

Fukushima fallout in Sakhalin Region, Russia, part 3: ^{137}Cs and ^{134}Cs in cow's milk

Valery P. Ramzaev, Anatoly N. Barkovsky, Alexey V. Gromov, Marina V. Kaduka

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

The study was conducted on Kunashir, Shikotan and Iturup Islands (Sakhalin Region of Russia) in order to evaluate the impact of the Fukushima accident on the "soil–grass–cow's milk" exposure pathway. A total of 22 samples of cow's milk were collected in the May 2011 – September 2012 period. Radiocaesium was isolated from thermally treated specimens using the antimony–iodide radiochemical method. The activity concentrations of ^{134}Cs and ^{137}Cs were measured by γ -ray spectrometry using high purity germanium detectors. Caesium-134 was detected in 18 of the total 22 samples of milk. The activity concentration of ^{134}Cs in the samples varied from 0.08 Bq kg^{-1} to 2.00 Bq kg^{-1} . Caesium-137 was quantified in all 22 samples: range = 0.088 – 2.43 Bq kg^{-1} . On average, more than a half of the total ^{137}Cs in the milk samples from Sakhalin Region was of Fukushima origin (mean = 60%, median = 57%, range = 13–95%). The highest activity concentrations and values of the soil–to–milk aggregated transfer coefficient, T_{ag} , for ^{134}Cs (and Fukushima-derived ^{137}Cs) were observed in milk samples collected in mid-May 2011. The mean T_{ag} values decreased in the May–October period of 2011 from $12 \times 10^{-3} \text{ m}^2 \text{ kg}^{-1}$ to $2.3 \times 10^{-3} \text{ m}^2 \text{ kg}^{-1}$. In September 2012, the T_{ag} values remained unchanged (mean = $2.8 \times 10^{-3} \text{ m}^2 \text{ kg}^{-1}$) compared to those in September–October 2011. In the autumns of 2011 and 2012, the calculated values of T_{ag} for Fukushima-derived radiocaesium were on average 17 times larger than the ones for pre-Fukushima ^{137}Cs . The higher transfer of Fukushima-derived ^{137}Cs (compared to pre-Fukushima ^{137}Cs) for milk reflected the difference between the "new" and "aged" radiocaesium in the intensity of the radionuclide transfer from soil to grassland plants which were the major component of the cow's diet in the area of our study. The ratio between the ^{137}Cs activity concentration in the milk (fresh weight) and that in the grassland plants (dry weight) ranged from 0.028 to 0.11. The effective dose from ingestion of Fukushima-derived radiocaesium in locally produced cow's milk for critical group of adult residents of the southern Kuril in the first year after the accident is conservatively estimated as 0.0027 mSv. The Fukushima accident has had a negligible impact on radiocaesium contamination of cow's milk and the corresponding human exposure on the southern Kuril Islands: Shikotan, Kunashir and Iturup.

Key words: the Fukushima accident, global fallout, Kuril Islands, cow, milk, plants, ^{134}Cs , ^{137}Cs , aggregated transfer coefficient, effective dose.

Фукусимские выпадения в Сахалинской области России, сообщение 3: ^{137}Cs и ^{134}Cs в коровьем молоке

В.П. Рамзаев, А.Н. Барковский, А.В. Громов, М.В. Кадука

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

Исследование проводилось на островах Кунашир, Шикотан и Итуруп (Сахалинская область России) для оценки влияния аварии на АЭС «Фукусима-1» на радиоактивное загрязнение коровьего молока. Всего в период с мая 2011 г. по сентябрь 2012 г. было отобрано 22 пробы молока. Радиоактивный цезий выделяли из проб после их сжигания и озоления с использованием радиохимического сурьмяно-йодидного метода. Удельную активность ^{134}Cs и ^{137}Cs определяли методом гамма-спектрометрии с использованием детекторов из особо чистого германия. Цезий-134 был обнаружен в 18 из 22 образцов молока. Удельная активность ^{134}Cs в пробах варьировала от 0,08 Бк/кг до 2,00 Бк/кг. Цезий-137 был выявлен во всех 22 пробах: диапазон = 0,088–2,43 Бк/кг. В среднем более половины от общей актив-

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

ности ^{137}Cs в пробах молока из Сахалинской области имело фукусимское происхождение (среднее значение = 60%, медиана = 57%, диапазон = 13–95%). Максимальная удельная активность ^{134}Cs и значения агрегированного коэффициента переноса (T_{ag}) почва – молоко для ^{134}Cs (и фукусимского ^{137}Cs) наблюдались для проб молока, отобранных в середине мая 2011 г. Среднее значение T_{ag} снизилось в период с мая по октябрь 2011 г. с $12 \times 10^{-3} \text{ м}^2/\text{кг}$ до $2,3 \times 10^{-3} \text{ м}^2/\text{кг}$. В сентябре 2012 г. значения T_{ag} остались неизменными (среднее значение = $2,8 \times 10^{-3} \text{ м}^2/\text{кг}$) по сравнению с таковыми в сентябре – октябре 2011 г. Вычисленные значения T_{ag} для радиоцезия фукусимского происхождения были осенью 2011 и 2012 гг. в среднем в 17 раз больше, чем таковые для дофукусимского ^{137}Cs . Более высокий коэффициент переноса фукусимского ^{137}Cs (по сравнению с дофукусимским ^{137}Cs) в коровье молоко отражает разницу между «новым» и «старым» радиоцезием в отношении интенсивности перехода радионуклидов из почвы в луговые растения, которые являются основным компонентом рациона питания коров в обследованном регионе. Значения фактора накопления ^{137}Cs для пары (молоко, на свежий вес)/(луговые растения, на сухой вес) находились в диапазоне 0,028–0,11. Эффективная доза облучения от поступления фукусимского радиоцезия с местным коровьим молоком для критической группы взрослых жителей Южных Курил в первый год после аварии консервативно оценивается величиной 0,0027 мЗв. Авария на АЭС «Фукусима-1» оказала пренебрежимо малое влияние на радиоактивное загрязнение коровьего молока и соответствующее воздействие на человека на Южных Курильских островах Кунашир, Шикотан и Итуруп.

Ключевые слова: Фукусимская авария, глобальные выпадения, Курильские острова, корова, молоко, растения, ^{134}Cs , ^{137}Cs , агрегированный коэффициент переноса, эффективная доза.

Introduction

The Fukushima accident led to a significant atmospheric emission of the long-lived radionuclides ^{134}Cs and ^{137}Cs that fell to the surface of land and sea in the entire Northern Hemisphere [1–3]. Such fallout were registered in Russia, specifically in its Far-Eastern territories and the adjacent regions of Pacific Ocean [4–6]. Shortly after the accident, when the situation with actual levels of Fukushima fallout on the Russian territory remained unclear, the Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Well-Being (Rospotrebnadzor) initiated a monitoring program on the assessment of radioactive contamination of the locally produced food and imported foodstuff [7, 8].

Evaluation of cow's milk contamination by radiocaesium was of importance. Previous studies performed after atmospheric nuclear weapons tests and the Chernobyl accident had shown that, in the Russian Federation, the "grass-cow-milk" pathway might be one of the major contributors to internal exposure of the local population by radiocaesium (e.g., [9–11]).

In May 2011, ^{134}Cs , a marker of Fukushima fallout, was quantified (range = 0.8–2.5 Bq kg⁻¹) in all samples of cow's milk obtained from certain private farms on Kunashir and Shikotan Islands (Sakhalin Region) [12]. Cs-137 was also determined in the samples. Although the total activity concentrations of the radiocaesium isotopes were far below the permissible level of 100 Bq kg⁻¹ adopted in Russia for cow's milk [13], the generic recommendation of Rospotrebnadzor was that radiological monitoring of milk as well as of other locally produced food should be continued [5]. The measurements of cow's milk samples collected in Sakhalin Region in autumn 2011 by Rospotrebnadzor [8] confirmed the negligible influence of the Fukushima accident on the "grass-cow-milk" exposure pathway in the south of Sakhalin Island and in Kunashir and Shikotan Islands.

The published evaluations [5, 8, 12] of the milk contamination in Sakhalin Region after the Fukushima accident were primarily focused on the hygienic (radiological) aspect. Such important radioecological issues as soil-to-milk transfer and forage-to-milk transfer of Fukushima-derived radiocaesium and pre-Fukushima ^{137}Cs remained

Введение

Авария на АЭС «Фукусима-1» привела к значительным атмосферным выбросам долгоживущих радионуклидов ^{134}Cs и ^{137}Cs , которые выпали на поверхность суши и моря во всем Северном полушарии [1–3]. Такие выпадения были зарегистрированы и в России, особенно на ее дальневосточных территориях и в прилегающих районах Тихого океана [4–6]. Вскоре после аварии, когда ситуация с фактическими уровнями фукусимских выпадений на территории России оставалась неясной, Федеральная служба по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека (Роспотребнадзор) инициировала программу мониторинга по оценке радиоактивного загрязнения продуктов питания местного производства и импортных пищевых продуктов [7, 8].

Важное значение имела оценка загрязнения коровьего молока радиоактивными изотопами цезия (далее по тексту – «радиоцезий»). Предыдущие исследования, проведенные в связи с испытаниями ядерного оружия в атмосфере и аварией на Чернобыльской АЭС, показали, что в Российской Федерации пищевая цепочка «трава – корова – молоко» может быть одним из основных факторов, влияющих на внутреннее облучение местного населения радиоцезием (например, [9–11]).

В мае 2011 г. ^{134}Cs , маркер фукусимских выпадений, был определен количественно (диапазон = 0,8–2,5 Бк/кг) во всех пробах коровьего молока, полученных из частных хозяйств на островах Кунашир и Шикотан (Сахалинская область) [12]. В пробах также определяли ^{137}Cs . Хотя удельная активность радиоцезия была намного ниже допустимого уровня 100 Бк/кг, принятого в России для коровьего молока [13], общие рекомендации Роспотребнадзора заключались в том, что радиационно-гигиенический мониторинг молока, а также других продуктов местного производства должен быть продолжен [5]. Результаты исследований проб молока, отобранных в Сахалинской области осенью 2011 г. специалистами учреждений Роспотребнадзора [8], подтвердили пренебрежимо малое влияние фукусимской аварии на пищевую цепочку «трава – корова – молоко» для южной части острова Сахалин и островов Кунашир и Шикотан.

beyond the scope of the investigations. One of the reasons was the fact that at the moment of publishing the book [8] in 2012, the assessments of the $^{134}\text{Cs}/^{137}\text{Cs}$ activities ratio in Fukushima fallout, the radiocaesium inventories in soils and the radioactive contamination of plants in grasslands were incomplete. Currently, after publication of additional experimental data and generic estimations focused on the above mentioned issues [14–18], the transfer parameters in the “soil–grass–cow–milk” pathway can be evaluated quantitatively. Additionally, the authors had an opportunity to collect and analyze a new series of cow’s milk samples in Sakhalin Region in 2012. It has allowed to evaluate dynamics of the radiocaesium contamination levels in milk in the first and second years after the accident.

The main objectives of the study are:

- 1) to present new experimental data and to summarize all results obtained in Sakhalin Region in 2011–2012 on cow’s milk contamination by caesium radionuclides;
- 2) to estimate the “soil–to–cow’s milk” aggregated transfer coefficients (T_{ag}) for Fukushima-derived and pre-Fukushima radiocaesium;
- 3) to estimate the “cow’s milk/forage” concentration ratios (CR) for Fukushima-derived and pre-Fukushima radiocaesium;
- 4) to assess the effective dose from ingestion of radiocaesium in locally produced milk for critical group of adult residents of the southern Kuril in the first year after the accident.

Materials and methods

A total of 22 samples of cow’s milk were obtained from private farms on the Kunashir (four settlements), Shikotan (two settlements) and Iturup (six settlements) islands. The samples were provided by the farmers (the cows’ owners); they were interested in getting information on the quality of milk.

The investigated areas and the properties of soil and vegetation in grasslands have already been described in [8, 14, 17, 18].

In all cases the cows grazed freely on the territory of a settlement or in its vicinity, including grasslands, edges of forests and the beaches of Pacific Ocean or Okhotsk Sea. A mixture of grasses and herbs (the grass-forb crop, GFC [14]) in the grasslands was the main contributor to the forage of the cows, however the cows’ owners also mentioned dwarf bamboo (*Sasa* sp.) and edible sea macro-algae (e.g., *Laminaria* sp.) [19].

The mass of a milk aliquot taken for laboratory analyses ranged from 0.5 to 1.0 kg (fresh weight, f.w.). The aliquots were dried and ashed at a temperature below 450 °C. Radiocaesium was extracted from the treated specimens using the antimony–iodide radiochemical method [20]. The precipitate of caesium antimony iodide was placed on an aluminium plate (diameter = 1.5 cm) and dried. Gamma-spectrometry analyses were performed using high-purity germanium detectors and multichannel analysers (ORTEC) to determine the ^{134}Cs and ^{137}Cs activities [14, 16]. The plates were placed at a distance of about 3 mm from the cup of the detector. Primary calibration of the spectrometers for this geometry was done in 2011 [8, 12]. The final calibration was performed in 2011–2012 using certified sources ^{134}Cs and

Опубликованные оценки [5, 8, 12] по загрязнению молока в Сахалинской области после аварии на АЭС «Фукусима-1» в первую очередь касались гигиенического (радиологического) аспекта. Такие важные радиэкологические параметры, как коэффициент переноса радиоцезия из почвы в молоко и соотношение концентрации радиоцезия в коровьем молоке и в кормах, поступающих в организм животных, оставались за рамками исследований. Одна из причин заключалась в том, что на момент подготовки и выхода книги [8] в 2012 г. оценки, касающиеся соотношения активностей $^{134}\text{Cs}/^{137}\text{Cs}$ в выпадениях, запаса радиоцезия в почве и радиоактивного загрязнения растений на лугах, были неполными. В настоящее время после публикации дополнительных экспериментальных данных и обобщенных оценок по вышеуказанным вопросам [14–18] параметры перехода радиоцезия в цепочке «почва – трава – корова – молоко» могут быть оценены количественно. Кроме того, у авторов была возможность отобрать и проанализировать еще одну серию проб коровьего молока в Сахалинской области в 2012 г. Это позволило оценить динамику уровня радиоактивного загрязнения в первый и второй год после аварии.

Задачи исследования:

1. Представить новые экспериментальные данные и обобщить все результаты измерений, проведенных в 2011–2012 гг. относительно загрязнения коровьего молока радионуклидами цезия в Сахалинской области.
2. Оценить агрегированные коэффициенты переноса (T_{ag}) фукусимского и дофукусимского радиоцезия из почвы в молоко.
3. Оценить фактор накопления (ФН), т.е., величину соотношения концентрации фукусимского и дофукусимского радиоцезия в коровьем молоке и в кормах, поступающих в организм животных.
4. Оценить эффективную дозу облучения от радиоцезия, содержащегося в молоке местного производства, для критической группы взрослых жителей южных Курил в первый год после аварии.

Материалы и методы

Всего из фермерских (частных) хозяйств, расположенных на острове Кунашир (4 населенных пункта (Н.п.)), острове Шикотан (2 Н.п.) и острове Итуруп (6 Н.п.), было получено 22 пробы коровьего молока. Пробы были переданы фермерами (владельцами коров); они были заинтересованы в получении информации о качестве молока.

Свойства почвы и растительности на лугах Южных Курил приведены в [8, 14, 17, 18].

На Курильских островах коровы свободно пасутся на территории населенных пунктов или в их окрестностях, включая луга, опушки лесов и пляжи Тихого океана или Охотского моря. Смешанные травяные сообщества (СТС) [14] на лугах являются основным кормом для крупного рогатого скота, однако владельцы коров также упоминали карликовый бамбук (*Sasa* sp.) и съедобные морские водоросли (например, *Laminaria* sp.) [19].

Масса пробы молока, взятой для лабораторных анализов, составляла от 0,5 до 1,0 кг на свежий вес (св.в.). Пробы сжигали и затем озоляли при температуре, не превышающей 450 °C. Радиоактивный цезий выделяли из озоленных проб с использованием радиохимического

^{137}Cs [21]. All gamma-ray spectra recorded in 2011–2012 for the milk specimens were evaluated (or re-evaluated) using the final calibration parameters.

In order to quantify the soil-to-milk transfer of caesium radionuclides, their aggregated transfer coefficients, T_{ag} ($\text{m}^2 \text{kg}^{-1}$), were estimated. The T_{ag} value was calculated as the ratio of activity concentration of radionuclide in milk (Bq kg^{-1}) to inventory of radionuclide in soil (Bq m^{-2}) [22, 23]. The activity concentrations of ^{137}Cs and ^{134}Cs in milk were determined directly from results of gamma-spectrometric analyses. The activity concentration of pre-Fukushima ^{137}Cs was calculated as a difference between the total activity concentration of ^{137}Cs and the activity concentration of Fukushima-derived ^{137}Cs . To calculate the activity concentration of Fukushima-derived ^{137}Cs , we applied the $^{134}\text{Cs}/^{137}\text{Cs}$ activities ratio of 1.0 in Fukushima fallout as of 15 March 2011 [14, 16]. The half-life of ^{137}Cs and ^{134}Cs is 30.0 y and 2.06 y, respectively [24]. The mean values of ^{134}Cs inventory in soil on the islands of Kunashir (87 Bq m^{-2}) and Shikotan (124 Bq m^{-2}) [17] were used to calculate T_{ag} values for ^{134}Cs . On Iturup Island, where there was a large difference between the western and eastern sides of the island in the intensity of Fukushima fallout, the mean value of 26 Bq m^{-2} and 100 Bq m^{-2} was taken for the western and eastern side, respectively. To calculate T_{ag} for pre-Fukushima ^{137}Cs , the mean reference inventory value for pre-Fukushima ^{137}Cs of 2590, 2910 and 2860 Bq m^{-2} was used for Kunashir, Shikotan and Iturup, respectively (see Table 7 in [17]).

The radiocaesium (cow's milk)/(pasture grass) concentration ratio, CR, was calculated as the ratio of the mean value of T_{ag} for milk to the mean value of T_{ag} for vegetation. The T_{ag} values for pasture grasses (GFC) were obtained from the paper by Ramzaev et al. [18].

Results are presented as means, medians and standard deviation. The non-parametric Mann-Whitney U-test was used to evaluate differences between the groups on the three sampling occasions. Correlation between activity concentrations of ^{134}Cs and ^{137}Cs in milk was estimated using Spearman's rank order correlation coefficient, R_{sp} . The level of statistical significance was set to $P < 0.05$. All analyses were performed using the Excel for MS Windows and a free on-line calculator accessible at the web-site [25].

Results and discussion

The measured activity concentrations (decay-corrected to the date of sampling) for ^{134}Cs and ^{137}Cs in milk samples from individual farms are listed in Table 1. Additionally, this table contains data for the corresponding levels of inventories of ^{134}Cs and pre-Fukushima ^{137}Cs in soil. Values of contribution of Fukushima ^{137}Cs to total ^{137}Cs , and values of T_{ag} are presented in the last four columns of the table; the summary statistics are given in Table 2.

Cs-134 was determined in 18 of the total 22 samples of milk. The activity concentration of ^{134}Cs in the samples varied from 0.08 Bq kg^{-1} to 2.00 Bq kg^{-1} . Cs-137 was quantified in all 22 samples: range = $0.088\text{--}2.43 \text{ Bq kg}^{-1}$. The activity concentrations of the sum $^{134}\text{Cs}+^{137}\text{Cs}$ (maximum = 4.4 Bq kg^{-1}) were well below the permissible level of 100 Bq kg^{-1} currently adopted for ^{137}Cs in milk in Russia [13]. On average, more than a half of the total ^{137}Cs in milk (mean = 60%, median = 57%, range = 13–95%) was of Fukushima origin. After correction

сурьмяно-йодидного метода [20]. Осадок сурьмяно-йодистого цезия помещали на алюминиевую подложку (диаметр = 1,5 см) и высушивали. Активность радионуклидов ^{134}Cs и ^{137}Cs определяли методом гамма-спектрометрии с использованием детекторов из особо чистого германия [14, 16]. Подложки размещали на расстоянии около 3 мм от торца детектора. Первичная калибровка спектрометров для этой геометрии была проведена в 2011 г. [8, 12]. Окончательная калибровка была выполнена в 2011–2012 гг. с использованием образцовых гамма-источников ^{134}Cs и ^{137}Cs [21]. Все спектры гамма-излучения, зарегистрированные в 2011–2012 гг. для проб молока, были обработаны (или повторно обработаны) с использованием окончательных параметров калибровки.

Для количественной оценки перехода радионуклидов цезия из почвы в молоко мы вычислили их агрегированные коэффициенты переноса (T_{ag} , $\text{м}^2/\text{кг}$). Значение T_{ag} рассчитывается как отношение удельной активности радионуклида в молоке ($\text{Бк}/\text{кг}$) к запасу радионуклида в почве ($\text{Бк}/\text{м}^2$) [22, 23]. Удельную активность фукусимского ^{134}Cs и общую удельную активность ^{137}Cs в молоке определяли непосредственно по результатам гамма-спектрометрического анализа. Удельная активность дофукусимского ^{137}Cs была рассчитана как разница между общей удельной активностью ^{137}Cs и удельной активностью фукусимского ^{137}Cs . Для расчета удельной активности фукусимского ^{137}Cs мы использовали соотношение активностей $^{134}\text{Cs}/^{137}\text{Cs}$ в фукусимских выпадениях, равное 1,0 (по состоянию на 15 марта 2011 г.) [14, 16]. Периоды полураспада ^{137}Cs и ^{134}Cs составляют 30,0 лет и 2,06 года соответственно [24]. Средние значения запаса ^{134}Cs в почве на острове Кунашир ($87 \text{ Бк}/\text{м}^2$) и острове Шикотан ($124 \text{ Бк}/\text{м}^2$) [17] были использованы при расчете T_{ag} для ^{134}Cs . На острове Итуруп, где наблюдалась большая разница между западной и восточной сторонами острова в интенсивности фукусимских выпадений, были взяты средние значения $26 \text{ Бк}/\text{м}^2$ и $100 \text{ Бк}/\text{м}^2$ для западной и восточной сторон острова соответственно. При расчете T_{ag} для дофукусимского ^{137}Cs на островах Кунашир, Шикотан и Итуруп использовали средние референтные значения запасов дофукусимского ^{137}Cs , равные 2590, 2910 и $2860 \text{ Бк}/\text{м}^2$ соответственно (см. таблицу 7 в [17]).

Фактор накопления радиоактивного цезия в паре (молоко)/(смешанные травяные сообщества) был рассчитан как отношение среднего значения T_{ag} для молока к среднему значению T_{ag} для растительности. Значения T_{ag} для луговой растительности (СТС) были взяты из статьи Ramzaev et al. [18].

Результаты представлены в виде средней, медианы и стандартного отклонения. Для проверки различий между группами для трех периодов пробоотбора использовали непараметрический U-тест Манна – Уитни. Корреляцию между активностями ^{134}Cs и ^{137}Cs в молоке оценивали с использованием рангового коэффициента Спирмена, R_{sp} . Уровень статистической значимости был установлен равным $P < 0,05$. Все расчеты были выполнены с использованием Excel для MS Windows и бесплатного он-лайн калькулятора, доступного на сайте [25].

Table 1

Activity concentration of caesium radionuclides in cow's milk (fresh weight), the radionuclides inventory in soil, contribution of Fukushima derived ^{137}Cs to total ^{137}Cs and the soil-to-milk aggregated transfer coefficient (T_{ag}) for Fukushima-derived ^{137}Cs and pre-Fukushima ^{137}Cs in individual samples of milk obtained from private farms on the Kunashir, Iturup and Shikotan islands in 2011 and 2012

[Таблица 1

Удельная активность радионуклидов цезия в коровьем молоке (на свежий вес), запас радионуклидов в почве, вклад фукусимского ^{137}Cs в общую активность ^{137}Cs и агрегированный коэффициент переноса (T_{ag}) почва – молоко для фукусимского ^{137}Cs и дофукусимского ^{137}Cs в отдельных пробах молока, полученных из частных хозяйств на островах Кунашир, Итуруп и Шикотан в 2011 и 2012 гг.]

Sample code* [Код пробы*]	Date [Дата отбора]	Activity concentration in milk (Bq kg^{-1} , f.w.)** [Удельная активность в молоке (Бк/кг, св.в.)]**		Inventory in soil (Bq m^{-2})*** [Запас в почве (Бк/м ²)***]		Contribution of Fukushima ^{137}Cs to total ^{137}Cs (%) [Вклад фукусимского ^{137}Cs в общий ^{137}Cs (%)]		$^{137}\text{Cs } T_{\text{ag}}$ ($\text{m}^2 \text{kg}^{-1}$, $n \times 10^{-3}$)	
		^{134}Cs	^{137}Cs	^{134}Cs	Pre-Fukushima ^{137}Cs [Дофукусимский ^{137}Cs]	Milk [Молоко]	Soil [Почва]	Fukushima [Фукусимский]	Pre-Fukushima [Дофукусимский]
<i>2011, spring [весна 2011 г.]</i>									
Kun-Otr-1	13 May	0.61 (15)	0.76 (11)	82	2660	85	3.3	7.4	0.044
Kun-Yu-1	13 May	1.11 (8.2)	1.28 (6.8)	82	2660	91	3.3	14	0.045
Kun-Gol-1	14 May	0.93 (13)	2.40 (6.3)	82	2660	41	3.3	11	0.55
Kun-Yu-2	14 May	1.05 (17)	1.31 (13)	82	2660	84	3.3	13	0.081
Kun-Gol-2	14 May	1.43 (9.4)	1.77 (8.7)	82	2660	85	3.3	17	0.10
Shi-Mal-1	12 May	1.32 (14)	1.79 (12)	117	3020	78	4.1	11	0.14
Shi-Kra-1	12 May	1.20 (15)	1.33 (12)	117	3020	95	4.1	10	0.023
Shi-Mal-2	13 May	2.00 (8.6)	2.43 (6.9)	117	3020	87	4.1	17	0.11
Shi-Kra-2	13 May	0.93 (12)	1.55 (7.9)	117	3020	63	4.1	7.9	0.20
<i>2011, autumn [осень 2011 г.]</i>									
Kun-Otr-2	28 Sep.	0.20 (15)	0.49 (6.0)	73	2630	48	3.2	2.7	0.10
Kun-Dub-1	28 Sep.	0.41 (16)	0.92 (6.4)	73	2630	53	3.2	5.6	0.17
Kun-Tre-1	28 Sep.	0.16 (21)	0.42 (8.2)	73	2630	46	3.2	2.2	0.089
Kun-Yu-3	03 Oct.	0.17 (15)	0.55 (4.8)	73	2630	37	3.2	2.3	0.14
Shi-Mal-3	01 Oct.	0.082 (19)	0.20 (8.7)	103	2980	49	4.1	0.80	0.036
Shi-Kra-3	01 Oct.	<0.05	0.088 (13)	103	2980	–	4.1	<0.5	–
<i>2012, autumn [осень 2012 г.]</i>									
Kun-Tre-2	24 Sep.	0.06 (37)	0.73 (4.6)	52	2550	13	4.1	1.2	0.26
Kun-Gol-3	28 Sep.	0.17 (6.5)	0.45 (2.6)	52	2550	61	4.1	3.3	0.072
Itu-Gor-1e	19 Sep.	0.13 (19)	0.71 (5.3)	60	2760	30	3.4	2.2	0.19
Itu-Bur-1e	21 Sep.	0.28 (11)	1.31 (3.0)	60	2760	36	3.4	4.7	0.31

Table 1 (continued)
[Окончание таблицы 1]

Sample code* [Код пробы*]	Date [Дата отбора]	Activity concentration in milk (Bq kg ⁻¹ , f.w.)** [Удельная активность в молоке (Бк/кг, св.в.)]**		Inventory in soil (Bq m ⁻²)*** [Запас в почве (Бк/м ²)***]		Contribution of Fukushima ¹³⁷ Cs to total ¹³⁷ Cs (%) [Вклад фукусимского ¹³⁷ Cs в общий ¹³⁷ Cs (%)]		¹³⁷ Cs T _{ag} (m ² kg ⁻¹ , n × 10 ⁻³)	
		¹³⁴ Cs	¹³⁷ Cs	¹³⁴ Cs	Pre-Fukushima ¹³⁷ Cs [Дофукусимский ¹³⁷ Cs]	Milk [Молоко]	Soil [Почва]	Fukushima [Фукусимский]	Pre-Fukushima [Дофукусимский]
Itu-Kur-1w	19 Sep.	<0.08	0.53 (20)	16	2760	–	0.9	<5	–
Itu-Kit-1w	21 Sep.	<0.05	0.49 (5.3)	16	2760	–	0.9	<3	–
Itu-Rib-1w	21 Sep.	<0.05	0.15 (11)	16	2760	–	0.9	<3	–

* – the code “Kun”, “Shi” or “Itu” corresponds to the sample obtained from Kunashir, Shikotan or Iturup, respectively.

** – counting error is given in brackets in percent (%) at one sigma level. The activity concentrations in milk, inventories in soil and T_{ag} values are given on the date of milk sampling.

*** – the inventory values of ¹³⁴Cs are the mean values determined for Kunashir and Shikotan Islands and for the eastern and western sides of Iturup Island [17]; the inventory values of ¹³⁷Cs are the reference values deduced for Kunashir, Shikotan and Iturup Islands [17].

[* – код “Kun”, “Shi” или “Itu” означает, что данная проба была получена с острова Кунашир, Шикотан или Итуруп соответственно.

** – ошибка вычисления площади фотопика указана в скобках в процентах (%) на уровне одной сигмы. Удельная активность в молоке, запасы в почве и значения T_{ag} приведены на дату отбора проб молока.

*** – значения запаса ¹³⁴Cs представляют собой средние величины, определенные для островов Кунашир и Шикотан, а также для восточной и западной сторон острова Итуруп [17]; значения запаса ¹³⁷Cs являются референтными величинами, вычисленными для островов Кунашир, Шикотан и Итуруп [17].]

Table 2

Summary statistics on the contribution of Fukushima derived ¹³⁷Cs to total ¹³⁷Cs in milk and in soil and on the soil-to-milk aggregated transfer coefficient (T_{ag}) for Fukushima-derived ¹³⁷Cs and pre-Fukushima ¹³⁷Cs in milk samples obtained from private farms on the islands of Kunashir, Iturup and Shikotan in 2011 and 2012

[Таблица 2

Сводные статистические данные о вкладе фукусимского ¹³⁷Cs в суммарное содержание ¹³⁷Cs в молоке и в почве и об агрегированном коэффициенте переноса из почвы в молоко (Tag) для фукусимского ¹³⁷Cs и дофукусимского ¹³⁷Cs в пробах молока, полученных из частных хозяйств на островах Кунашир, Итуруп и Шикотан в 2011–2012 гг.]

Parameter [Параметр]	Contribution of Fukushima ¹³⁷ Cs to total ¹³⁷ Cs (%) [Вклад фукусимского ¹³⁷ Cs в общий ¹³⁷ Cs (%)]		¹³⁷ Cs T _{ag} (m ² kg ⁻¹ , n × 10 ⁻³)	
	Milk [Молоко]	Soil [Почва]	Fukushima [Фукусимский]	Pre-Fukushima [Дофукусимский]
<i>2011, spring (n = 9) [весна 2011 г.; (n = 9)]</i>				
Median [Медиана]	85	3.3	11	0.10
Mean [Средняя]	79	3.7	12	0.14
SD [C.o.]	17	0.4	4	0.16
<i>2011, autumn (n = 5) [осень 2011 г.; (n = 5)]</i>				
Median [Медиана]	47	3.2	2.3	0.10
Mean [Средняя]	45	3.4	2.3	0.11
SD [C.o.]	7	0.4	1.9	0.05
<i>2012, autumn (n = 4) [осень 2012 г.; (n = 4)]</i>				
Median [Медиана]	33	3.8	2.7	0.23
Mean [Средняя]	35	3.8	2.8	0.21
SD [C.o.]	21	0.4	1.6	0.10

n – number of samples with quantified activity of ¹³⁴Cs.

SD – standard deviation.

[n – число проб молока, в которых было количественно определено содержание ¹³⁴Cs.

C.o. – стандартное отклонение.]

for radioactive decay (as of 15 March 2011), the activity concentrations of ^{137}Cs and ^{134}Cs in samples were positively and significantly correlated with each other ($R_{\text{Sp}} = 0.85$, $P < 0.01$; $n = 18$), also indicating a substantial input of Fukushima derived ^{137}Cs to total ^{137}Cs in the milk.

In addition, the relationship between ^{134}Cs and ^{137}Cs can be presented in the graphical format using a regression analysis (Fig. 1). The scatterplot and the value of coefficient of determination (0.745) indicate a close positive association between two radionuclides in milk samples from Sakhalin Region in 2011–2012. The slope of the regression line of 0.98 ± 0.14 (a 95% confidence interval of 0.67–1.28) corresponds to the $^{137}\text{Cs}/^{134}\text{Cs}$ activities ratio values of approximately 1.0 reported for Fukushima fallout by other authors for Japan (e.g., [7, 26]) and Sakhalin Region [15]. The intercept of 0.41 ± 0.13 Bq kg^{-1} can be interpreted as the background (pre-Fukushima) ^{137}Cs activity concentration associated with global and Chernobyl fallout.

The highest activity concentrations and values of T_{ag} for ^{134}Cs (and Fukushima-derived ^{137}Cs) were observed in samples obtained in mid-May 2011 (Table 1). The mean (median) T_{ag} values decreased in the May–October period in 2011 from $12 (11) \times 10^{-3} \text{ m}^2 \text{ kg}^{-1}$ to $2.3 (2.3) \times 10^{-3} \text{ m}^2 \text{ kg}^{-1}$. The difference between two sampling occasions was statistically significant (the Mann-Whitney test, $P < 0.01$; $n_1 = 9$, $n_2 = 5$). In September 2012, the T_{ag} values remained unchanged (mean = $2.8 \times 10^{-3} \text{ m}^2 \text{ kg}^{-1}$, median = $2.7 \times 10^{-3} \text{ m}^2 \text{ kg}^{-1}$) compared to those in September–October 2011 (the Mann-Whitney test, $P > 0.05$; $n_1 = 5$, $n_2 = 4$).

Although activity concentration of radiocaesium in cow's milk and the corresponding parameters of radiocaesium transfer from the environment to cow's milk typically decline over time [27–30], the stabilization of the T_{ag} values noted in our observations is not the only exception. For example, Mück and Gerzabek [27] identified a group of areas in Austria in

Результаты и обсуждение

Значения удельной активности (на дату отбора проб) ^{134}Cs и ^{137}Cs в пробах молока из отдельных хозяйств приведены в таблице 1. В этой же таблице представлены данные для соответствующих запасов ^{134}Cs и дофукусимского ^{137}Cs в почве. Значения вклада фукусимского ^{137}Cs в общую активность ^{137}Cs и значения T_{ag} представлены в последних четырех столбцах таблицы; сводная статистика приведена в таблице 2.

Присутствие ^{134}Cs было выявлено в 18 из 22 пробах молока. Удельная активность в отдельных пробах варьировала от 0,08 Бк/кг до 2,00 Бк/кг. Удельная активность ^{137}Cs была количественно определена для всех 22 проб: диапазон = 0,088–2,43 Бк/кг. Удельная активность суммы $^{134}\text{Cs}+^{137}\text{Cs}$ (максимум = 4,4 Бк/кг) была значительно ниже допустимого уровня 100 Бк/кг, который в настоящее время принят в России для содержания ^{137}Cs в молоке [13]. В целом, более половины общей активности ^{137}Cs в пробах молока (среднее значение = 60%, медиана = 57%, разброс = 13–95%) имело фукусимское происхождение. После поправки на радиоактивный распад (по состоянию на 15 марта 2011 г.) активности ^{137}Cs и ^{134}Cs в пробах положительно и значимо коррелировали друг с другом ($R_{\text{Sp}} = 0,85$, $P < 0,01$; $n = 18$), что также указывает на существенный вклад фукусимского ^{137}Cs в общую активность ^{137}Cs в молоке коров.

Кроме того, соотношение между ^{134}Cs и ^{137}Cs может быть продемонстрировано в графическом формате с использованием регрессионного анализа (рис. 1). Диаграмма рассеяния и величина коэффициента детерминации (0,745) свидетельствуют о тесной положительной связи между двумя радионуклидами в пробах молока, отобранных в Сахалинской области в 2011–2012 гг. Наклон линии регрессии $0,98 \pm 0,14$ (95% доверительный интервал = 0,67–1,28) соответствует тем

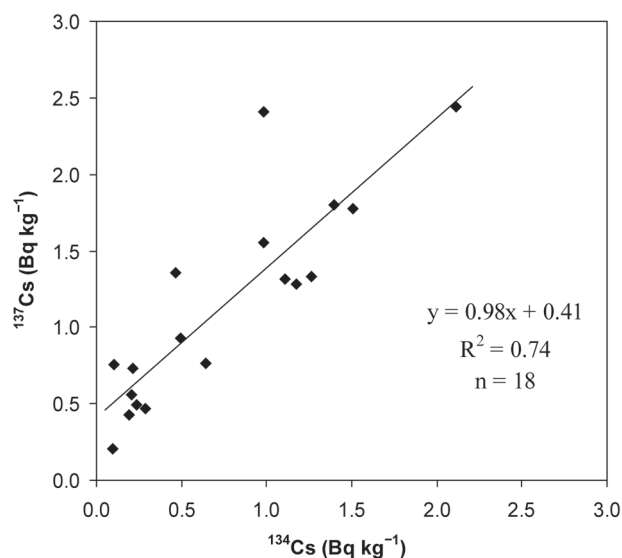


Fig. 1. Relationship between activities of ^{134}Cs and ^{137}Cs in samples of cow's milk obtained on Kuril Islands in 2011 and 2012. The activity concentrations are presented after correction for radioactive decay (as of 15 March 2011)

[**Рис. 1.** Взаимосвязь между активностями ^{134}Cs и ^{137}Cs в пробах коровьего молока, отобранных на Курильских островах в 2011 и 2012 гг. Значения удельной активности показаны после поправки на радиоактивный распад (по состоянию на 15 марта 2011 г.)]

which there was virtually no decrease in activity concentration of ^{137}Cs in cow's milk during the first two years after the Chernobyl accident.

However, our further calculation of T_{ag} values for pre-Fukushima ^{137}Cs confirmed the generic declining time-dependent trend in the radiocaesium transfer from the environment to the milk of cows in Sakhalin Region. The values of T_{ag} for "aged" pre-Fukushima ^{137}Cs were one-two orders of magnitude lower than those for "new" Fukushima-borne radiocaesium (Table 2). The major source (96%) of pre-Fukushima ^{137}Cs in Sakhalin Region is global fallout due to nuclear weapons tests in the atmosphere [14]. The fallout peaked in the middle of the 1960s [31], and approximately 45 years had passed before the new contamination occurred due to the Fukushima accident. In Fig. 2, we have plotted all deduced T_{ag} values (for Fukushima-borne and pre-Fukushima ^{137}Cs) versus time since radiocaesium deposition. Roughly, two time periods can be distinguished. During the first 2–6 month period, the T_{ag} value decreases fast with a half-time of about 55 days (0.15 y). A much slower decline of the T_{ag} with a half-time of approximately 10 y is observed in a later period. A two-period dynamic model, which included the fast and slow components, was reported by Kaduka and Shutov [32] in respect of T_{ag} values for radiocaesium in cow's milk in the European part of Russia after the Chernobyl accident. The ecological half-times of Chernobyl-derived ^{137}Cs in cow's milk were in the range of 1–2 y in the first several years after deposition, increasing up to 10–20 y in late period after the accident. It should be noted that the depuration rates were estimated for those periods when plants contamination via root uptake prevailed. In the earliest phase after the Chernobyl accident (in May–June 1986), when plants contamination was associated mainly with the aerial pathway, the ^{137}Cs concentration in milk decreased faster with a half-time of 10–30 days [32].

значениям отношения активностей $^{137}\text{Cs}/^{134}\text{Cs}$ (примерно 1,0), которые приводят другие авторы в отношении фукусимских выпадений для Японии (например, [7, 26]) и Сахалинской области [15]. Величину свободного члена ($0,41 \pm 0,13$ Бк/кг) можно интерпретировать как фоновое (дофукусимское) значение удельной активности ^{137}Cs , связанного с глобальными и чернобыльскими выпадениями.

Самые высокие значения удельной активности и T_{ag} для ^{134}Cs (и фукусимского ^{137}Cs) были зарегистрированы в пробах молока, отобранных в середине мая 2011 г. (см. табл. 1). Средние (медианные) значения T_{ag} уменьшились в период с мая по октябрь 2011 г. с $12 (11) \times 10^{-3} \text{ м}^2/\text{кг}$ до $2,3 (2,3) \times 10^{-3} \text{ м}^2/\text{кг}$. Разница между двумя периодами пробоотбора была статистически значимой (тест Манна – Уитни, $P < 0,01$; $n_1 = 9$, $n_2 = 5$). В сентябре 2012 г. значения T_{ag} остались неизменными (среднее значение = $2,8 \times 10^{-3} \text{ м}^2/\text{кг}$, медиана = $2,7 \times 10^{-3} \text{ м}^2/\text{кг}$) по сравнению с таковыми в сентябре – октябре 2011 г. (тест Манна – Уитни, $P > 0,05$; $n_1 = 5$, $n_2 = 4$).

Хотя содержание радиоцезия в молоке и соответствующие параметры переноса радиоцезия из окружающей среды в коровье молоко обычно снижаются со временем [27–30], стабилизация значений T_{ag} , отмеченная в наших наблюдениях, не является единственным исключением. Например, Mück и Gerzabek [27] выделили группу областей в Австрии, в которых практически не было снижения содержания ^{137}Cs в коровьем молоке в течение первых двух лет после Чернобыльской аварии.

Однако наш дальнейший расчет значений T_{ag} для дофукусимского ^{137}Cs подтвердил общую тенденцию к снижению зависящей от времени интенсивности переноса радиоцезия из окружающей среды в молоко коров в Сахалинской области. Значения T_{ag} для «старого» дофукусимского ^{137}Cs были на 1–2 порядка ниже, чем

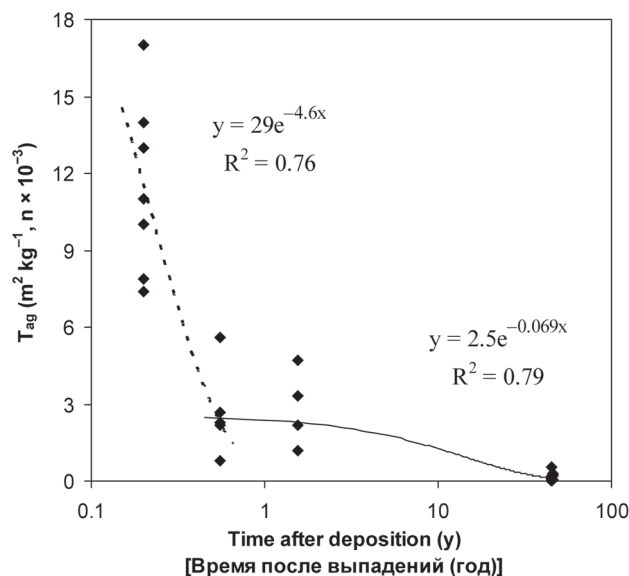


Fig. 2. Scatter-plot of T_{ag} values for ^{137}Cs in cow's milk versus time since the moment of ^{137}Cs deposition on Kuril Islands. Exponential curves are fitted to the early period data (a dashed line) and the late period data (a solid line). The first three clusters of data points (0.2 y, 0.55 y and 1.55 y) are Fukushima-derived radiocaesium and the last cluster (45 y) is pre-Fukushima (global) radiocaesium

[Рис. 2. Диаграмма рассеяния значений T_{ag} для ^{137}Cs в коровьем молоке в зависимости от времени, прошедшего с момента выпадения ^{137}Cs на Курильских островах. Экспоненциальные кривые привязаны к точкам раннего периода (пунктирная линия) и точкам позднего периода (сплошная линия). Первые три кластера точек данных (0,2 года, 0,55 года и 1,55 года) представляют собой фукусимский ^{137}Cs , а последний кластер (45 лет) – дофукусимский (глобальный) ^{137}Cs]

The range of T_{ag} for “new” radiocaesium in Sakhalin Region in May 2011 ($7.3\text{--}17 \times 10^{-3} \text{ m}^2 \text{ kg}^{-1}$) is in good agreement with the data reported in other studies for early period after deposition of radiocaesium in certain Arctic areas (including the north-west of the Russian Federation) before the Fukushima accident: $2.8\text{--}20 \times 10^{-3} \text{ m}^2 \text{ kg}^{-1}$ [22, 33]. The T_{ag} values obtained for “aged” pre-Fukushima ^{137}Cs in our study (range = $0.023\text{--}0.55 \times 10^{-3} \text{ m}^2 \text{ kg}^{-1}$) are as well in good agreement with the ones derived by other authors for selected sites in Russian Arctic (range = $0.062\text{--}0.24 \times 10^{-3} \text{ m}^2 \text{ kg}^{-1}$ [22]) and in Iceland (range = $0.04\text{--}1.4 \times 10^{-3} \text{ m}^2 \text{ kg}^{-1}$ [33]) in late period after the peak intensity of the ^{137}Cs global fallout due to atmospheric nuclear weapons tests.

The higher transfer of Fukushima-derived ^{137}Cs (compared to pre-Fukushima ^{137}Cs) to cow’s milk reflects the difference between “new” and “aged” radiocaesium in the intensity of the radionuclide transfer from soil to grassland plants which are the major component of the cow’s diet in the region of our study. Ramzaev et al. [18] determined that in GFC from grasslands in Sakhalin Region, T_{ag} values for pre-Fukushima ^{137}Cs were one–two orders of magnitude lower compared to those for Fukushima-derived radiocaesium. Using data from the study [18] we have calculated mean values of the ^{137}Cs T_{ag} for GFC on Kunashir, Shikotan and Iturup Islands. Such calculation was possible for two sampling occasions: in the autumns of 2011 and 2012. Unfortunately, a representative collection of plant samples in May 2011 was not performed. Results of the calculation for grass are provided in Table 3 together with the corresponding results for milk. In the autumns of 2011 and 2012, the T_{ag} values for Fukushima-derived radiocaesium in milk were on average 17 times larger than the ones for pre-Fukushima ^{137}Cs . A comparable difference (a factor of 14) between “new” and “aged” ^{137}Cs in the values of T_{ag} was observed for grass. The higher T_{ag} for Fukushima-derived ^{137}Cs compared to pre-Fukushima ^{137}Cs indicates that “fresh” ^{137}Cs is preferentially transferred to the cow’s body and milk from the environment. This is further confirmed by a strong difference between soil and milk in the contribution of Fukushima-derived ^{137}Cs to total ^{137}Cs (Tables 1 and 2).

It should be additionally noted that there is a major difference between the vertical distributions of Fukushima derived ^{137}Cs and pre-Fukushima ^{137}Cs in grassland soils in Sakhalin Region [17]. The mean contribution of the Fukushima NPP accident to total inventory of ^{137}Cs in the top 0–1 cm layer of soil is estimated as 35%, which exceeds the average contribution of ~3–4% in the whole 20-cm soil profile by the factor of 10 [17]. The enrichment of the top-most layer of soil with “new” radiocaesium promotes a higher intake of the radionuclide into the body of a cow not only with green fodder but with the soil itself. Note that, although the radiocaesium intake via soil adhered to vegetation can be significant, the gastro-intestinal absorption of the soil-associated radionuclide is usually substantially lower than that incorporated into plants [22].

We have calculated the transfer factor (concentration ratio, CR) from GFC to cow’s milk for radiocaesium based on the mean normalized (to the deposition density) activity concentrations of radiocaesium in the milk and in the grass (Bq kg^{-1} per Bq m^{-2}), i.e., the T_{ag} values; results are provided in Table 3. The values of CR for fresh weight of plants and milk are given in column 4 of the table, while column 5 contains

значения для «свежего» фукусимского радиоцезия (см. табл. 2). Основным источником (96%) дофукусимского ^{137}Cs в Сахалинской области являются глобальные выпадения после испытаний ядерного оружия в атмосфере [14]. Эти события достигли пика в середине 1960-х гг. [31], и прошло примерно 45 лет до того момента, когда произошли новые выпадения после аварии на АЭС «Фукусима-1». На рисунке 2 представлены все вычисленные значения T_{ag} (для фукусимского и дофукусимского ^{137}Cs) в зависимости от времени, прошедшего с момента выпадения радиоцезия. Можно выделить два периода изменений значений T_{ag} с течением времени после выпадений. В течение первых 2–6 месяцев (начальный период) значение T_{ag} быстро снижается со скоростью полууменьшения около 55 дней (0,15 года). В дальнейшем (отдаленный период) наблюдается гораздо более медленное снижение T_{ag} с периодом полууменьшения около 10 лет. Двухкомпонентная динамика, которая включала быстрый и медленный периоды, была представлена М.В. Кадука и В.Н. Шутовым [32] в отношении значений T_{ag} для радиоцезия в коровьем молоке в европейской части России после аварии на Чернобыльской АЭС. Значения экологического периода полууменьшения активности чернобыльского ^{137}Cs в коровьем молоке в первые несколько лет после выпадений находились в пределах 1–2 лет. В дальнейшем значение данного периода полууменьшения стало составлять 10–20 лет. Следует отметить, что скорость очищения была оценена в те периоды, когда преобладало загрязнение растений в результате корневого поглощения. На самой ранней стадии после Чернобыльской аварии (в мае – июне 1986 г.), когда загрязнение растений происходило главным образом воздушным путем, концентрация ^{137}Cs в молоке снижалась быстрее с периодом полууменьшения 10–30 дней [32].

Диапазон значений T_{ag} для «нового» радиоцезия в Сахалинской области в мае 2011 г. ($7,3\text{--}17 \times 10^{-3} \text{ м}^2/\text{кг}$) находится в хорошем согласии с данными, полученными до аварии на АЭС «Фукусима-1» в других исследованиях для раннего периода после выпадений радиоцезия в некоторых районах Арктики (включая северо-запад Российской Федерации): $2,8\text{--}20 \times 10^{-3} \text{ м}^2/\text{кг}$ [22, 33]. Значения T_{ag} , вычисленные для «старого» дофукусимского ^{137}Cs в нашем исследовании (диапазон $0,023\text{--}0,55 \times 10^{-3} \text{ м}^2/\text{кг}$), также хорошо соответствуют значениям, полученным другими авторами для отдельных районов в российской Арктике (диапазон $0,062\text{--}0,24 \times 10^{-3} \text{ м}^2/\text{кг}$ [22]) и в Исландии (диапазон $0,04\text{--}1,4 \times 10^{-3} \text{ м}^2/\text{кг}$ [33]) в отдаленный период после пика интенсивности глобальных выпадений ^{137}Cs в связи с испытаниями ядерного оружия в атмосфере.

Более высокие значения T_{ag} для фукусимского ^{137}Cs (по сравнению с T_{ag} для дофукусимского ^{137}Cs) в молоке отражают разницу между «новым» и «старым» радиоцезием в интенсивности перехода радионуклидов из почвы в луговые растения, которые являются основным компонентом корма коров в Сахалинской области. Ramzaev et al. [18] определили, что в СТС на лугах Сахалинской области значения T_{ag} дофукусимского ^{137}Cs были на два порядка ниже по сравнению со значениями T_{ag} фукусимского ^{137}Cs . Используя данные из работы [18], мы вычислили средние значения T_{ag} ^{137}Cs для СТС на островах Кунашир, Шикотан и Итуруп.

results of the calculation for fresh weight of milk and dry weight of plants. Wet matter was converted to dry matter assuming a water content of 75% in fresh grasses [22]. For fresh weight of plants, the CR values varied from 0.11 to 0.43. The expected scatter of CR values for individual cows and sampling occasions can be considerably wider due to the high coefficients of variation (up to 170%) for the T_{ag} values both in milk and in vegetation (Table 3). The averaged CR values correspond to a mean value of 0.30 that can be deduced using the normalized activity concentrations of ^{137}Cs in grasses (f.w.) and in cow's milk (f.w.) registered on Russian territory in the 1960s due to global fallout from atmospheric nuclear weapons tests [9]. The range of the CR values derived in our study is comparable with the range of 0.064–0.189 reported for the transfer of ^{137}Cs from pasture grasses (f.w.) to cow's milk (f.w.) in Belarus after the Chernobyl accident

Такой расчет был возможен для двух выборок: осенью 2011 и 2012 гг. К сожалению, репрезентативный сбор растений в мае 2011 г. не проводился. Результаты расчета для СТС приведены в таблице 3 вместе с соответствующими результатами для молока. В молоке значения T_{ag} для фукусимского радиоцезия были осенью 2011 и 2012 гг. в среднем в 17 раз больше, чем те, которые были получены для дофукусимского ^{137}Cs . Сопоставимая разница (14 раз) между значениями T_{ag} для «нового» и «старого» ^{137}Cs наблюдалась и в траве. Более высокие значения T_{ag} для фукусимского ^{137}Cs по сравнению с дофукусимским ^{137}Cs показывают, что «свежий» ^{137}Cs предпочтительно переходит в организм коровы и молоко из окружающей среды. Данный факт подтверждается существенной разницей между вкладами фукусимского ^{137}Cs в общую активность ^{137}Cs в пробах почвы и пробах молока (см. табл. 1 и 2).

Table 3
Values of the aggregated transfer coefficient (T_{ag}) for Fukushima-derived and pre-Fukushima ^{137}Cs in cow's milk and in mixed grass-forb crop, and the ^{137}Cs milk/grass concentration ratio (CR) values for samples collected on the islands of Kunashir, Iturup and Shikotan in 2011 and 2012

[Таблица 3]

Значения агрегированного коэффициента переноса (T_{ag}) для фукусимского ^{137}Cs и дофукусимского ^{137}Cs в коровьем молоке и в смешанных травяных сообществах, а также значения фактора накопления (ФН) ^{137}Cs в паре молоко/трава для проб, отобранных на островах Кунашир, Итуруп и Шикотан в 2011–2012 гг.]

Parameter [Параметр]	$^{137}\text{Cs } T_{ag} \text{ (m}^2 \text{ kg}^{-1}, n \times 10^{-3})$		$^{137}\text{Cs CR [ФН]}$	
	Milk, f.w. [Молоко, св.в.]	Grass, f.w.* [Трава, св.в.*]	f.w.** [св.в.**]	d.w.*** [сух.в.***]
<i>2011, autumn; Fukushima-derived ^{137}Cs [осень 2011 г.; фукусимский ^{137}Cs]</i>				
Mean [Средняя]	2.3	20	0.12	0.029
SD [С.о.]	1.9 (83)	26 (130)	–	–
n	5	12	–	–
<i>2011, autumn; pre-Fukushima ^{137}Cs [осень 2011 г.; дофукусимский ^{137}Cs]</i>				
Mean [Средняя]	0.11	1.00	0.11	0.028
SD [С.о.]	0.05 (45)	1.68 (168)	–	–
n	5	12	–	–
<i>2012, autumn; Fukushima-derived ^{137}Cs [осень 2012 г.; фукусимский ^{137}Cs]</i>				
Mean [Средняя]	2.8	6.5	0.43	0.11
SD [С.о.]	1.6 (57)	3.9 (60)	–	–
n	4	8	–	–
<i>2012, autumn; pre-Fukushima ^{137}Cs [осень 2012 г.; дофукусимский ^{137}Cs]</i>				
Mean [Средняя]	0.21	0.90	0.23	0.058
SD [С.о.]	0.10 (48)	0.95 (106)	–	–
n	4	8	–	–

SD – standard deviation.

n – number of samples with quantified activity of ^{134}Cs . Values of coefficient of variation (percent) are given in brackets.

* – the $^{137}\text{Cs } T_{ag}$ values in the grass-forb crop have been calculated based on results of measurements and estimations presented in [14, 17, 18].

** – for fresh weight of the milk and grass samples.

*** – for fresh weight (f.w.) of the milk samples and dry weight (d.w.) of the grass samples; the dry weight conversion has been performed assuming 25% dry matter in grass [22].

[С.о. – стандартное отклонение. Значения коэффициента вариации (в процентах) приведены в скобках.

n – число проб молока, в которых было количественно определено содержание ^{134}Cs .

* – значения T_{ag} ^{137}Cs в траве были рассчитаны на основе результатов измерений и оценок, представленных в [14, 17, 18].

** – на свежий вес (св.в.) проб молока и травы.

*** – на свежий вес (св.в.) проб молока и сухой вес (сух.в.) проб травы; пересчет на сухой вес был выполнен, предполагая 25-процентное содержание сухого вещества в траве [22].]

[34]. The range of variation of the ^{137}Cs CR for (fresh milk)/(dry grasses) of 0.028–0.11 (Table 3) is within the range of 0.0036–0.9 (arithmetic mean = 0.11; $n = 289$) reported by Howard et al. [35] in the recent review of published values of the CR for cow's milk (fresh weight) and the feedstuff (dry weight) ingested by the animals.

Besides grasses and forbs from grasslands (for description of the plants species in Sakhalin Region, see e.g., [14, 36]), other natural fodder components such as bamboo, marine macro-algae and edible wild fungi can be included in the cow's ration in the southern Kuril. Inclusion of bamboo in the cow's diet can hardly change the radiocaesium content in the milk because the activity concentrations of Fukushima derived ^{137}Cs and pre-Fukushima ^{137}Cs in GFC are comparable with those in bamboo [14, 18]. A partial substitution of pasture grasses by marine macro-algae (e.g., *Laminaria* sp.) would lead to a decrease of the content of Fukushima derived ^{137}Cs and pre-Fukushima ^{137}Cs in the milk due to considerably lower activity concentrations of $^{137}\text{Cs}+^{134}\text{Cs}$ (at maximum of 0.7 Bq kg^{-1} , f.w. [21]) in edible macro-algae compared to GFC (at maximum of 23 Bq kg^{-1} , f.w. [14]). On the opposite, a consumption of wild mushrooms by cows could lead to an increase of radiocaesium content in the milk due to the higher activity concentrations of total radiocaesium in edible fungi (maximum = 110 Bq kg^{-1} , f.w. [8]) than in GFC. After the Chernobyl accident, Karlén et al. [37] reported a slower rate for ^{137}Cs decrease in milk for the farms in Sweden where pastures were located in semi-natural environment, including forest, and cows had access to wild plants and mushrooms. During our surveys of Kuril Islands, we observed that cows had free access to any of the above considered nutritional sources but a comprehensive evaluation of their actual contribution to the cow's ration is beyond the scope of our study.

The calculated values of T_{ag} and ecological half-time for Fukushima-borne radiocaesium in cow's milk in Sakhalin Region allow us to make a rough estimate of the effective dose from ingestion of the milk for adult residents of the southern Kuril in the first year (15 March 2011–14 March 2012) after the accident. The following assumptions have been applied:

- the initial deposition density (as of 15 March 2011) was 100 Bq m^{-2} for ^{137}Cs and 100 Bq m^{-2} for ^{134}Cs , which corresponded to the averaged inventories of the radionuclides in soil on the islands of Kunashir and Shikotan and on the eastern side of Iturup Island [17];

- in the period No. 1 (15 March – 14 May 2011), the T_{ag} value linearly increased from 0 to $12 \times 10^{-3} \text{ m}^2 \text{ kg}^{-1}$;

- in the period No. 2 (15 May – 30 September 2011), the T_{ag} value exponentially decreased with a half-time of 0.15 y (see corresponding equation in Fig. 2);

- in the period No. 3 (01 October 2011 – 14 March 2012), the T_{ag} value exponentially decreased with a half-time of 10 y (see corresponding equation in Fig. 2);

- an annual consumption of locally produced milk for critical group of the population was 200 kg per a person [19].

The daily intake of caesium radionuclide, $I_{\text{Cs}-t}$ (Bq), was calculated using the equation:

$$I_{\text{Cs}-t} = A_0 \times \exp\left(-\frac{0.693 \times t}{T_{1/2}}\right) \times T_{\text{ag}-t} \times m, \quad (1)$$

where A_0 is the initial deposition density of radionuclide (100 Bq m^{-2}); t is time elapsed after deposition (day); $T_{1/2}$ is the half-life of radionuclide (754 d for ^{134}Cs and 10960 d for ^{137}Cs);

Следует дополнительно отметить, что существуют принципиальные различия между вертикальными распределениями фукусимского и дофукусимского ^{137}Cs в почвах на лугах Сахалинской области [17]. В среднем вклад аварии на АЭС «Фукусима-1» в общий запас ^{137}Cs в верхнем слое почвы толщиной 0–1 см оценивался величиной 35%, что в 10 раз превышает средний вклад фукусимского ^{137}Cs (~3–4%) во всем 20-сантиметровом почвенном профиле [17]. Обогащение самого верхнего слоя почвы «новым» радиоцезием способствует поступлению радионуклида в организм коровы не только с зеленым кормом, но и с самой почвой. Отметим, что, хотя поступление радиоцезия с почвой, прилипшей к растительности, может быть значительным, желудочно-кишечная абсорбция связанного с почвой радионуклида обычно значительно ниже, чем того радионуклида, который накопился внутри растения [22].

Мы рассчитали фактор накопления (ФН) радиоцезия для пары (коровье молоко)/(СТС) на основе средних нормированных (к плотности выпадений) концентраций радиоцезия в молоке и в растениях (Бк/кг на Бк/м²), т.е. значений T_{ag} . Результаты расчетов ФН приведены в таблице 3. Значения ФН на свежий вес молока и растений даны в колонке 4 таблицы 3, а в колонке 5 даны результаты расчета на свежий вес молока и сухой вес растений. Свежий вес переводили в сухой вес, предполагая 75% содержание воды в свежей траве [22]. Усредненные значения ФН для сырого веса растений варьировали от 0,11 до 0,43. Ожидаемый разброс значений ФН для отдельных коров и случаев пробоотбора может быть значительно более широким из-за больших коэффициентов вариации (до 170%) значений T_{ag} как для молока, так и для растительности (см. табл. 3). Усредненные значения ФН хорошо согласуются со средним значением 0,30, которое может быть вычислено с использованием нормированных величин удельной активности ^{137}Cs в травах и в коровьем молоке, зарегистрированных на территории России в отношении глобальных выпадений в 1960-х гг. [9]. Размах значений ФН, полученных в нашем исследовании, также сопоставим с диапазоном 0,064–0,189, о котором сообщалось по результатам изучения переноса ^{137}Cs из пастбищных трав в коровье молоко в Беларуси после аварии на Чернобыльской АЭС [34]. Диапазон изменений соотношения концентраций ^{137}Cs для пары (свежее молоко)/(сухая трава), равный 0,028–0,11 (см. табл. 3), находится внутри диапазона колебаний 0,0036–0,9 (среднее арифметическое = 0,11, $n = 289$), который приводят Howard et al. [35] в недавнем обзоре опубликованных значений ФН для коровьего молока (на свежий вес) и кормов (на сухой вес), потребляемых животными.

Помимо травяной луговой растительности (перечень некоторых видов растений для лугов Сахалинской области представлен в [14, 36]), другие природные корма, такие как бамбук, морские макроводоросли и съедобные дикорастущие грибы, могут входить в рацион питания коровы на Южных Курильских островах. Включение бамбука в диету коровы вряд ли может изменить содержание радиоцезия в молоке, потому что значения удельной активности фукусимского и дофукусимского ^{137}Cs в СТС сопоставимы с таковыми в бамбуке [14, 18]. Частичная замена пастбищных трав морскими водорослями (например, *Laminaria* sp.) при-

T_{ag-t} is the aggregated transfer coefficient for Fukushima-derived radiocaesium as of the day t ($m^2 \text{ kg}^{-1}$); m is the mass of milk consumed per day (0.55 kg).

The total effective dose, D (Sv), due to the intake of Fukushima-derived ^{137}Cs and ^{134}Cs during the first year after the accident was calculated using the following equation:

$$D = \left(\sum_{t=1}^{t=365} I_{t-Cs137} \right) \times d_{Cs137} + \left(\sum_{t=1}^{t=365} I_{t-Cs134} \right) \times d_{Cs134}, \quad (2)$$

where $I_{t-Cs137}$ is the intake of ^{137}Cs during the day t (Bq); $I_{t-Cs134}$ is the intake of ^{134}Cs during the day t (Bq); d_{Cs137} and d_{Cs134} are the effective dose coefficients per unit intake ($0.019 \mu\text{Sv}$ per Bq for ^{134}Cs and $0.013 \mu\text{Sv}$ per Bq for ^{137}Cs [38]).

The calculated effective dose for adults in the first post-accidental year of 0.0027 mSv is a negligible value compared to the permissible level of 1 mSv per year due to technogenic sources of ionizing radiation [39]. Further, the dose from the Fukushima-derived radiocaesium associated with milk consumption is lower by a factor of about 60 compared to the average worldwide effective internal dose (0.17 mSv per year) from the natural radionuclide ^{40}K [31].

It is interesting to estimate the impact of the environmental contamination by ^{134}Cs and ^{137}Cs on the cow's milk exposure pathway in Kuril Islands in the case of a hypothetical accidental release of the radionuclides into the atmosphere in the future. In particular, it is important to predict the minimum level of the initial ^{137}Cs deposition density at which the radiocaesium ($^{134}\text{Cs}+^{137}\text{Cs}$) content in milk can reach a permissible level of 100 Bq kg^{-1} . The conservative value of T_{ag} of $20 \times 10^{-3} \text{ m}^2 \text{ kg}^{-1}$ has been applied. For the same source term (the $^{134}\text{Cs}/^{137}\text{Cs}$ activities ratio = 1.0) and the same conditions of environmental contamination (the end of winter – early spring) as those were in the case of the Fukushima accident, the critical value of soil contamination by ^{137}Cs in the initial period is estimated as 2.5 kBq m^{-2} . For the Chernobyl-similar isotopic ratio (the $^{134}\text{Cs}/^{137}\text{Cs}$ activities ratio = 0.5), the critical value is 3.3 kBq m^{-2} . Even when ^{137}Cs is the only caesium radionuclide in fallout, the estimated critical value of 5.0 kBq m^{-2} will be far below the threshold value of the criterion of referring the territory to the radioactive contamination zone (37 kBq m^{-2}) which is present in the Russian legislation after the Chernobyl accident [40]. These estimates indicate that the cow's milk production on Kuril Islands is vulnerable to radiocaesium contamination of terrestrial ecosystems. The radiological monitoring of fresh milk and milk products must be prioritized in the initial stage of a large-scale radiation accident.

Conclusions

The Fukushima accident had a negligible impact on radiocaesium contamination of cow's milk in the southern Kuril Islands: Shikotan, Kunashir and Iturup. In 2011–2012, the total activity concentrations of $^{134}\text{Cs}+^{137}\text{Cs}$ in milk were well below the permissible level of 100 Bq kg^{-1} .

In the autumns of 2011 and 2012, the calculated values of the soil-to-milk aggregated transfer coefficient, T_{ag} , for Fukushima-derived radiocaesium were on average 17 times higher than the ones for pre-Fukushima ^{137}Cs . The higher transfer of Fukushima-derived ^{137}Cs (compared to pre-Fukushima ^{137}Cs) to milk reflected the difference between

вела бы к уменьшению содержания радиоцезия в молоке, поскольку суммарная удельная активность $^{137}\text{Cs}+^{134}\text{Cs}$ (максимум $0,7 \text{ Бк/кг}$ на св.в. [21]) в съедобных макрорастениях была значительно ниже, чем в СТС (максимум 23 Бк/кг на св.в. [14]). Напротив, потребление грибов коровами могло бы привести к увеличению радиоактивного загрязнения молока из-за более высокой удельной активности радиоцезия в съедобных грибах (максимум = 110 Бк/кг на св.в. [8]), чем в СТС. После аварии на Чернобыльской АЭС Karlén et al. [37] сообщали о замедлении скорости снижения содержания ^{137}Cs в молоке на тех фермах в Швеции, где пастбища располагались в полуестественной среде обитания, включая лес, и у коров был доступ к дикорастущим растениям и грибам. Во время проведения наших обследований на Курильских островах мы отметили, что у коров имелся свободный доступ к любому из вышеперечисленных источников питания, но всесторонняя оценка их фактического вклада в рацион коровы выходит за рамки данного исследования.

Вычисленные значения T_{ag} и экологических периодов полуочищения для фукусимского радиоцезия в коровьем молоке в Сахалинской области позволяют нам сделать грубую оценку эффективной дозы для взрослых жителей Южных Курил от потребления молока в первый год после аварии (15 марта 2011 г. – 14 марта 2012 г.). Были использованы следующие допущения:

- начальная плотность загрязнения почвы (по состоянию на 15 марта 2011 г.) составляла 100 Бк/м^2 для ^{137}Cs и 100 Бк/м^2 для ^{134}Cs , что соответствовало усредненным запасам радионуклидов в почве на островах Кунашир и Шикотан и на восточной стороне острова Итуруп [17];
- в период № 1 (15 марта – 14 мая 2011 г.) значение T_{ag} линейно увеличивалось с 0 до $12 \times 10^{-3} \text{ м}^2/\text{кг}$;
- в период № 2 (15 мая – 30 сентября 2011 г.) значение T_{ag} экспоненциально снижалось с периодом полу-уменьшения 0,15 года (см. соответствующее уравнение на рис. 2);
- в период № 3 (01 октября 2011 г. – 14 марта 2012 г.) значение T_{ag} экспоненциально снижалось с периодом полууменьшения 10 лет (см. соответствующее уравнение на рис. 2);
- потребление местного молока представителями критической группы населения в течение года равнялось 200 кг на человека [19].

Ежедневное поступление радионуклида цезия, I_{Cs-t} (Бк) рассчитывали с использованием уравнения:

$$I_{Cs-t} = A_0 \times \exp\left(-\frac{0.693 \times t}{T_{1/2}}\right) \times T_{ag-t} \times m, \quad (1)$$

где A_0 – начальная плотность выпадений радионуклида (100 Бк/м^2); t – время, прошедшее после выпадений (день); $T_{1/2}$ – период полураспада радионуклида (754 дня для ^{134}Cs и 10960 дней для ^{137}Cs); T_{ag-t} – агрегированный коэффициент переноса для фукусимского радиоцезия на день t ($\text{м}^2/\text{кг}$); m – масса молока, потребляемого в день ($0,55 \text{ кг}$).

Общая эффективная доза, D (Зв), обусловленная поступлением фукусимских ^{137}Cs и ^{134}Cs в течение первого года после аварии, была рассчитана с использованием следующего уравнения:

“new” and “aged” radiocaesium in the intensity of the radionuclides transfer from soil to grassland plants which were the major component of the cow’s diet in the region of our study.

The values of the soil-to-milk T_{ag} and the (cow’s milk)/(meadow vegetation) concentration ratio for Fukushima and pre-Fukushima radiocaesium in Sakhalin Region were generally comparable with those obtained earlier by other authors for global and Chernobyl fallout of radiocaesium in other regions of the world.

The effective dose from intake of radiocaesium with locally produced cow’s milk for critical group of adults on the southern Kuril Islands in the first year after the accident was estimated as 0.0027 mSv. It was lower by a factor of 60 compared to the representative worldwide average of annual effective internal dose (0.17 mSv) from the natural radionuclide ^{40}K .

For the southern Kuril Islands, the minimum level of the initial ^{137}Cs area deposition density, at which the radiocaesium content in milk might exceed the permissible level of 100 Bq kg⁻¹, is estimated as 5 kBq m⁻². The study indicates that the cow milk production on Kuril Islands is very vulnerable to radiocaesium contamination of terrestrial ecosystems.

Acknowledgments

The authors want to thank the farmers participated in the study. The authors are also grateful to T.V. Romanova, L.Yu. Tkalenko, G.N. Romadanova and M.V. Puzanov (Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Well-being on Sakhalin Region) for help with collection of milk samples. The authors especially want to thank the staff at the FHO “Center of Hygiene and Epidemiology in Sakhalin Region” for help with the samples pre-treatment.

$$D = \left(\sum_{t=1}^{t=365} I_{t-Cs137} \right) \times d_{Cs137} + \left(\sum_{t=1}^{t=365} I_{t-Cs134} \right) \times d_{Cs134} , \quad (2)$$

где $I_{t-Cs137}$ – поступление ^{137}Cs в течение дня t (Бк); $I_{t-Cs134}$ – поступление ^{134}Cs в течение дня t (Бк); d_{Cs137} и d_{Cs134} – дозовые коэффициенты на единицу поступления ($0,019$ мкЗв на 1 Бк для ^{134}Cs и $0,013$ мкЗв на 1 Бк для ^{137}Cs [38]).

Вычисленная величина ($0,0027$ мЗв) эффективной дозы для взрослых в первый послеаварийный год является незначительной по сравнению с допустимым уровнем облучения (1 мЗв) в условиях нормальной эксплуатации техногенных источников ионизирующего излучения [39]. Кроме того, величина дозы облучения от фукусимского радиоцезия, поступившего при потреблении коровьего молока, примерно в 60 раз ниже, чем репрезентативное среднемировое значение эффективной дозы внутреннего облучения ($0,17$ мЗв в год) от естественного радионуклида ^{40}K [31].

Интересно оценить воздействие загрязнения окружающей среды ^{134}Cs и ^{137}Cs на молочную цепочку на Курильских островах в случае гипотетического аварийного выброса радионуклидов в атмосферу в будущем. В частности, практически важно предсказать то минимальное значение начальной плотности выпадений ^{137}Cs , при котором радиоактивное загрязнение ($^{134}\text{Cs}+^{137}\text{Cs}$) молока может достигать допустимого уровня 100 Бк/кг. В расчете мы использовали консервативное значение T_{ag} , равное 20×10^{-3} м²/кг. Для того же исходного соотношения активностей $^{134}\text{Cs} / ^{137}\text{Cs} = 1,0$, а также для тех же условий загрязнения окружающей среды (конец зимы – начало весны), как это было в случае аварии на АЭС «Фукусима-1», критическое значение загрязнения почвы ^{137}Cs в начальный период аварии оценивается величиной 2,5 кБк/м². Для черновильского соотношения активностей $^{134}\text{Cs} / ^{137}\text{Cs} = 0,5$, критическое значение будет равно 3,3 кБк/м². Даже в том случае, когда ^{137}Cs является единственным радиоизотопом цезия в выпадениях, оценка критической величины, равная 5,0 кБк/м², будет намного ниже порогового значения критерия отнесения территории к зоне радиоактивного загрязнения (37 кБк/м²), который присутствует в российском законодательстве после аварии на Чернобыльской АЭС [40]. Эти оценки показывают, что производство коровьего молока на Курильских островах уязвимо для радиоактивного загрязнения наземных экосистем, и радиационно-гигиенический мониторинг свежего молока и молочных продуктов должен быть приоритетным на начальной стадии широкомасштабной радиационной аварии.

Заключение

Авария на АЭС «Фукусима-1» оказала пренебрежимо малое влияние на радиоактивное загрязнение коровьего молока на Южных Курильских островах Шикотан, Кунашир и Итуруп. В 2011–2012 г. общая удельная активность радионуклидов ^{137}Cs и ^{134}Cs в молоке была значительно ниже допустимого уровня 100 Бк/кг.

Расчетные значения агрегированного коэффициента переноса (T_{ag}) из почвы в молоко для фукусимского ^{137}Cs

были осенью 2011 и 2012 гг. в среднем в 17 раз больше, чем таковые для дофукусимского ^{137}Cs . Более высокий коэффициент переноса фукусимского ^{137}Cs (по сравнению с дофукусимским ^{137}Cs) из окружающей среды в коровье молоко отражает разницу между «новым» и «старым» радиоцезием в отношении интенсивности переноса радионуклидов из почвы в луговые растения, которые являются основным компонентом рациона коров в обследованном регионе.

Значения агрегированного коэффициента переноса (T_{ag}) в паре «почва–молоко» и фактора накопления (ФН) в паре «молоко – луговая растительность» для фукусимского и дофукусимского радиоцезия в Сахалинской области в целом соответствуют значениям, полученным ранее другими авторами в отношении чернобыльских и глобальных выпадений радиоцезия в других регионах мира.

Эффективная доза внутреннего облучения от поступления радиоцезия с местным молоком для критической группы взрослых жителей Южных Курил в первый год после аварии оценивается величиной 0,0027 мЗв. Это примерно в 60 раз ниже, чем среднемировая эффективная доза внутреннего облучения взрослого человека (0,17 мЗв в год) от естественного радионуклида ^{40}K .

Для Южных Курильских островов минимальный уровень начальной плотности выпадений ^{137}Cs , при котором радиоактивное загрязнение молока может превысить допустимый уровень 100 Бк/кг, оценивается величиной 5 Бк/м². Данное исследование показывает, что производство коровьего молока на Курильских островах весьма уязвимо для радиоактивного загрязнения наземных экосистем.

Авторы выражают благодарность фермерам, участвовавшим в исследовании. Авторы также благодарны Т.В. Романовой, Л.Ю. Ткаленко, Г.Н. Ромадановой и М.В. Пузанову (Федеральная служба по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека по Сахалинской области) за помощь в получении проб молока. Особая благодарность сотрудникам ФБУЗ «Центр гигиены и эпидемиологии в Сахалинской области» за помощь в предварительной обработке проб.

References (Литература)

- Steinhauser, G., Brandl, A., Johnson, T.E. Comparison of the Chernobyl and Fukushima nuclear accidents: A review of the environmental impacts. *Sci. Tot. Environ.*, 2014, Vol. 470–471, pp. 800–817.
- UNSCEAR – United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. UNSCEAR 2013 Report. Annex A: Levels and Effects of Radiation Exposure Due to the Nuclear Accident after the 2011 Great East-Japan Earthquake and Tsunami. – United Nations, New York, 2014.
- IAEA – International Atomic Energy Agency. The Fukushima Daiichi Accident. Technical Volume 4/5. Radiological Consequences. – IAEA, Vienna, 2015.
- Bulgakov, V.G., Vakulovsky, S.M., Kim, V.M., Polyanskaya, O.N., Uvarov, A.D., Yakhryushin, 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).

- Onischenko, G.G., Romanovich, I.K., Barkovsky, A.N., Bruk, G.Ya., Gorsky, A.A., Stepanov, V.S. Radiation situation in the Far Eastern regions of the Russian Federation on the basis of spring and summer surveys in 2011. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*, 2011, Vol. 4, No. 3, pp. 7–13. Russian (Онищенко, Г.Г., Романович, И.К., Барковский, А.Н., Брук, Г.Я., Горский, А.А., Степанов, В.С. Радиационная обстановка в Дальневосточных субъектах Российской Федерации после аварии на АЭС «Фукусима-1» по данным весенне-летних обследований 2011 года. *Радиационная гигиена*, 2011, Том 4, № 3, С. 7–13).
- Ramzaev, V., Nikitin, A., Sevastyanov, A., Artemiev, G., Bruk, G., Ivanov, S. Shipboard determination of radiocesium in seawater after the Fukushima accident: results from the 2011–2012 Russian expeditions to the Sea of Japan and western North Pacific Ocean. *J. Environ. Radioact.*, 2014, Vol. 135, pp. 13–24.
- Onischenko, G.G., Romanovich, I.K., Barkovsky, A.N., Bruk, G.Ya., Gorsky, A.A., Kaduka, M.V., Konstantinov, Yu.O., Mishin, A.S., Ramzaev, V.P., Repin, V.S., Shutov, V.N., Gromov, A.V., Goncharova, Yu.N., Yakovlev, V.A. Accident at «Fukushima-1» NPP: first results of emergency response. Report 2: activities of the Rospotrebnadzor authorities for the radiation protection of the Russian Federation population on the early stage of accident. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*, 2011, Vol. 4, No. 2, pp. 13–22. Russian (Онищенко, Г.Г., Романович, И.К., Барковский, А.Н., Брук, Г.Я., Голиков, В.Ю., Горский, А.А., Кадука, М.В., Константинов, Ю.О., Мишин, А.С., Рамзаев, В.П., Репин, В.С., Шутов, В.Н., Громов, А.В., Гончарова, Ю.Н., Яковлев, В.А. Авария на АЭС «Фукусима-1»: первые итоги аварийного реагирования. Сообщение 2: действия органов Роспотребнадзора по радиационной защите населения Российской Федерации на ранней стадии аварии. *Радиационная гигиена*, 2011, Том 4, № 2, С. 13–22).
- Romanovich, I.K., Balonov, M.I., Barkovsky, A.N., Nikitin, A.I. The Accident at the «Fukushima-1» NPP: Prophylactic Countermeasures for Health Safety of the Population of the Russian Federation / Ed.: Acad. RAMS G.G. Onishchenko. – RIRH after Professor P.V. Ramzaev, St.-Petersburg, 2012. Russian (Романович, И.К., Балонов, М.И., Барковский, А.Н., Никитин, А.И. Авария на АЭС «Фукусима-1»: Организация профилактических мероприятий, направленных на сохранение здоровья населения Российской Федерации / под ред. акад. РАМН Г.Г. Онищенко. – НИИРГ им. проф. П.В. Рамзаева, Санкт-Петербург, 2012).
- Ramzaev, P.V., Nevstruyeva, M.A., Ilyin, L.A., Prokofyev, O.N., Popov, D.K., Shvydko, N.S., Shapiro, E.L., Perova, A.A., Shamov, V.P. Studies of global fallout on Russian territory. *Atomnaya Energiya*, 1969, Vol. 26, No. 1, pp. 62–64. Russian (Рамзаев, П.В., Невструева, М.А., Ильин, Л.А., Прокофьев, О.Н., Попов, Д.К., Швыдко, Н.С., Шапиро, Е.Л., Перова, А.А., Шамов, В.П. Результаты исследований глобальных выпадений на территории РСФСР. *Атомная энергия*, 1969, Том. 26, № 1, С. 62–64).
- Travnikova, I.G., Bruk, G.Ya., Shutov, V.N., Bazyukin, A.B. Contribution of different foodstuffs to the internal exposure of the rural inhabitants of the Bryansk region in Russia after the Chernobyl accident. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*, 2013, Vol. 6, No. 2, pp. 11–20. Russian (Травникова, И.Г., Брук, Г.Я., Шутов, В.Н., Базюкин, А.В. Пути формирования доз внутреннего облучения сельских жителей Брянской области после аварии на ЧАЭС (Часть первая). *Радиационная гигиена*, 2013, Том 6, № 2, С. 11–20).
- Bratilova, A.A., Bruk, G.Ya. Influence of the consumption of different foodstuffs on the internal exposure dose formation in the adult population of the Russian Federation after the accident

- at the Chernobyl NPP. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*, 2018, Vol. 11, No. 2, pp. 53–59. Russian (Братилова, А.А., Брук, Г.Я. Влияние потребления различных пищевых продуктов на формирование доз внутреннего облучения взрослого населения Российской Федерации после аварии на Чернобыльской АЭС. *Радиационная гигиена*, 2018, Том 11, № 2, С. 53–59).
12. 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. 3, 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).
 13. Hygienic Requirements for the Safety and Nutritional Value of Food: Sanitary Rules and Norms (SanPin 2.3.2.1078-01). – FSUE «InterSEN», Moscow, 2002. Russian (Гигиенические требования безопасности и пищевой ценности пищевых продуктов: Санитарные правила и нормы (СанПин 2.3.2.1078-01). – ФГУП «ИнтерСЭН», Москва, 2002).
 14. 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.
 15. Ramzaev, V., Barkovsky, A., Gromov, A., Ivanov, S., Kaduka, M. Epiphytic fruticose lichens as biomonitors for retrospective evaluation of the $^{134}\text{Cs}/^{137}\text{Cs}$ ratio in Fukushima fallout. *J. Environ. Radioact.*, 2014, Vol. 138, pp. 177–185.
 16. Ramzaev, V.P., Barkovsky, A.N., Gromov, A.V., Ivanov, S.A., Kaduka, M.V. Temporal variations of ^7Be , ^{40}K , ^{134}Cs and ^{137}Cs in epiphytic lichens (genus *Usnea*) at the Sakhalin and Kunashir islands after the Fukushima accident. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*, 2016, Vol. 9, No. 3, pp. 14–27.
 17. 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.
 18. 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.
 19. Kaduka, M.V., Basalaeva, L.N., Bekyasheva, T.A., Ivanov, S.A., Salazkina, N.V., Stupina, V.V., Kaduka, A.N. Peculiarities of Kuril Islands population food ration influencing on the internal dose forming. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*, 2018, Vol. 11, No. 2, pp. 45–52. Russian (Кадука, М.В., Басалаева, Л.Н., Бекяшева, Т.А., Иванов, С.А., Салазкина, Н.В., Ступина, В.В., Кадука, А.Н. Особенности рациона питания населения Курильских островов, влияющие на формирование дозы внутреннего облучения. *Радиационная гигиена*, 2018, Том 11, № 2, С. 45–52).
 20. Methodical Recommendations MR 2.6.1.0094–14. Radiochemical Determination of Caesium-137 and Strontium-90 Activity Concentration in the Samples of Foodstuffs, Soil, other Environmental Objects and Bioassays. – Federal Center of Hygiene and Epidemiology of Rosпотребнадзор, Moscow, 2014. Russian (Методические рекомендации МР 2.6.1.0094-14. Радиохимическое определение удельной активности цезия-137 и стронция-90 в пробах пищевой продукции, почвы, других объектов окружающей среды и биопробах. – Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, Москва, 2014).
 21. Ramzaev, V.P., Ivanov, S.A., Goncharova, Yu.N., Vishnyakova, N.M., Sevastyanov, A.V. A study of radioactive contamination of marine biota after the Fukushima accident. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*, 2012, Vol. 5, No. 4, pp. 5–11. Russian (Рамзаев, В.П., Иванов, С.А., Гончарова, Ю.Н., Вишнякова, Н.М., Севастьянов, А.В. Исследование радиоактивного загрязнения морской биоты в связи с аварией на АЭС «Фукусима-1». *Радиационная гигиена*, 2012, Том 5, № 4, С. 5–11).
 22. IAEA – International Atomic Energy Agency. Quantification of Radionuclide Transfer in Terrestrial and Freshwater Environments for Radiological Assessments. IAEA-TECDOC-1616. – IAEA, Vienna, 2009.
 23. IAEA – International Atomic Energy Agency. Handbook of Parameter Values for the Prediction of Radionuclide Transfer in Terrestrial and Freshwater Environments. Technical Report Series, Report No. 472. – IAEA, Vienna, 2010.
 24. ICRP – International Commission on Radiological Protection. Radionuclide Transformations. Energy and Intensity of Emissions. ICRP Publication 38. – Pergamon Press, Oxford–Frankfurt, 1983.
 25. Center of Modern Psychotechnologies. Codes for the Automatic Calculations. Russian (Центр современных психотехнологий. Скрипты автоматических расчетов). Available on: <http://psytech-center.ru/lib/scriptstat/> (accessed 03.01.2018).
 26. Hirose, K. 2011 Fukushima Dai-ichi nuclear power plant accident: summary of regional radioactive deposition monitoring results. *J. Environ. Radioact.*, 2012, Vol. 111, pp. 13–17.
 27. Mück, K., Gerzabek, M.H. Trends in caesium activity concentrations in milk from agricultural and semi-natural environments after nuclear fallout. *Bodenkultur*, 1995, Vol. 46, No. 4, pp. 337–353.
 28. Shilov, V.P. Experimental studies of ^{137}Cs and ^{90}Sr transfer to cow's milk in an area of radioactive contamination. In: *Issues in Radioecology and the Nearby Disciplines* / Ed.: V.I. Migunov, A.V. Trapeznikov and S.M. Vovk. – GUDP NI: KIET “Technocentr LT”, Ekaterinburg, 2004. – Vol. 5, pp. 3–8. Russian (Шилов, В.П. Экспериментальные исследования закономерностей миграции ^{137}Cs и ^{90}Sr в молоко коров в районе радиоактивного загрязнения. В кн.: Проблемы радиоэкологии и пограничных дисциплин / под ред. В.И. Мигунова, А.В. Трапезникова и С.М. Вовка. – ГУДП НИ: КИЭТ “Техноцентр “ЛТ”, Екатеринбург, 2004. – Вып. 5, С. 3–8).
 29. Pröhl, G., Ehlen, S., Fiedler, I., Kirchner, G., Klemm, E., Zibold, G. Ecological half-lives of ^{90}Sr and ^{137}Cs in terrestrial and aquatic ecosystems. *J. Environ. Radioact.*, 2006, Vol. 91, pp. 41–72.
 30. Corcho-Alvarado, J.A., Balsiger, B., Sahli, H., Astner, M., Byrde, F., Röllin, S., Holzer, R., Mosimann, N., Wthrich, S., Jakob, A., Burger, M. Long-term behavior of ^{90}Sr and ^{137}Cs in the environment: Case studies in Switzerland. *J. Environ. Radioact.*, 2016, Vol. 160, pp. 54–63.
 31. 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.
 32. Kaduka, M.V., Shutov, V.N. Dynamics of cesium radionuclides content in foodstuff. In: *Radiological and Hygienic Issues of the Mitigation of the Chernobyl NPP Accident Consequences* / Ed.: Acad. RAS G.G. Onishchenko and Professor A.Yu. Popova. – IIRH after Professor P.V. Ramzaev, St.-Petersburg, 2016. – Vol. 1, pp. 143–160. Russian (Кадука, М.В., Шутов, В.Н. Динамика содержания радионуклидов цезия в пищевых продуктах. В кн.: Радиационно-гигиенические аспекты преодоления последствий аварии на Чернобыльской АЭС / под ред. акад. РАН Г.Г. Онищенко и проф. А.Ю. Поповой. – НИИРГ имени проф. П.В. Рамзаева, Санкт-Петербург, 2016. – Том 1, С. 143–160).

33. Pálsson, S.E., Howard, B.J., Gudnason, K., Sigurgeirsson, M.A. Long-term transfer of global fallout ^{137}Cs to cow's milk in Iceland. *Environ. Monit. Assess.*, 2012, Vol. 184, No. 12, pp. 7221–7234.
34. Karpenko, A.F., Komar, A.K., Samusev, A.M. Estimation of the ^{137}Cs and ^{90}Sr transfer parameters for the milk of cows on pasture. In: *Radiation and Ecosystems: Materials of Intern. Sci. Conf.*, Gomel, October 16–17, 2008. – Research Institute of Radiology, Gomel, 2008. – pp. 75–76. Russian (Карпенко, А.Ф., Комар, А.К., Самусев, А.М. Оценка параметров перехода ^{137}Cs и ^{90}Sr в молоко коров при пастбищном содержании. В кн.: Радиация и экосистемы: Материалы Междунар. науч. конф., Гомель, 16–17 октября 2008 г. – РНИУП «Институт радиологии», Гомель, 2008. – С. 75–76).
35. Howard, B.J., Wells, C., Barnett, C.L., Howard, D.C. Improving the quantity, quality and transparency of data used to derive radionuclide transfer parameters for animal products. 2. Cow milk. *J. Environ. Radioact.*, 2017, Vol. 167, pp. 254–268.
36. 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 (Разжигаяева, 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).
37. Karlén, G., Johanson, K.J., Bertilsson, J. Transfer of ^{137}Cs to cow's milk: investigations on dairy farms in Sweden. *J. Environ. Radioact.*, 1995, Vol. 28, No. 1, pp. 1–15.
38. ICRP – International Commission on Radiological Protection. Age-dependent Doses to the Members of the Public from Intake of Radionuclides – Part 5. Compilation of Ingestion and Inhalation Coefficients. ICRP Publication 72. Ann. ICRP, 1995, Vol. 26, No. 1.
39. Norms of Radiation Safety (NRB-99/2009). SanPiN 2.6.1.2523-09. – Federal Center for Hygiene and Epidemiology of Rosпотребнадзор, Moscow, 2009. Russian (Нормы радиационной безопасности (НРБ-99/2009). СанПиН 2.6.1.2523-09. – Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, Москва, 2009).
40. Romanovich, I.K., Bruk, G.Ya., Barkovsky, A.N., Bratilova, A.A., Gromov, A.V., Kaduka, M.V. Substantiation of the concept of transfer to conditions of normal population activity of the settlements considered to be zones of radioactive contamination after the Chernobyl NPP accident. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*, 2016, Vol. 9, No. 1, pp. 6–18. Russian (Романович, И.К., Брук, Г.Я., Барковский, А.Н., Братилова, А.А., Громов, А.В., Кадука, М.В. Обоснование Концепции перевода населенных пунктов, отнесенных в результате аварии на Чернобыльской АЭС к зонам радиоактивного загрязнения, к условиям нормальной жизнедеятельности населения. Радиационная гигиена, 2016, Том 9, № 1, С. 6–18).

Received: 30 July, 2018

Поступила: 30.07.2018 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.

Alexey V. Gromov – Head of the Laboratory on Emergency Response, 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.

Marina V. Kaduka – Candidate of Biological Sciences, Head of the Laboratory of Radiochemistry, 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

Громов Алексей Валерьевич – и.о. заведующего лабораторией аварийного реагирования 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

Кадука Марина Валерьевна – кандидат биологических наук, заведующая радиохимической лабораторией 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., Gromov A.V., Kaduka M.V. Fukushima fallout in Sakhalin Region, Russia, part 3: ^{137}Cs and ^{134}Cs in cow's milk. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*, 2018, Vol. 11, No. 3, pp. 40-55. DOI: 10.21514/1998-426x-2018-11-3-40-55