

Оценка годовой эффективной дозы внешнего облучения в лесах юго-западных районов Брянской области России: 2015–2021 гг.

В.П. Рамзаев, А.Н. Барковский, А.А. Братилова, А.В. Громов, Н.В. Титов

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

Во время пребывания в радиоактивно загрязненном лесу человек неизбежно подвергается дополнительному внешнему облучению от техногенных радионуклидов. Целью настоящего исследования являлась оценка компонента эффективной дозы внешнего облучения населения, обусловленного его пребыванием в лесах, которые были загрязнены в результате Чернобыльской аварии. Исследование было выполнено в юго-западных районах Брянской области России в период 2015–2021 гг. На 46 лесных площадках, расположенных в ареалах 27 населенных пунктов, были проведены полевые (in situ) гамма-спектрометрические измерения. Расстояние между лесной площадкой и центром ближайшего населенного пункта варьировало от 0,2 до 3,3 км (средняя = 1,4 км). На 01.01.2017 г. официально установленные значения плотности загрязнения почвы ^{137}Cs территории самих населенных пунктов находились в диапазоне от 33 до 2050 кБк/м². По данным полевой гамма-спектрометрии значения плотности загрязнения почвы ^{137}Cs на лесных площадках варьировали от 21 до 1930 кБк/м². Плотность загрязнения почвы ^{137}Cs лесу хорошо соответствовала официально установленной плотности загрязнения почвы ^{137}Cs в близлежащем населенном пункте: отношение одного показателя к другому находилось в диапазоне от 0,70 до 1,32 (средняя = 0,94; медиана = 0,95). Разброс измеренных значений мощности амбиентного эквивалента дозы от ^{137}Cs в лесу был весьма значителен: более чем на один порядок величины, от 31 до 2700 нЗв/ч. Изменчивость мощности амбиентного эквивалента дозы от природных радионуклидов была сравнительно невелика: от 13 до 29 нЗв/ч. На основании полученных экспериментальных данных и опубликованных значений продолжительности пребывания человека в лесу был оценен соответствующий компонент эффективной дозы внешнего облучения для нескольких групп местного населения. Эффективная доза внешнего облучения от природных радионуклидов даже в случае весьма длительного пребывания в лесу (1400 ч в год для лесников) не превышала 0,02 миллизиверта в год. Оцененные значения дозы облучения от ^{137}Cs варьировали очень широко — от 0,001 до 1,9 мЗв/год в зависимости от выбранного лесного участка и группы населения. В целом, полученные данные свидетельствуют о том, что официально установленные значения плотности загрязнения почвы ^{137}Cs в населенном пункте можно напрямую использовать в дозиметрических моделях для оценки компонента эффективной дозы внешнего облучения человека, обусловленного его нахождением в лесу, который расположен в ареале данного населенного пункта. При этом в настоящее время для Брянской области рекомендуемый коэффициент перехода от плотности загрязнения почвы ^{137}Cs в населенном пункте к мощности амбиентного эквивалента дозы от ^{137}Cs в близлежащем лесу равен 1,28 (нЗв/ч)/(кБк/м²). Для оценки эффективной дозы внешнего облучения от природных радионуклидов в лесу рекомендуется использовать значение мощности амбиентного эквивалента дозы, равное 21 нЗв/ч.

Ключевые слова: Чернобыльская авария, ^{137}Cs , лес, плотность загрязнения почвы, природные радионуклиды, мощность амбиентного эквивалента дозы, эффективная доза.

Введение

В результате аварии на Чернобыльской АЭС значительная часть (около 30% из 1 230 000 га) территории государственного лесного фонда Брянской области оказалась загрязненной техногенными радионуклидами (РН) [1], из которых в настоящее время основным дозообразующим РН является ^{137}Cs [2]. В 2012 г. площадь территорий лесов с плотностью загрязнения почвы ^{137}Cs (A_{Cs})

свыше 37 кБк/м² (1 Ки/км²) составляла 228 900 га [2]. Наибольшие значения A_{Cs} были зарегистрированы на юго-западе области в пределах Гордеевского, Злынковского, Красногорского и Новозыбковского районов. По данным [2], на 2018 г. общая площадь лесов, загрязненных свыше 555 кБк/м², составила в этих районах 13 753 га, а на площади 829 га (Новозыбковский и Красногорский районы) значение A_{Cs} превышало величину 1480 кБк/м².

Рамзаев Валерий Павлович

Санкт-Петербургский научно-исследовательский институт радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева
Адрес для переписки: 197101, Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Мира, д. 8; E-mail: V.Ramzaev@mail.ru

Лесные угодья с A_{Cs} выше 555 кБк/м² находятся также в Клинцовском районе [3].

Несмотря на сравнительно высокие уровни радиоактивного загрязнения определенных территорий России ¹³⁷Cs после аварии на ЧАЭС, «лесохозяйственную деятельность на этих территориях приостановить невозможно, так как леса играют важное экологическое, социальное и экономическое значение» [4]. В частности, леса традиционно используются местным населением для сбора грибов, ягод и лекарственных дикоросов, а также для выпаса скота и охоты. Согласно ГОСТ Р 22.11.06-2014¹, для обеспечения соблюдения установленных нормами радиационной безопасности пределов доз облучения населения и работников лесного хозяйства при использовании лесов, загрязненных ¹³⁷Cs (плотность загрязнения почвы в текущем году свыше 37 кБк/м²), необходимо проводить комплексные защитные и реабилитационные мероприятия. К одному из основных организационно-технических защитных мероприятий относится периодический мониторинг радиационной обстановки в лесных массивах [4], который в соответствии с ГОСТ Р 22.11.06-2014 включает в себя определение мощности дозы ионизирующего излучения (МД, мкЗв/ч), плотности радиоактивного загрязнения почвы (кБк/м²), плотности потока бета-частиц (1/с·см²) и удельной активности РН в лесных ресурсах (Бк/кг).

Наличие актуализированных сведений о плотности загрязнения почвы РН, мощности дозы гамма-излучения в воздухе и содержании РН в компонентах лесной экосистемы позволяет оценить эффективную дозу внешнего облучения человека в случае его нахождения в лесу и эффективную дозу внутреннего облучения человека при потреблении пищевых продуктов, имеющих свое происхождение из леса. Такие оценки могут быть сделаны напрямую для конкретного участка (площадки) леса или лесного массива, находящегося вблизи (в ареале) определенного населенного пункта (НП), по результатам измерений МД в воздухе и удельной активности РН в почве и в лесных ресурсах (например, [5, 6]). Однако для обширных территорий и сотен НП, до сих пор загрязненных радионуклидами после аварии на ЧАЭС [7], задача оценки годовой эффективной дозы облучения человека от этого техногенного источника ионизирующего излучения может быть решена только на

основе использования моделей, которые учитывают усредненные и нормированные на плотность загрязнения почвы ¹³⁷Cs значения МД и удельной активности ¹³⁷Cs в пищевых продуктах. Численные значения параметров моделей устанавливаются на основании результатов представительных измерений МД в воздухе в основных локациях и удельной активности РН в пищевых продуктах местного происхождения, а также по данным опросов местных жителей о продолжительности их пребывания в различных локациях внутри и вне НП и об объемах потребления различных пищевых продуктов². Учитывая то обстоятельство, что в отдаленный период после аварии на ЧАЭС численные значения параметров моделей меняются медленно, эти значения следует пересматривать 1 раз в 3 года по результатам выборочных радиационно-гигиенических обследований, определенных в МУ 2.6.1.2003-05³. В модельных расчетах в соответствии с МУ 2.6.1.2003-05 одним из ключевых параметров является плотность загрязнения почвы территории НП ¹³⁷Cs, которая официально устанавливается Росгидрометом в текущем году. При вычислении годовой эффективной дозы численное значение этого показателя по умолчанию принимается одинаковым для всех локаций, вне зависимости от их расположения – внутри НП (огород, жилой дом, двор, улица, производственные постройки) или в его ареале (лес, пахотное поле, луг). Не совсем ясно, насколько справедлив такой обобщающий подход в отношении локаций, расположенных за границей НП. Хотя в приказе Росгидромета № 460 по определению плотности радиоактивного загрязнения почв территорий населенных пунктов вследствие катастрофы на Чернобыльской АЭС⁴ и есть упоминание об ареале НП, плотность радиоактивного загрязнения почвы в НП вычисляется по результатам анализа проб, отобранных именно на территории НП. То есть используются «данные проведенных обследований радиоактивного загрязнения почв территорий населенных пунктов, а также информация Единого государственного фонда данных о состоянии окружающей среды, ее загрязнении (ЕГФД) о содержании радиоактивных веществ в почве на территории населенных пунктов Российской Федерации» (Приказ Росгидромета № 460).

Цель исследования – оценка компонента эффективной дозы внешнего облучения человека, обусловленного

¹ ГОСТ Р 22.11.06-2014. Безопасность в чрезвычайных ситуациях. Безопасность жизнедеятельности населения на радиоактивно загрязненных территориях. Безопасное использование лесов на землях лесного фонда и иных категорий. Общие требования. [GOST Р 22.11.06-2014. Safety in emergencies. Life safety of population in radioactive nuclide contaminated areas. Safe use of forests and forest lands of other categories. General requirements. (In Russ.).]

² МУ 2.6.1.784-99. Зонирование населенных пунктов Российской Федерации, подвергшихся радиоактивному загрязнению вследствие аварии на Чернобыльской АЭС, по критерию годовой дозы облучения населения. Методические указания. Минздрав России. Москва. 1999. [MU 2.6.1.784-99. Zoning of the settlements of the Russian Federation exposed to radioactive contamination as a result of the accident at the Chernobyl nuclear power plant, according to the criterion of the annual dose of exposure to the population. Methodical instructions. Ministry of Health of Russia. Moscow. 1999. (In Russ.).]

³ МУ 2.6.1.2003-05. Оценка средних годовых эффективных доз облучения критических групп жителей населенных пунктов Российской Федерации, подвергшихся радиоактивному загрязнению вследствие аварии на Чернобыльской АЭС. Методические указания. Роспотребнадзор. 2005. [MU 2.6.1.2003-05. Estimation of the average annual effective doses of exposure of critical groups of residents of settlements of the Russian Federation exposed to radioactive contamination as a result of the accident at the Chernobyl nuclear power plant. Methodical instructions. Rospotrebnadzor. 2005. (In Russ.).]

⁴ Приказ Росгидромета от 31.10.2018 г. № 460 «Об утверждении Порядка определения плотности радиоактивного загрязнения почв территорий населенных пунктов вследствие катастрофы на Чернобыльской АЭС» (зарегистрировано в Минюсте России 14.01.2019 г. № 53344). [Order of Roshydromet dated October 31, 2018 N 460 "On approval of the Procedure for determining the density of radioactive contamination of soils in the territories of settlements as a result of the Chernobyl disaster" (Registered by the Ministry of Justice of Russia on January 14, 2019 N 53344). (In Russ.).]

его пребыванием в лесах, которые расположены в юго-западных районах Брянской области.

Задачи исследования

1. Выполнить полевые (*in situ*) гамма-спектрометрические измерения в лесах вблизи НП, существенно различающихся по значениям официально установленной плотности загрязнения почвы ^{137}Cs ($A_{\text{Cs-НП}}$, кБк/м²).

2. Используя измеренные гамма-спектры, определить значения общей мощности амбиентного эквивалента дозы (МАЭД_{сум}, нЗв/ч), мощности амбиентного эквивалента дозы от природных радионуклидов (МАЭД_{ПРН}, нЗв/ч), мощности амбиентного эквивалента дозы от ^{137}Cs (МАЭД_с, нЗв/ч), мощности амбиентного эквивалента дозы от первичных фотонов с энергией 662 кэВ (МАЭД_{с-пер}, нЗв/ч).

3. По результатам полевой гамма-спектрометрии вычислить плотность загрязнения почвы ^{137}Cs в лесу ($A_{\text{Cs-лес}}$, кБк/м²) и среднюю глубину миграции радионуклида в почве (Z_{Cs} , г/см²).

4. Сравнить $A_{\text{Cs-лес}}$ на лесной площадке с $A_{\text{Cs-НП}}$ в близлежащем НП.

5. Вычислить «лесной» компонент годовой эффективной дозы внешнего облучения человека.

Материалы и методы

Измерения *in situ* были выполнены в период 2015–2021 гг. в общей сложности на 46 лесных площадках, расположенных в ареалах 27 НП Гордеевского, Злынковского, Климовского, Клинцовского, Красногорского и Новозыбковского районов (табл. 1). На 01.01.2017 г. официально установленные [7] значения плотности загряз-

Таблица 1

Официально установленная [7] средняя плотность загрязнения почвы ^{137}Cs в населенных пунктах Брянской области ($A_{\text{Cs-НП}}$) и экспериментально определенная плотность загрязнения почвы ^{137}Cs на близлежащих лесных участках ($A_{\text{Cs-лес}}$), обследованных в 2015–2021 гг. с использованием дозиметра-спектрометра АТ6101Д. Данные приведены на 01.01.2017 г.

[Table 1]

The officially established [7] average value of soil contamination density with ^{137}Cs in the settlements of the Bryansk region ($A_{\text{Cs-set}}$), and the experimentally determined soil contamination density with ^{137}Cs in the nearby forest plots ($A_{\text{Cs-for}}$) surveyed in 2015–2021 using the dosimeter-spectrometer АТ6101D. The values are given as of 01.01.2017]

Населенный пункт [Settlement]	$A_{\text{Cs-НП}}$ (кБк/м ²) [$A_{\text{Cs-set}}$ (kBq/m ²)]	$A_{\text{Cs-лес}}$ (кБк/м ²)* [$A_{\text{Cs-for}}$ kBq/m ²]*	Число участков [Number of plots]
<i>Гордеевский район [Gordeevka district]</i>			
Ипуть [Iput']	204	152 (141–163)	2
Смяльч [Smalch]	374	372 (347–408)	3
<i>Злынковский район [Zlynka district]</i>			
Добрынька [Dobryn'ka]	289	228 (196–260)	2
Муравинка [Muravinka]	555	562 (472–640)	6
<i>Климовский район [Klimovo district]</i>			
Хохловка [Khohlovka]	211	162	1
<i>Клинцовский район [Klincy district]</i>			
Буян [Buyan]	222	225	1
Веприн [Veprin]	429	569 (560–577)	2
Вьюнка [Viunka]	41	34 (33–35)	2
Кипень Ущерпский [Kipen' Uschepskiy]	396	465	1
Красная Заря [Krasnaya Zarya]	41	46	1
Лопатни [Lopatny]	122	108 (103–113)	2
Мизиричи [Mizirichi]	33	23	1
Ольховка [Ol'khovka]	222	155	1
Первое Мая [Pervoye Maya]	137	123	1
Песчанка [Peschanka]	52	44 (41–47)	2
Сосновка [Sosnovka]	44	33	1
Филатов Хутор [Filatov Khutor]	85	96	1
Ущерпье [Uscherpie]	348	352	1
<i>Красногорский район [Krasnaya Gora district]</i>			
Заборье [Zaborie]	2050	1710 (1540–1870)	2
Великоудебное [Velikoudebnoe]	400	399	1

Населенный пункт [Settlement]	A_{Cs-HP} (кБк/м ²) [A_{Cs-set} (кБк/м ²)]	$A_{Cs-лес}$ (кБк/м ²)* [A_{Cs-for} кБк/м ²]*	Число участков [Number of plots]
<i>Новозыбковский район [Novozybkov district]</i>			
Бабаки [Babaki]	1050**	1070	1
Деменка [Demenka]	592	536 (490–581)	2
Гривка [Grivka]	488	475	1
Мамай [Mamai]	352	317 (305–330)	2
Новозыбков [Novozybkov]	370	359	1
Новые Бобовичи [Novie Bobovichi]	555	602 (567–630)	3
Опытная Станция [Opytnaya Stansiya]	651	542 (481–603)	2

* – среднее значение (диапазон) [* – the mean value (range)]; ** – на основе работы [19] [** – based on the study [19]].

нения почвы территории самих НП ^{137}Cs (A_{Cs-HP}) в нашей выборке находились в диапазоне от 33 до 2050 кБк/м². Расстояние между лесной площадкой и центром ближайшего НП варьировало от 0,2 до 3,3 км (средняя = 1,4 км). Т.е. все площадки располагались в пределах пешей доступности для местных жителей. До участков также можно было добраться на легковом автомобиле или велосипеде. Высота расположения площадок над уровнем моря находилась в диапазоне 137–186 м (средняя = 160 м). Возраст взрослых деревьев превышал 45 лет, т.е. все обследованные леса были посажены или выросли до Чернобыльской аварии. Деревья на 30 площадках были представлены в основном сосной, на 2 – в основном березой, на 14 площадках лес был смешанным: береза, сосна, клен, дуб и прочие виды древесной, а также кустарниковой растительности. Представленность подлеска и валежника варьировала от участка к участку: от практически полного отсутствия (на площадках после недавнего низового пожара) до густых труднопроходимых зарослей с наличием на земле поваленных деревьев. Два достаточно типичных примера условий, в которых проводили измерения в лесах, приведены на рисунке 1.

Полевые гамма-спектры были измерены с помощью портативного гамма-спектрометра-дозиметра МКС АТ6101Д (фирма АТОМТЕХ, Беларусь) [8]. Прибор был изначально откалиброван производителем для измерения МАЭД_{сум} и удельной активности ^{40}K , ^{226}Ra и ^{232}Th , а также эффективной удельной активности этих природных радионуклидов ($A_{эфф}$) в объектах окружающей среды. В 2015–2021 гг. были проведены дополнительные исследования и калибровки, позволившие использовать этот прибор для дифференцированной оценки вкладов гамма-излучения от природных радионуклидов и от ^{137}Cs в МАЭД_{сум} [9–11].

Измерения проводили в сухую погоду. Сцинтилляционный детектор спектрометра размещали вертикально на алюминиевом треножнике так, чтобы расстояние между кристаллом NaI(Tl) и поверхностью земли равнялось 1 м (см. рис. 1). Дополнительно к измерениям на этой стандартной высоте на 19 участках были проведены измерения на расстоянии 0,1 м от поверхности почвы. Это было сделано для изучения возможного изменения оценки мощности дозы облучения человека в то время, когда он находится близко к поверхности почвы (напри-



Рис. 1. Примеры условий проведения гамма-спектрометрических измерений в лесу *in situ* (фотографии сделаны в августе 2021 г.):
а – взрослые деревья представлены сосной; умеренное развитие подлеска; поверхность почвы покрыта в основном опадом и местами мхом; ареал НП Ипуть;
б – взрослые деревья представлены в основном березой; слабое развитие подлеска; поверхность почвы покрыта разнотравьем; ареал НП Муравинка
[Fig. 1. Examples of the conditions for *in situ* gamma spectrometric measurements in forest (the photos were taken in August 2021):
a – mature trees are represented by pine; moderate undergrowth; the soil surface is covered mainly with litter and in some places with moss; the area of settlement Iput';
b – mature trees are represented by birch; undergrowth is underdeveloped; the soil surface is covered with forbs; the area of settlement Muravinka]

мер, во время сбора ягод или отдыха). Во всех случаях треногу устанавливали не ближе чем на 2 м от взрослого дерева. Продолжительность измерения была не менее 600 с. Перед измерением полевого спектра выполняли энергетическую калибровку спектрометра с помощью эталонного закрытого источника фотонного излучения ^{137}Cs типа ОСГИ-3, который размещали вплотную к поверхности детектора.

Обработку спектров и определение $\text{МАЭД}_{\text{сум}}$, $\text{МАЭД}_{\text{ПРН}}$, МАЭД_{Cs} и $\text{МАЭД}_{\text{Cs-пер}}$ проводили в соответствии с методами, детально описанными в [9–11]. Полученные результаты спектрометрических измерений *in situ* использовали для вычисления $A_{\text{Cs-лес}}$ и Z_{Cs} по методу BUFCS, предложенному Ramzaev et al. [11]. Пропись метода здесь не приводится, т.к. она свободно доступна на русском и английском языках через Интернет [11, 12]. В 2020–2021 гг. данный метод был применен для определения плотности загрязнения почвы ^{137}Cs на 115 участках земли (огороды), расположенных внутри 46 НП юго-западных районов Брянской области. Полученные значения плотности загрязнения почвы ^{137}Cs на огородах хорошо соответствовали официально установленным значениям средней плотности загрязнения почвы ^{137}Cs в НП. Для всей выборки обследованных населенных пунктов и участков соотношение экспериментальных и официальных данных в среднем равнялось 1,04 [12]; расхождение не превышало 2 раз.

Для вычисления компонента годовой эффективной дозы внешнего облучения (E) взрослого человека, обусловленного его пребыванием в лесу, использовали следующее выражение:

$$E_{i,j} = \text{МАЭД}_i \times a_i \times b_i \times t_j \times K^S \times 10^{-6}, \quad (1)$$

где $E_{i,j}$ – эффективная доза от гамма-излучения i -го радионуклида для j -й группы населения, мЗв/год; МАЭД_i – мощность амбиентного эквивалента дозы гамма-излучения i -го радионуклида, нЗв/ч; a_i – коэффициент перехода от амбиентного эквивалента дозы к керме в воздухе для гамма-излучения i -го радионуклида, Гр/Зв; b_i – коэффициент перехода от кермы в воздухе к E для гамма-излучения i -го радионуклида, Зв/Гр; t_j – время нахождения представителя j -й группы населения в лесу, ч/год; K^S – фактор влияния снежного покрова на величину эффективной дозы, отн. ед.; 10^{-6} – фактор преобразования нЗв в мЗв.

Значения коэффициентов a_i и b_i приняты равными: для ^{137}Cs – 0,8 Гр/Зв и 0,71 Зв/Гр; для природных радионуклидов – 0,8 Гр/Зв и 0,7 Зв/Гр соответственно [13–15]. Для лесников значение t_j принято равным 1400 ч. Это соответствует доли времени (0,16), которую приводит в течение года эта группа населения в локации «Лес», согласно методическим рекомендациям Роспотребнадзора по радиационному мониторингу доз облучения (далее МР-РМДО⁵). Для прочих групп населения (исключая лесников) эта локация в документе МР-РМДО учтена в совокупности

с локацией «Луг», и обе локации обозначены как «Зона отдыха». Согласно документу МР-РМДО, среди этих прочих групп взрослого населения наибольшую долю (0,02) времени в году в «Зоне отдыха» проводят неработающие пенсионеры. По умолчанию принимаем, что на локацию «Лес» приходится половина этой доли, или 88 ч в год. Для остальных взрослых время пребывания в лесу в 2 раза меньше. Понижающий фактор K^S принят равным 0,9, как рекомендовано в документе МР-РМДО.

Для вычисления средней величины, медианы, стандартного отклонения и коэффициента вариации, а также для построения графиков использовали Microsoft Excel. Сравнение двух независимых выборок проводили с помощью непараметрического U-критерия Манна – Уитни. Для сравнения 2 зависимых выборок использовали непараметрический критерий Вилкоксона. Для определения связи между переменными использовали непараметрический коэффициент корреляции Спирмана (R_{sp}). Расчеты непараметрических показателей проводили с использованием интернет-платформы свободного доступа [www.wessa.net].

Результаты и обсуждение

Четкий пик с энергией 662 кэВ от $^{137\text{m}}\text{Ba}$ – короткоживущего ($T_{1/2} = 2,55$ мин) дочернего продукта распада ^{137}Cs ($^{137\text{m}}\text{Ba}$ находится в равновесии с ^{137}Cs), был идентифицирован на всех измеренных гамма-спектрах; примеры даны на рисунке 2. Не менее отчетливо во всех случаях был виден пик с энергией 1461 кэВ от ^{40}K . Присутствие пиков с энергией 1764 кэВ от ^{214}Bi (семейство ^{226}Ra) и 2615 кэВ от ^{208}Tl (семейство ^{232}Th) также можно было идентифицировать на спектрограммах.

Разброс значений $\text{МАЭД}_{\text{сум}}$ был весьма значителен: более чем на один порядок величины, от 54 до 2730 нЗв/ч (табл. 2). Этот разброс в основном определялся вариабельностью МАЭД_{Cs} (31–2700 нЗв/ч). Изменчивость $\text{МАЭД}_{\text{ПРН}}$ была сравнительно невелика: от 13 до 29 нЗв/ч.

В среднем вклад техногенного компонента (МАЭД_{Cs}) в $\text{МАЭД}_{\text{сум}}$ составил 88% (диапазон = 50–99%). Вклад нерассеянных (первичных) фотонов с энергией 662 кэВ (от ^{137}Cs – $^{137\text{m}}\text{Ba}$) в МАЭД_{Cs} варьировал от 38 до 58% (средняя = 52%).

На расстоянии 0,1 м от земли МАЭД_{Cs} была в среднем на 12% (разброс от 1 до 28%; медиана = 12%; $n = 19$) больше, по сравнению с таковой на расстоянии 1 м. Разница между двумя высотами очевидна и статистически значима (критерий Вилкоксона; $P < 0,01$). Значения $\text{МАЭД}_{\text{ПРН}}$ у поверхности земли были также несколько выше (в среднем на 5%), чем таковые на высоте 1 м. Эти небольшие различия были статистически значимыми (критерий Вилкоксона; $P < 0,01$).

Результаты определения $A_{\text{Cs-лес}}$ на площадках вблизи отдельных НП даны в таблице 1, а обобщенные результаты вычислений значения $A_{\text{Cs-лес}}$ приведены в колонке 6 табли-

⁵ Методические рекомендации по обеспечению радиационной безопасности «Радиационный мониторинг доз облучения населения территорий, подвергшихся радиоактивному загрязнению вследствие аварии на Чернобыльской АЭС». Утверждены Федеральной службой по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека 27 декабря 2007 г. № 0100/13610-07-34. [Methodological recommendations for ensuring radiation safety «Radiation monitoring of exposure doses to the population of territories exposed to radioactive contamination as a result of the accident at the Chernobyl nuclear power plant». Approved by the Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Wellbeing on December 27, 2007. No. 0100/13610-07-34. (In Russ.).]

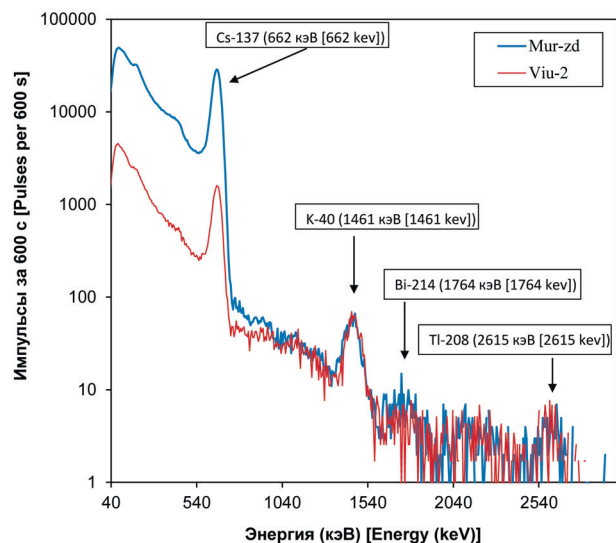


Рис. 2. Гамма-спектры, измеренные *in situ* летом 2021 г. на лесных площадках вблизи НП Муравинка (Mur-zd) и Вьюнка (Viu-2). Официально установленные значения плотности загрязнения почвы ^{137}Cs в НП Муравинка и Вьюнка в 2017 г. равнялись 555 и 41 кБк/м² соответственно. Стрелки указывают положения пиков антропогенного радионуклида ^{137}Cs , а также природных радионуклидов ^{214}Bi (семейство ^{226}Ra), ^{208}Tl (семейство ^{232}Th) и ^{40}K . Видна выраженная разница в высоте пика ^{137}Cs между площадками

[Fig. 2. Gamma-ray spectra measured *in situ* in forest plots near settlements Muravinka (Mur-zd) and Viunka (Viu-2) in summer 2021. In 2017, the officially established level of soil contamination density with ^{137}Cs was 555 and 41 kBq/m² for the settlements Muravinka and Viunka, respectively. The arrows show positions of peaks associated with the anthropogenic radionuclide ^{137}Cs and the terrigenous (natural) radionuclides ^{214}Bi (^{226}Ra series), ^{208}Tl (^{232}Th series) and ^{40}K . There is a pronounced difference between two plots in the height of the ^{137}Cs peak]

цы 2. Полученные значения плотности загрязнения почвы ^{137}Cs в лесу достаточно хорошо соответствовали официально установленным значениям плотности загрязнения почвы ^{137}Cs в близлежащем НП (рис. 3). Отношение $A_{\text{Cs-лес}}/A_{\text{Cs-НП}}$ находилось в диапазоне от 0,70 до 1,32 (средняя = 0,94; медиана = 0,95).

МАЭД_{Cs} и $A_{\text{Cs-лес}}$ положительно коррелировали между собой (рис. 4). Сила связи между переменными была очень высокой ($R_{\text{sp}} = 0,991$, $P < 0,001$). Результаты статистической обработки значений МАЭД_{Cs} , нормированных на величину $A_{\text{Cs-лес}}$ ($\text{МАЭД}_{\text{Cs-норм}} \text{ (нЗв/ч)/(кБк/м}^2\text{)}$), представлены в последней колонке таблицы 2. Как видно из таблицы 2, после такой нормировки разброс значений МАЭД_{Cs} ожидаемо резко сузился: коэффициент вариации уменьшился с 98% до 12%. $\text{МАЭД}_{\text{Cs-норм}}$ отрицательно коррелировали со средней глубиной миграции ^{137}Cs в почве (Z_{Cs}). Выраженность отрицательной корреляции между $\text{МАЭД}_{\text{Cs-норм}}$ и Z_{Cs} была очень высокой ($R_{\text{sp}} = -0,992$) и статистически значимой ($P < 0,001$).

Среднее значение нормализованной МАЭД_{Cs} в лесу для нашей выборки ($n = 46$) – 1,36 (нЗв/ч)/(кБк/м²), оказалось в 2,5 раза выше по сравнению со средним значением $\text{МАЭД}_{\text{Cs-норм}}$ (0,55 (нЗв/ч)/(кБк/м²)), определенном в 2020–2021 гг. для 115 огородных участков в НП юго-западных районов Брянской области [12]. Столь явные различия между постоянно культивируемыми участками почвы (огороды) и некультивируемыми участками земли (лес), в первую очередь, связаны с весьма существенными различиями между двумя локациями в вертикальном распределении ^{137}Cs в почве. Средняя глубина миграции ^{137}Cs в почве (Z_{Cs}) в лесах варьировала от 1,9 до 11,3 г/см² (усредненно по выборке = 4,2 г/см²). Значение этого показателя на огородах находилось в диапазоне от 8,8 до 17,5 г/см² (средняя = 14,3 г/см²) [12]. Вместе с тем, МАЭД в лесу от природных радионуклидов (средняя = 21 нЗв/ч)

Таблица 2

Мощность амбиентного эквивалента дозы от всех источников ($\text{МАЭД}_{\text{сум}}$), от природных радионуклидов ($\text{МАЭД}_{\text{при}}$), от нерассеянных гамма-квантов с энергией 662 кэВ ($\text{МАЭД}_{\text{Cs-пер}}$), от суммы рассеянных и нерассеянных гамма-квантов $^{137}\text{Cs} + ^{137\text{m}}\text{Ba}$ (МАЭД_{Cs}), плотность загрязнения почвы ^{137}Cs ($A_{\text{Cs-лес}}$), средняя глубина миграции ^{137}Cs в почве (Z_{Cs}) на 46 лесных участках в Брянской области в 2015–2021 гг.

[Table 2

Ambient dose equivalent rate from all sources (ADER_{tot}), from natural radionuclides (ADER_{NRN}), from the 662 keV primary photons ($\text{ADER}_{\text{Cs-pri}}$), from the sum of the primary and scattered photons of $^{137}\text{Cs} + ^{137\text{m}}\text{Ba}$ (ADER_{Cs}), the soil contamination density with ^{137}Cs ($A_{\text{Cs-лес}}$), the mean depth of ^{137}Cs migration in soil (Z_{Cs}) in 46 forest plots in the Bryansk region, 2015–2021]

Параметр [Parameter]	$\text{МАЭД}_{\text{сум}}$ (нЗв/ч) [ADER_{tot} (nSv/h)]	$\text{МАЭД}_{\text{при}}$ (нЗв/ч) [ADER_{NRN} (nSv/h)]	МАЭД_{Cs} (нЗв/ч) [ADER_{Cs} (nSv/h)]	$\text{МАЭД}_{\text{Cs-пер}}$ (нЗв/ч) [$\text{ADER}_{\text{Cs-pri}}$ (nSv/h)]	$A_{\text{Cs-лес}}$ (кБк/м ²) $A_{\text{Cs-лес}}$ [(kBq/m ²)]	Z_{Cs} (г/см ²) [Z_{Cs} (g/cm ²)]	$\text{МАЭД}_{\text{Cs-норм}}$ (нЗв/ч)/(кБк/м ²) [$\text{ADER}_{\text{Cs-норм}}$ (nSv/h)/(kBq/m ²)]
Минимум [Minimum]	54	13	31	13	21	1.9	0,80
Максимум [Maximum]	2730	29	2700	1430	1930	11.3	1,58
Медиана [Median]	473	21	445	231	354	3.9	1,39
Средняя [Mean]	578	21	549	289	398	4.2	1,36
С.о. [SD]	539	4	537	289	377	1.9	0,16
К.в., % [CV, %]	93	19	98	100	95	45	12

С.о. – стандартное отклонение [SD – standard deviation]; К.в. – коэффициент вариации (%) [CV – coefficient of variation (%)].

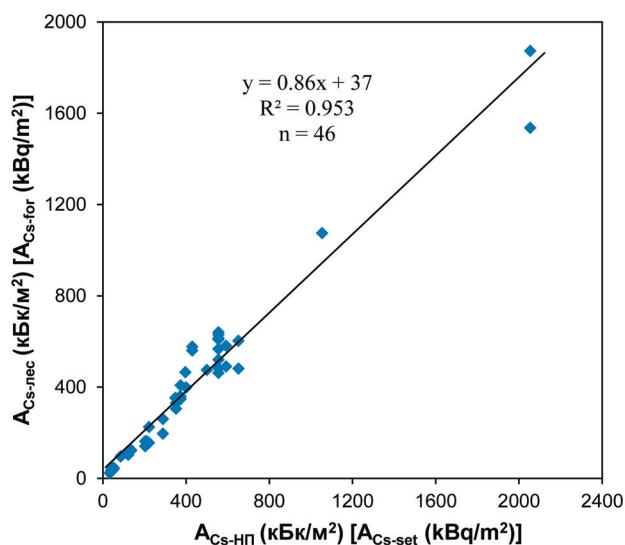


Рис. 3. Соотношение между измеренным *in situ* значением плотности загрязнения почвы ^{137}Cs на лесном участке ($A_{\text{Cs-лес}}$) и официально установленным средним значением плотности загрязнения почвы ^{137}Cs в близлежащем населенном пункте ($A_{\text{Cs-нп}}$). Ареалы 27 населенных пунктов Брянской области, 2015–2021 гг. Значения приведены на 01.01.2017 г. с учетом поправки на радиоактивный распад

[Fig. 3.] Relationship between the *in situ* determined value of the ^{137}Cs contamination density of soil in a forest plot ($A_{\text{Cs-for}}$) and the officially established average value of the ^{137}Cs contamination density of soil in the nearest settlement ($A_{\text{Cs-set}}$). The areas of 27 settlements of the Bryansk region, 2015–2021. All values are decay corrected to the reference date of 01.01.2017]

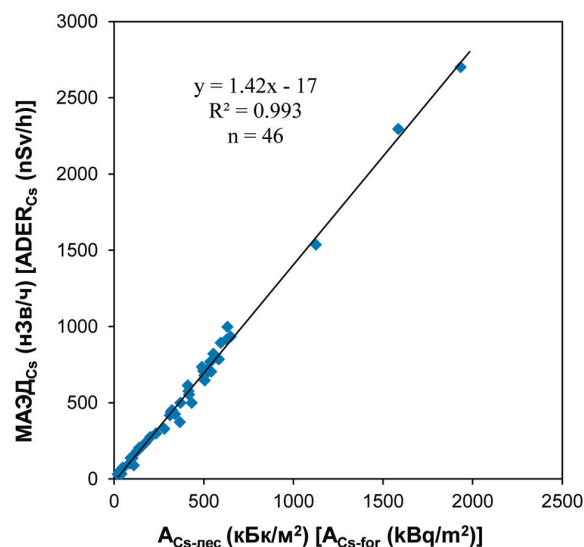


Рис. 4. Соотношение между плотностью загрязнения почвы ^{137}Cs ($A_{\text{Cs-лес}}$) и мощностью амбиентного эквивалента дозы от ^{137}Cs ($\text{МАЭД}_{\text{лес}}$) на площадке в лесу. Ареалы 27 населенных пунктов Брянской области, 2015–2021 гг. Значения приведены на дату измерения *in situ*

[Fig. 4.] Relationship between the ^{137}Cs contamination density of soil ($A_{\text{Cs-for}}$) and ambient dose equivalent rate from ^{137}Cs (ADER_{Cs}) in a forest plot. The areas of 27 settlements of the Bryansk region, 2015–2021. The values are given on the date of *in situ* measurement]

была в 1,7 раза ниже таковой на огородных участках (средняя = 35 нЗв/ч) [12].

Представляет интерес сравнить наши результаты, полученные в лесах Брянской области, с данными недавнего аналогичного исследования радиационной обстановки (2016–2018 гг.) в лесах в зоне отселения Ветковского района Гомельской области Беларуси, которая граничит с Брянской областью [6]. Значения $\text{МАЭД}_{\text{лес-норм}}$ на высоте 1 м над поверхностью земли (средняя = 1,36 (нЗв/ч)/(кБк/м²); медиана = 1,39 (нЗв/ч)/(кБк/м²)) в лесах ($n=46$) юго-западных районов Брянской области удовлетворительно согласуются с оценкой этого показателя в лесах ($n=7$) Гомельской области: средняя = 1,50 (нЗв/ч)/(кБк/м²), медиана = 1,47 (нЗв/ч)/(кБк/м²). Различия между двумя территориями статистически незначимы (тест Манна – Уитни; $P > 0,05$). Отсутствие значимых различий (тест Манна – Уитни; $P > 0,05$) между областями также было зарегистрировано в отношении показателя глубины вертикальной миграции ^{137}Cs в почве. Медианное и среднее значения Z_{Cs} в Брянской области равнялись 4,2 г/см² и 3,9 г/см² соответственно. В Гомельской области оба этих статистических параметра равнялись 4,4 г/см². Статистически незначимыми (тест Манна – Уитни; $p > 0,05$) оказались и различия между значениями $\text{МАЭД}_{\text{лрн}}$, определенные в лесах Брянской области (средняя = 21 нЗв/ч, медиана = 21 нЗв/ч) и Гомельской области (средняя = 18 нЗв/ч, медиана = 17 нЗв/ч). Выраженность различий между значениями

основных дозиметрических показателей на высоте 1 м и 0,1 м также была практически одинаковой: для МАЭД_{Cs} – 15% (Гомельская область) и 12% (Брянская область); для $\text{МАЭД}_{\text{лрн}}$ – в обеих областях по 5%. Отсутствие различий в исследованных показателях радиационной обстановки между граничащими между собой районами Брянской и Гомельской области можно объяснить географической близостью этих регионов, схожестью лесных экосистем и типов почв [6, 11, 16], а также принадлежностью обеих территорий к одному «брянско-белорусскому цезиевому пятну» [17], которое сформировалось в результате чернобыльских выпадений в 1986 г.

Результаты вычисления годовых эффективных доз внешнего облучения взрослого человека, обусловленных его нахождением в обследованных лесах юго-западных районов Брянской области, представлены в таблице 3. Оценки даны для 3 групп населения, различающихся по продолжительности пребывания в лесу. Как видно из таблицы 3, годовая доза облучения от природных радионуклидов ($E_{\text{лрн}}$) даже в случае весьма длительного пребывания в лесу (1400 ч в год для лесников) не превышает 0,02 миллизиверта. Оцененные значения дозы облучения от ^{137}Cs (E_{Cs}) варьируют очень широко – от 0,0007 до 1,9 мЗв/год, в зависимости от выбранного участка и времени пребывания на нем. Максимальное ожидаемое значение E_{Cs} (1,9 мЗв/год), значимо превышающее 1 мЗв/год – предел дозы для населения от техногенного облучения в контролируемых условиях⁶, было вычислено для

⁶ Нормы радиационной безопасности (НРБ-99/2009): Санитарные правила и нормативы СанПиН 2.6.1.2523-09. [Norms of radiation safety (NRB-99/2009). Sanitary rules and norms SanPiN 2.6.1.2523-09. (In Russ.).]

Таблица 3

Годовые эффективные дозы внешнего облучения 3 групп населения в лесу от природных радионуклидов ($E_{\text{ПРН}}$) и ^{137}Cs (E_{Cs}). Оценки даны для 46 лесных участков, обследованных в юго-западных районах Брянской области в 2015–2021 гг.

[Table 3]

Annual effective doses from external exposure for three population groups in forest from natural radionuclides ($E_{\text{ПРН}}$) and ^{137}Cs (E_{Cs}). The estimates are provided for 46 forest areas surveyed in the southwestern districts of the Bryansk region in 2015–2021]

Параметр [Parameter]	Эффективная доза (мЗв/год) [Effective dose (mSv/year)]	
	$E_{\text{ПРН}}$ [E_{NRN}]	E_{Cs}
<i>Работающие взрослые [Working adults]</i>		
Минимум [Minimum]	0,0003	0,0007
Максимум [Maximum]	0,0006	0,061
Средняя [Mean]	0,0005	0,012
<i>Неработающие пенсионеры [Non-working pensioners]</i>		
Минимум [Minimum]	0,0006	0,0014
Максимум [Maximum]	0,0012	0,12
Средняя [Mean]	0,0010	0,025
<i>Лесники [Foresters]</i>		
Минимум [Minimum]	0,009	0,02
Максимум [Maximum]	0,020	1,93
Средняя [Mean]	0,015	0,39

работников лесного хозяйства, которые могли осуществлять свою профессиональную деятельность в лесу ареала НП Заборье Красногорского района. Очевидно, что время нахождения лесников в лесных массивах вблизи этого НП должно быть ограничено. Для остальных групп взрослых максимальное вычисленное значение E_{Cs} оказалось почти в 10 раз меньше, чем 1 мЗв/год, а среднее значение по нашей выборке лесов не превысило 3% от этой величины.

Здесь полезно оценить предельную плотность загрязнения почвы в лесу ^{137}Cs ($A_{\text{Cs-лес-пред}}$, кБк/м²), выше которой для выбранных групп населения следует ожидать E_{Cs} , превосходящую 1 мЗв/год. Для этого используем следующее выражение:

$$A_{\text{Cs-лес-пред}} = \frac{E_{\text{пред}}}{\text{МАЭД}_{\text{Cs-норм}} \times a_{\text{Cs}} \times b_{\text{Cs}} \times t_j \times K^S \times 10^{-6}}, \quad (2)$$

где $E_{\text{пред}}$ – предел дозы от техногенного источника (в нашем случае 1 мЗв/год); $\text{МАЭД}_{\text{Cs-норм}}$ – максимальное значение $\text{МАЭД}_{\text{Cs-норм}}$ в лесу (1,58 (нЗв/ч)/(кБк/м²)) (см. табл. 2); a_{Cs} – коэффициент перехода от амбиентного эквивалента дозы к керме в воздухе для ^{137}Cs (0,8 Гр/Зв) [13]; b_{Cs} – коэффициент перехода от кермы в воздухе к мощности эффективной дозы для ^{137}Cs (0,71 Зв/Гр) [15]; t_j – время пребывания представителя j -й группы населения в лесу, ч/год; K^S – фактор влияния снежного покрова на величину эффективной дозы (0,9); 10^{-6} – фактор преобразования нЗв в мЗв.

Для работников лесного хозяйства (продолжительность пребывания в лесу 1400 ч/год) $A_{\text{Cs-лес-пред}}$ будет равна 880 кБк/м². Лесные массивы с такой плотностью загрязнения присутствуют в Новозыбковском и Красногорском районах (территории Злынковского и Клиновского лес-

ничеств) [2]. Поэтому в данных районах применение защитных мероприятий в отношении деятельности работников лесного хозяйства по-прежнему остается весьма актуальным. Для неработающих пенсионеров (продолжительность пребывания в лесу 88 ч/год) величину эффективной дозы внешнего облучения в лесу в 1 мЗв/год можно ожидать при значении $A_{\text{Cs-лес}}$ равном 14000 кБк/м². Столь высокий уровень загрязнения почвы в Брянской области не встречается. Согласно сводке А.В. Панова [3], в 2017–2020 гг. максимальная плотность загрязнения ^{137}Cs лесов Брянской области равнялась 2156 кБк/м².

Важно отметить, что приведенные выше оценки предельной плотности загрязнения почвы ^{137}Cs касаются самой простой (консервативной) ситуации, при которой доза облучения от чернобыльских выпадений формируется только во время пребывания человека в лесу и только за счет внешнего источника гамма-излучения. На самом деле местные жители (в том числе и лесники) подвергаются внешнему облучению во многих других локациях внутри и вне населенных пунктов [18, 19]. Кроме того, часть дозы от техногенных источников ионизирующего излучения формируется за счет поступления радионуклидов в организм человека при потреблении пищевых продуктов местного происхождения (в том числе даров леса) [5, 7]. В этой связи следует корректно оценить каждый из компонентов дозы с учетом плотности радиоактивного загрязнения территории НП (или лесного массива) в текущем году. Такие обобщенные оценки дозы внешнего облучения для локаций «Огород» и «Жилой дом» в Брянской области применительно к современным условиям уже даны в работах [12, 20]. В отношении локаций «Лес» при вычислении годовой эффективной дозы внешнего облучения от ^{137}Cs для представителя j -й груп-

пы населения в лесу (E_{Cs-j} , мЗв/год), который находится в ареале населенного пункта с известным в текущем году значением $A_{Cs-оф}$ (кБк/м²), можно использовать формулу:

$$E_{Cs-j} = MAЭД_{Cs-норм} \times a_{Cs} \times b_{Cs} \times t_j \times K^S \times 0,94 \times A_{Cs-оф} \times 10^{-6}, (3)$$

где $MAЭД_{Cs-норм}$ – эмпирически установленное среднее значение нормализованной мощности AMBIENTНОГО эквивалента дозы от ^{137}Cs в лесу в летний период времени (1,36 (нЗв/ч)/(кБк/м²)) (см. табл. 2); a_{Cs} – коэффициент перехода от AMBIENTНОГО эквивалента дозы к керме в воздухе для ^{137}Cs (0,8 Гр/Зв) [13]; b_{Cs} – коэффициент перехода от кермы в воздухе к мощности эффективной дозы для ^{137}Cs (0,71 Зв/Гр) [15]; t_j – время пребывания представителя j -й группы населения в лесу, ч/год; K^S – фактор влияния снежного покрова на величину эффективной дозы (0,9); 0,94 – эмпирически установленное среднее отношение $A_{Cs-лес}/A_{Cs-оф}$; 10^{-6} – фактор преобразования нЗв в мЗв.

Следует отметить, что численные значения коэффициентов a_{Cs} и b_{Cs} были выведены с использованием экспериментальных данных, полученных при проведении измерений в условиях реального радиоактивного загрязнения в Брянской области более 10 лет тому назад. Перемножая коэффициенты a_{Cs} и b_{Cs} , можно получить непосредственный коэффициент перехода (KP_{A-E} , безразмерная величина) от $MAЭД_{Cs}$ к E_{Cs} . В нашем случае значение KP_{A-E} равно 0,57 (= 0,8 × 0,71). Эта величина разумно соответствует соотношению дозовых коэффициентов, современные значения которых представлены в недавней публикации МКРЗ № 144 [21] для ситуации внешнего облучения человека, стоящего на земле, загрязненной радионуклидами. В частности, для плоского изотропного источника ^{137m}Ba (короткоживущий дочерний продукт распада ^{137}Cs ; энергия первичных фотонов = 662 кэВ), который расположен в почве на глубине 3 г/см², соотношение между значением коэффициента перехода от плотности загрязнения к мощности эффективной дозы для взрослого человека (0,726 (нЗв/ч)/(кБк/м²)) и значением коэффициента перехода от плотности загрязнения к МАЭД на высоте 1 м от поверхности земли (1,31 (нЗв/ч)/(кБк/м²)) равно 0,554. В пересчете на материнский радионуклид ^{137}Cs (выход ^{137m}Ba на распад ^{137}Cs = 0,944) нормализованная МАЭД при таком заглуплении источника будет равна 1,24 (нЗв/ч)/(кБк/м²). Эта величина довольно близка к среднему значению $MAЭД_{Cs-норм}$, определенному в нашей работе для лесов юго-западных районов Брянской области. Для случая экспоненциально распределенного объемного источника ^{137m}Ba в почве при значениях релаксационной массы на площадь (коэффициент β) от 0,5 до 10 г/см² соотношение между коэффициентом перехода от плотности загрязнения к мощности эффективной дозы для взрослого человека и коэффициентом перехода от плотности загрязнения к МАЭД на высоте 1 м от поверхности земли находится в диапазоне 0,583–0,546 (вычислено нами на основании табулированных значений из приложения 2 к публикации [21]). При этом по мере заглупления источника в профиле почвы (и соответственно, нарастания значения β) коэффициент перехода от AMBIENTНОГО эквивалента дозы к эффективной дозе постепенно уменьшается. Величина нормализованной МАЭД от ^{137m}Ba при том же темпе заглупления источника снижается более резко – с 1,93 до 0,74 (нЗв/ч)/(кБк/м²). В пересчете на ^{137}Cs

нормализованная МАЭД при заглуплении источника в почве будет уменьшаться от 1,82 до 0,70 (нЗв/ч)/(кБк/м²). Значения $MAЭД_{Cs-норм}$, вычисленные для лесов Брянской области в нашей работе для периода 2015–2021 гг., находились внутри этого диапазона и варьировали от 1,58 до 0,80 (нЗв/ч)/(кБк/м²) (см. табл. 2).

Отметим, что коэффициенты перехода от плотности радиоактивного загрязнения почвы к эффективной дозе вычислены и представлены в виде таблиц в публикации МКРЗ № 144 [21] для идеально простого случая – открытого участка почвы с гладкой поверхностью. Поэтому применительно к лесным экосистемам эти коэффициенты можно использовать для оценки эффективной дозы в качестве первого и консервативного приближения. В отдаленном периоде после Чернобыльской аварии присутствие надземной биомассы уменьшает дозу облучения в лесу по сравнению с открытой местностью, но это снижение сравнительно невелико – до 10% [22]. Само поведение человека в лесу также оказывает модифицирующее влияние на годовую дозу облучения, т.к. при сборе грибов и ягод тело индивидуума находится ближе к поверхности земли, и мощность дозы облучения может несколько возрасти (на несколько процентов). Как показали наши измерения, значение $MAЭД_{Cs}$ на высоте 0,1 м на 12% больше, чем таковое на высоте 1 м. С другой стороны, местные жители могут перемещаться по лесным дорогам в автомобиле. Мощность дозы гамма-излучения внутри автомобиля ниже, чем таковая снаружи [23].

Как показывают результаты компьютерного моделирования [21, 24], для детей, по сравнению со взрослыми, коэффициенты перехода от плотности загрязнения почвы ^{137}Cs к мощности эффективной дозы на открытом участке земли больше. Это связано с расположением тела стоящего на земле ребенка ближе к источнику излучения в почве и с меньшей толщиной наружного слоя мягких тканей и мышц. К примеру, для плоского изотропного источника ^{137m}Ba , который расположен в почве на глубине 3 г/см², разница между значениями эффективной дозы у ребенка в возрасте 1, 5, 10 и 15 лет, по сравнению с таковой у взрослого человека, составит 22, 17, 9 и 1% соответственно (вычислено нами на основании табулированных значений из приложения 2 к публикации [21]). Эти особенности следует учитывать при оценке дозы внешнего облучения детей разного возраста в случае их пребывания в радиоактивно загрязненных лесах.

Заключение

Использование предварительно калиброванного полевого гамма-спектрометра-дозиметра позволило выполнить отдельные измерения мощности AMBIENTНОГО эквивалента дозы от ^{137}Cs ($MAЭД_{Cs}$) и природных радионуклидов ($MAЭД_{ПРН}$), а также измерить плотность загрязнения почвы ^{137}Cs ($A_{Cs-лес}$) на 46 площадках, расположенных в лесах вблизи 27 населенных пунктов юго-западных районов Брянской области. Разброс измеренных значений $MAЭД_{Cs}$ был весьма значителен: более чем на один порядок величины, от 31 до 2700 нЗв/ч. Изменчивость $MAЭД_{ПРН}$ была сравнительно невелика: от 13 до 29 нЗв/ч. На основании полученных экспериментальных данных и рекомендованных Роспотребнадзором значений продолжительности пребывания человека в лесу была оценена эффективная доза внешнего облучения для 3 групп местного населе-

ния. Оцененная эффективная доза внешнего облучения от природных радионуклидов ($E_{\text{ПРН}}$) даже в случае весьма длительного пребывания в лесу (1400 ч в год для лесников) не превышает 0,02 миллизиверта в год. Оцененные значения дозы облучения от ^{137}Cs (E_{Cs}) варьировали очень широко – от 0,001 до 1,9 мЗв/год, в зависимости от выбранного участка и группы населения. Максимальное ожидаемое значение E_{Cs} (1,9 мЗв/год), значимо превышающее 1 мЗв/год – предел дозы для населения от техногенного облучения в контролируемых условиях, было вычислено для работников лесного хозяйства, которые могли осуществлять свою профессиональную деятельность в лесу ареала НП Заборье Красногорского района. Для остальных групп взрослых максимальное вычисленное значение E_{Cs} оказалось почти в 10 раз меньше, чем 1 мЗв/год, а среднее значение по нашей выборке лесов не превысило 3% от этой величины. В 2015–2021 гг. значения $A_{\text{Cs-лес}}$ находились в диапазоне от 21 до 1930 кБк/м². Эти значения плотности загрязнения почвы ^{137}Cs в лесах хорошо соответствовали официально установленным значениям плотности загрязнения почвы ^{137}Cs в близлежащих населенных пунктах ($A_{\text{Cs-НП}}$). Отношение $A_{\text{Cs-лес}}$ к $A_{\text{Cs-НП}}$ находилось в диапазоне от 0,70 до 1,32 (средняя = 0,94; медиана = 0,95). Полученные данные свидетельствуют о том, что официальные установленные значения $A_{\text{Cs-НП}}$ можно надежно использовать в дозиметрических моделях для оценки компонента эффективной дозы внешнего облучения человека, обусловленного его нахождением в лесу, который расположен в ареале данного населенного пункта. При этом в настоящее время рекомендуемый коэффициент перехода от $A_{\text{Cs-НП}}$ к МАЭД_{Cs} равен 1,28 (нЗв/ч)/(кБк/м²). Для оценки $E_{\text{ПРН}}$ рекомендуется использовать значение МАЭД_{ПРН} равное 21 нЗв/ч. Эти значения определены для юго-западных районов Брянской области, и поэтому в других районах их (в особенности значение МАЭД_{ПРН}) следует использовать с осторожностью.

Личный вклад авторов

В.П. Рамзаев участвовал во всех этапах экспериментальных исследований, написал черновик рукописи и представил окончательный вариант статьи в редакцию журнала.

А.Н. Барковский осуществил общее руководство выполнением работ, обеспечил привлечение финансирования и отредактировал промежуточный вариант статьи.

А.А. Братилова обеспечила проведение исследований в Брянской области и отредактировала промежуточный вариант статьи.

А.В. Громов выполнил часть полевых измерений и подготовил библиографические и нормативные ссылки.

Н.В. Титов обеспечил логистику и выполнил часть полевых измерений.

Благодарность

Авторы благодарны К.В. Варфоломеевой (Санкт-Петербургский научно-исследовательский институт радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева) за помощь при проведении полевых исследований.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Источники финансирования

Финансирование работы частично осуществлялось по контракту № 0173100001419000019 с Роспотребнадзором.

Литература

1. Природа России. Национальный портал. URL: http://www.priroda.ru/regions/forest/detail.php?SECTION_ID=586&FO_ID=601&ID=7281. (Дата обращения 09.05.2022).
2. Марченко Т.А., Радин А.И., Раздайковин А.Н. Ретроспективное и современное состояние лесных территорий приграничных районов Брянской области, подвергшихся радиоактивному загрязнению // Радиационная гигиена. 2020. Т. 13, № 2. С. 6–18.
3. Панов А.В. Возвращение радиоактивно загрязненных территорий к нормальной жизнедеятельности: современные проблемы и пути решения (к 35-летию аварии на Чернобыльской АЭС) // Медико-биологические и социально-психологические проблемы безопасности в чрезвычайных ситуациях. 2021. № 1. С. 5–13.
4. Марченко Т.А., Раздайковин А.Н., Санжарова Н.И., и др. Разработка национального стандарта «Безопасность жизнедеятельности населения на радиоактивно загрязненных территориях. Безопасное использование лесов на землях лесного фонда и иных категорий. Основные положения» // Радиационная гигиена. 2013. Т. 6, № 4. С. 27–30.
5. 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. Т. 6, № 2. С. 11–20.
6. Ramzaev V., Bernhardsson C., Dvornik A., et al. Calculation of the effective external dose rate to a person staying in the resettlement zone of the Vetka district of the Gomel region of Belarus based on *in situ* and *ex situ* assessments in 2016–2018 // Journal of Environmental Radioactivity. 2020. Vol. 214–215. P. 106168.
7. Брук Г.Я., Романович И.К., Базюкин А.Б., и др. Средние годовые эффективные дозы облучения в 2017 году жителей населенных пунктов Российской Федерации, отнесенных к зонам радиоактивного загрязнения вследствие катастрофы на Чернобыльской АЭС (для целей зонирования населенных пунктов) // Радиационная гигиена. 2017. Т. 10, № 4. С. 73–78.
8. ATOMTEX. Спектрометр МКС AT6101ДР. URL: <https://atomtex.com/ru/spektrometr-mks-at6101dr>. (Дата обращения: 17.03.2022).
9. Ramzaev V., Barkovsky A., Bernhardsson C., Mattsson S. Calibration and testing of a portable NaI(Tl) gamma-ray spectrometer-dosimeter for evaluation of terrestrial radionuclides and ^{137}Cs contributions to ambient dose equivalent rate outdoors // Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene. 2017. Vol. 10, No. 1. P. 18–29.
10. Ramzaev V., Bernhardsson C., Barkovsky A., et al. A backpack γ -spectrometer for measurements of ambient dose equivalent rate, $H^*(10)$, from ^{137}Cs and from naturally occurring radiation: the importance of operator related attenuation // Radiation Measurements. 2017. Vol. 107. P. 14–22.
11. Ramzaev V., Bernhardsson C., Dvornik A., et al. *In situ* determination of ^{137}Cs inventory in soil using a field-portable scintillation gamma spectrometer-dosimeter // Journal of Environmental Radioactivity. 2021. Vol. 231. P. 106562.
12. Рамзаев В.П., Барковский А.Н., Братилова А.А. Мощность амбиентного эквивалента дозы и плотность загрязнения почвы ^{137}Cs на огородах в населенных пунктах Брянской области России в 2020–2021 гг. // Радиационная гигиена. 2021. Т. 14, № 4. С. 85–95.
13. Ramzaev V.P., Barkovsky A.N. On the relationship between ambient dose equivalent and absorbed dose in air in the case

- of large-scale contamination of the environment by radioactive cesium // *Radiation Hygiene*. 2015. Vol. 8, No. 3. P. 6–20.
14. 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.
 15. Golikov V., Wallström E., Wöhni T., et al. Evaluation of conversion coefficients from measurable to risk quantities for external exposure over contaminated soil by use of physical human phantoms // *Radiation and Environmental Biophysics*. 2007. Vol. 46. P. 375–382.
 16. Рамзаев В.П., Барковский А.Н., Варфоломеева К.В. Вертикальное распределение ^{137}Cs в дерново-подзолистой песчаной почве на лугах и в лесах Брянской области в 2015–2016 гг. // *Радиационная гигиена*. 2019. Т. 12, № 3. С. 27–41.
 17. Квасникова Е.В., Стукин Е.Д., Титкин Г.И., и др. Трансформация радиоактивного загрязнения почв Брянско-Белорусского Полесья // *Метеорология и гидрология*. 2002. № 1. С. 46–58.
 18. Golikov V., Balonov M.I., Jacob P. External exposure of the population living in areas of Russia contaminated due to the Chernobyl accident // *Radiation and Environmental Biophysics*. 2002. Vol. 41. P. 185–193.
 19. Ramzaev V., Yonehara H., Hille R., et al. Gamma-dose rates from terrestrial and Chernobyl radionuclides inside and outside settlements in the Bryansk Region, Russia in 1996–2003 // *Journal of Environmental Radioactivity*. 2006. Vol. 85. P. 205–227.
 20. Рамзаев В.П., Барковский А.Н., Братилова А.А. Мощность амбиентного эквивалента дозы от ^{137}Cs и природных радионуклидов в одноэтажных жилых домах в населенных пунктах Брянской области в 2020–2021 гг. // *Радиационная гигиена*. 2022. Т. 15, № 2. С. 95–107.
 21. ICRP – International Commission on Radiological Protection. Dose coefficients for external exposures to environmental sources. ICRP Publication 144 // *Annals of the ICRP*. 2020. Vol. 49, No. 2.
 22. Рамзаев В.П., Барковский А.Н. Корреляция между расчетными и измеренными значениями мощности дозы гамма-излучения в воздухе в лесах, загрязненных ^{137}Cs : отдаленный период после Чернобыльской аварии // *Радиационная гигиена*. 2019. Т. 12, № 4. С. 37–46.
 23. Lauridsen B., Jensen P.H. Shielding factors for vehicles to γ radiation from activity deposited on structures and ground surfaces // *Health Physics*. 1983. Vol. 45, No. 6. P. 1039–1045.
 24. Satoh D., Furuta T., Takahashi F., et al. Age-dependent dose conversion coefficients for external exposure to radioactive cesium in soil // *Journal of Nuclear Science and Technology*. 2016. Vol. 53, No. 1. P. 69–81.

Поступила: 04.07.2022 г.

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, главный научный сотрудник 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

Братилова Анжелика Анатольевна – научный сотрудник лаборатории внутреннего 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, Санкт-Петербург, Россия

Громов Алексей Валерьевич – кандидат медицинских наук, заведующий 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

Титов Николай Владимирович – младший 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, Санкт-Петербург, Россия

Для цитирования: Рамзаев В.П., Барковский А.Н., Братилова А.А., Громов А.В., Титов Н.В. Оценка годовой эффективной дозы внешнего облучения в лесах юго-западных районов Брянской области России: 2015–2021 гг. // *Радиационная гигиена*. 2022. Т. 15, № 3. С. 58–71. DOI: 10.21514/1998-426X-2022-15-3-58-71

Assessment of annual effective dose from external exposure in forests of the south-western districts of the Bryansk region of Russia: 2015–2021

Valery P. Ramzaev, Anatoly N. Barkovsky, Anzhelika A. Bratilova, Alexey V. Gromov, Nikolay V. Titov

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

During a stay in a radioactively contaminated forest, a person is inevitably exposed to ionizing radiation from the man-made radionuclides. The purpose of this study was to evaluate the external component of the annual effective dose due to exposure in the forests contaminated following the Chernobyl accident. The study was conducted in the south-western districts of the Bryansk region of Russia in the period 2015–2021. Field (in situ) gamma spectrometric measurements were carried out on 46 forest plots located in the areas of 27 settlements. As of 01.01.2017, the officially established values of soil contamination density with ^{137}Cs in the territory of the settlements themselves were in the range from 33 to 2050 kBq/m². According to the field gamma spectrometry, the density of soil contamination with ^{137}Cs on the forest plots varied from 21 to 1930 kBq/m². The density of soil contamination with ^{137}Cs in forest was in good agreement with the officially established level of soil contamination with ^{137}Cs in the nearby settlement: the ratio of one indicator to another ranged from 0.70 to 1.32 (mean = 0.94; median = 0.95). The scatter in the measured values of the ambient dose equivalent rate from ^{137}Cs was quite significant: more than one order of magnitude, from 31 to 2700 nSv/h. The variability of the ambient dose equivalent rate from natural radionuclides was relatively small: from 13 to 29 nSv/h. Based on the obtained experimental data and on published values of the duration of human stay in forest, the annual effective dose to selected groups of population was estimated. The dose from natural radionuclides, even in the case of a prolonged stay in the forest (1400 hours per year for foresters), did not exceed 0.02 mSv/year. The estimated values of the effective dose from ^{137}Cs varied very widely from 0.001 to 1.9 mSv/year, depending on the selected forest plot and population group. On the whole, the data obtained indicate that the officially established values of the density of soil contamination with ^{137}Cs in a settlement can be directly used in dosimetric models to estimate the component of the effective dose to a person due to his/her staying in the forest which is located in the area of this settlement. The currently recommended conversion coefficient from the density of soil contamination with ^{137}Cs in a settlement to the ambient dose equivalent rate from ^{137}Cs in the nearby forest is 1.28 (nSv/h)/(kBq/m²). To estimate the effective dose from natural radionuclides, it is recommended to use the value of the ambient dose equivalent rate equal to 21 nSv/h.

Key words: Chernobyl accident, ^{137}Cs , forest, soil contamination density, natural radionuclides, in situ, gamma-ray spectrometry, ambient dose equivalent, effective dose.

Personal participation of authors

V.P. Ramzaev contributed to all parts of experimental work, wrote a draft of the article, and submitted the final version of the article to the editors of the journal.

A.N. Barkovsky provided general guidance on the execution of the study, secured the funding, and edited the interim version of the article.

A.A. Bratilova provided research in the Bryansk region and edited the interim version of the article.

A.V. Gromov performed part of the field measurements and collected the bibliography.

N.V. Titov provided logistics and performed part of the field measurements.

Acknowledgments

The authors are grateful to K.V. Varfolomeeva (St. Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene after Professor P.V. Ramzaev) for her help in field measurements.

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interest.

Sources of funding

The work was partially financed under contract No. 0173100001419000019 with Rospotrebnadzor.

References

1. Nature of Russia. National Portal. Available on: http://www.priroda.ru/regions/forest/detail.php?SECTION_ID=586&FO_ID=601&ID=7281 (Accessed 09 May 2022). (In Russian).
2. Marchenko TA, Radin AI, Razdaivodin AN. Retrospective and current state of forest territories of the border areas of the Bryansk region exposed to radioactive contamination. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2020;13(2): 6–18. (In Russian).
3. Panov AV. Returning radioactively contaminated territories to normal life: current problems and ways for solution (35 years after the Chernobyl NPP accident). *Medico-Biological and Socio-Psychological Problems of Safety in Emergency Situations*. 2021;1: 5–13.

Valery P. Ramzaev

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

Address for correspondence: Mira Str., 8, Saint-Petersburg, 197101; Russia. E-mail: V.Ramzaev@mail.ru

4. Marchenko TA, Razdayvodin AN, Sanzharova NI, Panov AV, Goryachev EA. The development of a national standard «Safe life of the population on contaminated territories. Safe use of forests of forestry fund lands and other wooded lands. The basic framework». *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2013;6(4): 27–30. (In Russian).
5. Travnikova IG, Bruk GYa, Shutov VN, Bazyukin AB. 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;6(2): 11–20. (In Russian).
6. Ramzaev V, Bernhardsson C, Dvornik A, Barkovsky A, Vodovatov A, Jönsson M, et al. Calculation of the effective external dose rate to a person staying in the resettlement zone of the Vetka district of the Gomel region of Belarus based on *in situ* and *ex situ* assessments in 2016–2018. *Journal of Environmental Radioactivity*. 2020;214–215: 106168.
7. Bruk GYa, Romanovich IK, Bazyukin AB, Bratilova AA, Vlasov AY, Gromov AV, et al. The average annual effective doses for the population in the settlements of the Russian Federation attributed to zones of radioactive contamination due to the Chernobyl accident (for zonation purposes), 2017. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2017;10(4): 73–78. (In Russian).
8. ATOMTEX. Spectrometer AT6101DR. Available on: <https://atomtex.com/en/at6101dr-spectrometer>. (Accessed 17 March 2022). (In Russian).
9. Ramzaev V, Barkovsky A, Bernhardsson C, Mattsson S. Calibration and testing of a portable NaI(Tl) gamma-ray spectrometer-dosimeter for evaluation of terrestrial radionuclides and ^{137}Cs contributions to ambient dose equivalent rate outdoors. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2017;10(1): 18–29.
10. Ramzaev V, Bernhardsson C, Barkovsky A, Romanovich I, Jarneborn J, Mattsson S, et al. A backpack γ -spectrometer for measurements of ambient dose equivalent rate, $\text{H}^*(10)$, from ^{137}Cs and from naturally occurring radiation: the importance of operator related attenuation. *Radiation Measurements*. 2017;107: 14–22.
11. Ramzaev V, Bernhardsson C, Dvornik A, Barkovsky A, Vodovatov A, Jönsson M. *In situ* determination of ^{137}Cs inventory in soil using a field-portable scintillation gamma spectrometer-dosimeter. *Journal of Environmental Radioactivity*. 2021;231: 106562.
12. Ramzaev VP, Barkovsky AN, Bratilova AA. Ambient dose equivalent rate and soil contamination density with ^{137}Cs in kitchen gardens in settlements of the Bryansk region, Russia in 2020–2021. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2021;14(4): 85–95. (In Russian).
13. Ramzaev VP, Barkovsky AN. On the relationship between ambient dose equivalent and absorbed dose in air in the case of large-scale contamination of the environment by radioactive cesium. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2015;8(3): 6–20.
14. 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.
15. Golikov V, Wallström E, Wöhni T, Tanaka K, Endo S, Hoshi M. Evaluation of conversion coefficients from measurable to risk quantities for external exposure over contaminated soil by use of physical human phantoms. *Radiation and Environmental Biophysics*. 2007;46: 375–382.
16. Ramzaev VP, Barkovsky AN, Varfolomeeva KV. Vertical distribution of ^{137}Cs in soddy-podzolic sandy soil in grasslands and forests of the Bryansk region in 2015–2016. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2019;12(3): 27–41. (In Russian).
17. Kvasnikova EV, Stukin ED, Titkin GI, Zhukova OM, Samonov AE, Borisenko EN, et al. Transformation of the field of radioactive contamination of soils in Bryansk-Belarus Polesseye. *Meteorologiya i gidrologiya = Meteorology and Hydrology*. 2002;1: 46–58. (In Russian).
18. Golikov V, Balonov MI, Jacob P. External exposure of the population living in areas of Russia contaminated due to the Chernobyl accident. *Radiation and Environmental Biophysics*. 2002;41: 185–193.
19. Ramzaev V, Yonehara H, Hille R, Barkovsky A, Mishine A, Sahoo SK, et al. Gamma-dose rates from terrestrial and Chernobyl radionuclides inside and outside settlements in the Bryansk Region, Russia in 1996–2003. *Journal of Environmental Radioactivity*. 2006;85: 205–227.
20. Ramzaev VP, Barkovsky AN, Bratilova AA. Ambient dose equivalent rate from ^{137}Cs and natural radionuclides in one-story residential buildings in settlements of the Bryansk region in 2020–2021. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2022;15(2): 95–107. (In Russian).
21. ICRP – International Commission on Radiological Protection. Dose coefficients for external exposures to environmental sources. ICRP Publication 144. *Annals of the ICRP*. 2020;49(2).
22. Ramzaev VP, Barkovsky AN. Correlation between calculated and measured values of gamma dose rate in air in forests contaminated with ^{137}Cs : the remote period after the Chernobyl accident. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2019;12(4): 37–46. (In Russian).
23. Lauridsen B, Jensen PH. Shielding factors for vehicles to γ radiation from activity deposited on structures and ground surfaces. *Health Physics*. 1983;45(6): 1039–1045.
24. Satoh D, Furuta T, Takahashi F, Endo A, Lee C, Bolch WE. Age-dependent dose conversion coefficients for external exposure to radioactive cesium in soil. *Journal of Nuclear Science and Technology*. 2016;53(1): 69–81.

Received: July 04, 2022

For correspondence: 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 Wellbeing (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 Wellbeing, Saint-Petersburg, Russia

Anzhelika A. Bratilova – Research Fellow of Internal Radiation Laboratory of Saint-Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene after Professor P.V. Ramzaev, Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Wellbeing, Saint-Petersburg, Russia

Alexey V. Gromov – Candidate of Medical Sciences, Head of the Laboratory of Emergency Response, Saint-Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene after Professor P.V. Ramzaev, Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Wellbeing, Saint-Petersburg, Russia

Nikolay V. Titov – 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 Wellbeing, Saint-Petersburg, Russia

For citation: Ramzaev V.P., Barkovsky A.N., Bratilova A.A., Gromov A.V., Titov N.V. Assessment of annual effective dose from external exposure in forests of the south-western districts of the Bryansk region of Russia: 2015–2021. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2022. Vol. 15, No. 3. P. 58-71. (In Russian). DOI: 10.21514/1998-426X-2022-15-3-58-71