздушной кермы биомассой (травяные растения), расположенной над поверхностью земли. Оценки получены для специфических условий радиоактивного загрязнения луговых площадок, обследованных на островах Кунашир, Шикотан и Итуруп в 2011 г. и 2012 г. [19–21]. Расчеты проведены для влажного (свежего) веса проб растительности и почвы]

Mass of vegetation per unit area of the ground (kg m ⁻²) [Масса растительности на единицу поверхности земли (кг/м ²)]	Ratio of kerma rates: (bare ground)/(ground with biomass) [Отношение мощностей кермы: (голая почва)/(почва с биомассой)]							
	Pre-Fukushima ¹³⁷ Cs [Дофукусимский ¹³⁷ Cs]				Fukushima ¹³⁷ Cs [Фукусимский ¹³⁷ Cs]			
	Mean [Средняя]	S.d. [C.o.]	Minimum [Минимум]	Maximum [Максимум]	Mean [Средняя]	S.d. [C.o.]	Minimum [Минимум]	Maximum [Максимум]
September–October 2011 (n = 12) [Сентябрь – октябрь 2011 г. (n = 12)]								
0.5	1.007	0.004	0.999	1.014	1.001	0.016	0.958	1.016
1.0	1.013	0.006	0.998	1.020	1.001	0.032	0.921	1.032
1.5	1.019	0.008	0.997	1.030	1.002	0.047	0.888	1.047
2.0	1.026	0.011	0.996	1.039	1.003	0.061	0.860	1.063
September 2012 (n = 6) [Сентябрь 2012 г. (n = 6)]								
0.5	1.005	0.003	1.000	1.009	1.013	0.005	1.006	1.018
1.0	1.010	0.006	1.001	1.018	1.025	0.009	1.012	1.036
1.5	1.015	0.008	1.001	1.027	1.037	0.013	1.018	1.054
2.0	1.029	0.010	1.021	1.036	1.069	0.003	1.066	1.071

S.d. – standard deviation.

[C.o. – стандартное отклонение.]

2. The normalized air kerma rate from Fukushima-derived ^{137}Cs demonstrated a time-dependent decreasing trend: 1.63 nGy h⁻¹ per kBq m⁻² in spring 2011, 1.53 nGy h⁻¹ per kBq m⁻² in autumn 2011, 1.45 nGy h⁻¹ per kBq m⁻² in autumn 2012. However, this trend was not statistically significant.

3. The normalized air kerma rate from pre-Fukushima ^{137}Cs on uncultivated pastures and virgin lands (a mean = 0.77 nGy h⁻¹ per kBq m⁻²) was about 1.5 times higher than that on cultivated pastures and lands disturbed by other anthropogenic and natural factors.

4. Results of our calculations for the air kerma rate from Fukushima-derived ^{137}Cs are consistent with the predictions of the 2013 UNSCEAR model [8, 18] which has been used for evaluation of doses from external radiation to the population of Japan after the Fukushima accident. For pre-Fukushima ^{137}Cs , this model underestimates the calculated normalized air kerma rate by approximately 40%.

5. The aboveground biomass of herbaceous plants had practically no effect on the air kerma rate from radioactive caesium contained in the grassland soils.

душной кермы от фукусимского ^{137}Cs следует оценить на уровне 1,63 (нГр/ч)/(кБк/м²) весной 2011 г., 1,53 (нГр/ч)/(кБк/м²) осенью 2011 г. и 1,45 (нГр/ч)/(кБк/м²) осенью 2012 г. Нормализованная мощность воздушной кермы от дофукусимского ^{137}Cs на референтных лугах оценивается величиной 0,77 (нГр/ч)/(кБк/м²). Следовательно, средние относительные значения воздушной кермы (столбец 2 в таблице 5) также должны быть скорректированы (столбец 3 в таблице 5). Поправка на содержание воды улучшает согласованность между нормализованными значениями кермы, рассчитанными для луговых почв Курильских островов, и прогнозами модели НКДАР ООН [8].

Влияние наземной растительной биомассы на мощность воздушной кермы

Наличие радиоактивного цезия в растительном покрове лугов на Курильских островах [19, 21], которое не было учтено в приведенных выше расчетах для осеннего периода 2011–2012 гг., могло дать определенный вклад в мощность дозы гамма-излучения в воздухе. В то же время наземная биомасса как таковая должна поглощать и рассеивать гамма-излучение, идущее от почвы. Чтобы определить суммарный эффект этих противоположных воздействий, мы рассчитали мощность кермы для случая присутствия радиоактивно загрязненной биомассы растений над поверхностью почвы. В расчетах использовали экспериментальные данные по удельной активности радионуклидов в травянистых растениях, которые были собраны на каждом из обследованных участков [19, 21]. Расчеты проводили для плотности биомассы в диапазоне от 0,5 до 2,0 кг/м² (0,05–0,2 г/см², в.в.). Этот диапазон в целом соответствует колебаниям плотности биомассы между отдельными участками [19, 21]. Результаты представлены в таблице 6 как отношение мощностей кермы для пары: голая почва/почва с биомассой. Несмотря на присутствие дофукусимского ^{137}Cs в растениях, наземная биомасса немного ослабляла мощность кермы в воздухе: примерно на 1% при плотности растительности 1 кг/м². Для гамма-излучения от фукусимского ^{137}Cs общий эффект был в среднем близок к нулю осенью 2011 г. Осенью 2012 г. после значительного уменьшения переноса фукусимского радиоцезия из почвы в растения [21] присутствие наземной биомассы во всех случаях ослабляло (на 1–7%) гамма-излучение от радиоцезия, накопившегося в почве.

Выводы

1. Мы рассчитали мощность кермы в воздухе, используя экспериментальные данные, полученные Ramzaev et al. [19–21] в 2011 и 2012 гг. по вертикальному распределению радиоактивного цезия в почве на лугах островов Кунашир, Шикотан и Итуруп. В период с мая 2011 г. по сентябрь 2012 г. мощность воздушной кермы, связанной с новыми выпадениями радиоактивного цезия после аварии на АЭС «Фукусима-1», варьировала от 0,31 до 0,84 нГр/ч. Выпадения ^{134}Cs и ^{137}Cs не привели к сколько-либо значимому увеличению мощности дозы гамма-излучения в воздухе на лугах Курильских островов.

2. Нормализованная мощность воздушной кермы от фукусимского ^{137}Cs имела тенденцию к снижению со временем: 1,63 (нГр/ч)/(кБк/м²) весной 2011 г., 1,53 (нГр/ч)/(кБк/м²) осенью 2011 года, 1,45 (нГр/ч)/(кБк/м²) осенью 2012 г. Однако эта тенденция была статистически незначимой.

3. Нормализованная мощность воздушной кермы от дофукусимского ^{137}Cs на некультивируемых пастбищах и целинных землях (в среднем = $0,77$ (нГр/ч)/(кБк/м²) была примерно в 1,5 раза выше, чем таковая на культивируемых пастбищах и лугах, подверженных воздействию других антропогенных и природных факторов.

4. Результаты наших расчетов мощности воздушной кермы от фукусимского ^{137}Cs хорошо согласуются с прогнозами модели НКДАР ООН 2013 г. [8, 18], которая

использовалась для оценки доз внешнего облучения населения Японии после Фукусимской аварии. Для дофукусимского ^{137}Cs данная модель недооценивает рассчитанную нормализованную мощность воздушной кермы примерно на 40%.

5. Надземная биомасса травянистых растений практически не влияла на мощность воздушной кермы гамма-излучения радиоактивного цезия, содержащегося в почве.

References (Литература)

1. IAEA – International Atomic Energy Agency. Generic Procedures for Monitoring in a Nuclear or Radiological Emergency, IAEA-TECDOC-1092. IAEA, Vienna, 1999.
2. Jacob, P., Roth, P., Golikov, V., Balonov, M., Erkin, V., Likhariov, I., Garger, E., Kashparov, V. Exposures from external radiation and from inhalation of resuspended material. In: The Radiological Consequences of the Chernobyl accident. European Commission, Brussels, 1996, pp. 251–260.
3. Golikov, V.Y., Balonov, M.I., Jacob, P. External exposure of the population living in areas of Russia contaminated due to the Chernobyl accident. *Radiat. Environ. Biophys.*, 2002, Vol. 41, No. 3, pp. 185–193.
4. IAEA – International Atomic Energy Agency. Chernobyl Forum Expert Group ‘Environment’. Environmental Consequences of the Chernobyl Accident and their Remediation: Twenty Years of Experience. IAEA, Vienna, 2006.
5. UNSCEAR – United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. UNSCEAR 2016 Report to the General Assembly, with Scientific Annexes. United Nations, New York, 2017.
6. UNSCEAR – United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. Sources and Effects of Ionizing Radiation, Report to the General Assembly with Scientific Annexes. United Nations, New York, 2000.
7. ICRP – International Commission on Radiological Protection. Radionuclide Transformations – Energy and Intensity of Emissions. ICRP Publication 38. Ann. ICRP, 1983, Vol. 11–13.
8. UNSCEAR – United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. UNSCEAR 2013 Report, Vol. 1, Scientific Annex A, Levels and Effects of Radiation Exposure due to the Nuclear Accident after the 2011 Great East-Japan Earthquake and Tsunami, Appendix C (Assessment of Doses to the Public). United Nations, New York, 2014.
9. Saito, K., Yamamoto, H., Mikami, S., Andoh, M., Matsuda, N., Kinase, S., Tsuda, T., Yoshida, T., Matsumoto, S., Sato, T., Seki, A., Takemiya, H. Radiological conditions in the environment around the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant site. *Global Environmental Research*, 2016, Vol. 20, pp. 15–22.
10. ICRU – International Commission on Radiation Units and Measurements. Gamma-Ray Spectrometry in the Environment. ICRU report: 53. Bethesda, Maryland, 1994.
11. Jacob, P., Meckbach, R. Measurements after the Chernobyl accident in relation to the exposure of an urban population. In: Restoration of Environments Affected by Residues from Radiological Accidents: Approaches to Decision Making. IAEA-TECDOC-1131. International Atomic Energy Agency, Vienna, 2000, pp. 34–41.
12. Ramzaev, V., Yonehara, H., Hille, R., Barkovsky, A., Mishine, A., Sahoo, S.K., Kurotaki, K., Uchiyama, M. Gamma-dose rates from terrestrial and Chernobyl radionuclides inside and outside settlements in the Bryansk Region, Russia in 1996–2003. *J. Environ. Radioact.*, 2006, Vol. 85, pp. 205–227.
13. Ramzaev, V.P., Golikov, V.Yu. A comparison of measured and calculated values of air kerma rates from ^{137}Cs in soil. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*, 2015, Vol. 8, No. 4, pp. 42–51. Russian (Рамзаев, В.П., Голиков, В.Ю. Сравнение расчетных и измеренных значений мощности кермы в воздухе над почвой, загрязненной ^{137}Cs . *Радиационная гигиена*, 2015, Том 8, № 4, С. 42–51).
14. IAEA – International Atomic Energy Agency. Applicability of Monitored Natural Attenuation at Radioactively Contaminated Sites. Technical Reports Series No. 445. IAEA, Vienna, 2006.
15. Ramzaev, V., Barkovsky, A. Vertical distribution of ^{137}Cs in grassland soils disturbed by moles (*Talpa europaea* L.). *J. Environ. Radioact.*, 2018, Vol. 184–185, pp. 101–108.
16. Jacob, P., Likharev, I. (Eds.). EUR 16541 – Pathway Analysis and Dose Distributions. Joint Study Project 5. Final report. European Commission, Luxembourg, 1996.
17. Likharev, I.A., Kovgan, L.N., Jacob, P., Anspaugh, L.R. Chernobyl accident: external exposure of Ukrainian population due to radioactive contamination of territory (retrospective and prospective dose estimations). *Health Phys.*, 2002, Vol. 82, pp. 290–303.
18. UNSCEAR – United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. Attachment C–12. Methodology for the Assessment of Dose from External Exposure and Inhalation of radioactive material. UNSCEAR 2013 Report, Vol. 1, Scientific Annex A, Levels and Effects of Radiation Exposure due to the Nuclear Accident after the 2011 Great East-Japan Earthquake and Tsunami, Appendix C (Assessment of Doses to the Public). United Nations, New York, 2014.
19. Ramzaev, V., Barkovsky, A., Goncharova, Yu., Gromov, A., Kaduka, M., Romanovich, I. Radiocesium fallout at the grasslands on Sakhalin, Kunashir and Shikotan Islands due to the Fukushima accident: the radioactive contamination of soil and plants in 2011. *J. Environ. Radioact.*, 2013, Vol. 118, pp. 128–142.
20. Ramzaev, V.P., Barkovsky, A.N., Gromov, A.V., Ivanov, S.A., Kaduka, M.V. Fukushima fallout in Sakhalin Region, Russia, part 1: ^{137}Cs and ^{134}Cs in grassland soils. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*, 2018, Vol. 11, No. 1, pp. 25–42.
21. Ramzaev, V.P., Barkovsky, A.N., Gromov, A.V., Ivanov, S.A., Kaduka, M.V. Fukushima fallout in Sakhalin Region, Russia, part 2: ^{137}Cs and ^{134}Cs in grassland vegetation. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*, 2018, Vol. 11, No. 2, pp. 7–19.
22. Razzhigayeva, N.G., Ganzei, L.A., Mokhova, L.M., Pshenichnikova, N.F. Meadow landscapes of Southern Kurils: origin, age and development. *Geography and Natural Resources*, 2011, No. 3, pp. 96–104. Russian (Разжигаева, Н.Г., Ганзей, Л.А., Мохова, Л.М., Пшеничникова, Н.Ф. Луговые ландшафты Южных Курил: происхождение, возраст и развитие. *География и природные ресурсы*, 2011, № 3, С. 96–104).
23. Bulgakov, V.G., Vakulovsky, S.M., Kim, V.M., Polyanskaya, O.N., Uvarov, A.D., Yahryushin, V.N. Man-made radionuclides in the near-the-ground atmospheric layer due to the Fukushima accident. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*, 2011, Vol. 4, No. 4, pp. 26–31. Russian (Булгаков, В.Г., Вакуловский, С.М., Ким, В.М., Полянская, О.Н., Уваров, А.Д., Яхрюшин, В.Н. Техногенные радионуклиды

- в приземном слое атмосферы вследствие аварии на АЭС Фукусима. Радиационная гигиена, 2011, Том 4, № 4, С. 26–31).
24. Saito, K., Jacob, P. Gamma ray fields in the air due to sources in the ground. *Radiat. Prot. Dosimetry*, 1995, Vol. 58, pp. 29–45.
 25. Golikov, V., Barkovski, A., Kulikov, V., Balonov, M., Rantavaara, A., Vetikko, V. Gamma ray exposure due to sources in the contaminated forest. In: I. Linkov and W.R. Schell (Eds.). *Contaminated Forests – Recent Developments in Risk Identification and Future Perspective. Proceedings of the NATO Advanced Research Workshop on Contaminated Forests, Kiev, Ukraine 27–30 June 1998*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 1999, pp. 333–341.
 26. Ramzaev, V., Repin, V., Medvedev, A., Khramtsov, E., Timofeeva, M., Yakovlev, V. Radiological investigations at the “Taiga” nuclear explosion site, part II: man-made γ -ray emitting radionuclides in the ground and the resultant kerma rate in air. *J. Environ. Radioact.*, 2012, Vol. 109, pp. 1–12.
 27. Romanovich, I.K., Gromov, A.V., Goncharova, Yu.N. Preliminary analysis of the primary survey data of the radiation situation in the South-Eastern Sakhalin region after the Fukushima NPP accident. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*, 2011, Vol. 4, No. 1, pp. 36–42. Russian (Романович, И.К., Громов, А.В., Гончарова, Ю.Н. Предварительный анализ данных первичного обследования радиационной обстановки в юго-восточных районах Сахалинской области после аварии на АЭС «Фукусима-1». *Радиационная гигиена*, 2011, Том 4, № 3, С. 36–42).
 28. Shaw, G., Kliashtorin, A., Mamikhin, S., Shcheglov, A., Rafferty, B., Dvornik, A., Zhuchenko, T., Kuchma, N. Modelling radiocaesium fluxes in forest ecosystems. In: *The Radioecological Consequences of the Chernobyl Accident. Proceedings of the First International Conference. Minsk, Belarus, 18 to 22 March 1996*, EUR 16544EN. European Commission, Luxembourg, 1996, pp. 221–224.
 29. Beamish, D. Gamma ray attenuation in the soils of Northern Ireland, with special reference to peat. *J. Environ. Radioact.*, 2013, Vol. 115, pp. 13–27.

Received: 13 January, 2019

Поступила: 13.01.2019 г.

Valery P. Ramzaev – Candidate of Medical Sciences, Leading Researcher of the Laboratory of External Exposure, Saint-Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene after Professor P.V. Ramzaev, Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Well-Being. **Address for correspondence:** Mira Str., 8, Saint-Petersburg, 197101, Russia. E-mail: V.Ramzaev@mail.ru

Anatoly N. Barkovsky – Head of the Federal Radiological Centre, Saint-Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene after Professor P.V. Ramzaev, Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Well-Being, Saint-Petersburg, Russia.

Рамзаев Валерий Павлович – кандидат медицинских наук, ведущий научный сотрудник лаборатории внешнего облучения Санкт-Петербургского научно-исследовательского института радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека. **Адрес для переписки:** 197101, Россия, Санкт-Петербург, ул. Мира, д. 8; E-mail: V.Ramzaev@mail.ru

Барковский Анатолий Николаевич – руководитель Федерального радиологического центра Санкт-Петербургского научно-исследовательского института радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, Санкт-Петербург, Россия

For citation (Для цитирования): Ramzaev V.P., Barkovsky A.N. Estimation of the air kerma rate from ^{137}Cs and ^{134}Cs deposited on the ground in the Sakhalin region of Russia after the Fukushima accident. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*, 2019, Vol. 12, No. 1, pp. 36-51. DOI: 10.21514/1998-426x-2019-12-1-36-51