DOI: 10.21514/1998-426X-2020-13-1-38-46
УДК: 614.876(470.333):621.039.586(477.41)

Динамика уменьшения мощности дозы гамма–излучения в воздухе в сельских населенных пунктах Брянской области России в отдаленном периоде после Чернобыльской аварии

В.П. Рамзаев, А.Н. Барковский

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

Целью настоящего исследования являлось определение динамики уменьшения мощности дозы гамма-излучения в воздухе в типичных локациях сельской местности в отдаленный период после Чернобыльской аварии. Измерения мощности дозы с использованием полевого гамма-спектрометра-дозиметра были выполнены в ареалах 15 населенных пунктов Злынковского, Клинцовского и Новозыбковского районов Брянской области России в период 1998–2012 гг. После аварии в 1986 г. плотность загрязнения территории ^{137}Cs во всех обследованных населенных пунктах превышала величину 555 кБк/м^2. Измерения мощности дозы были проведены в восьми локациях, обычно используемых при оценке доз облучения населения после Чернобыльской аварии: 1) целинные участки почвы (луга), расположенные вне населенного пункта; 2) целинные участки почвы, расположенные внутри населенного пункта; 3) леса; 4) пахотные поля; 5) огороды; 6) прочие земляные поверхности (земляные дворы рядом с жилыми домами); 7) жилые одноэтажные деревянные дома; 8) асфальтированные поверхности (улицы, дороги, дворы рядом с жилыми домами). Количество точек наблюдения в индивидуальных локациях составляло от 6 до 19 (всего 103 точки). Серии измерений в отдельных точках были начаты в период 1998–2001 гг. и закончены в 2009–2012 гг. В среднем продолжительность серии была равна 11,1 года. Измерения проводили в весеннее-осенний период в отсутствие снега ежегодно (в отдельные годы в некоторых точках по два-три раза в год). В начальный момент времени наблюдений (1998–2001 гг.) значения мощности поглощенной дозы в воздухе от гамма-излучения ^{137}Cs + ^{137m}Ba находились в диапазоне от 40 до 2020 нГр/ч. Максимальные значения были зарегистрированы над целинной почвой и в лесах, а минимальные – внутри домов и над асфальтированными поверхностями. К концу серии наблюдений (2009–2012 гг.) мощность дозы уменьшилась на 6–64%. Значения экологического периода полууменьшения мощности дозы, вычисленные для отдельных локаций, равнялись 34 годам (целинные почвы, расположенные вне населенного пункта), 30 годам (целинные почвы, расположенные внутри населенного пункта), 37 годам (леса), 93 годам (пахотные поля), 99 годам (огороды), 33 годам (прочие земляные поверхности), 45 годам (деревянные дома), 60 годам (асфальтированные поверхности). Полученные значения периода полууменьшения мощности дозы гамма-излучения в воздухе в обследованных локациях были использованы для оценки величины экологического периода полууменьшения эффективной дозы внешнего облучения сельского населения, проживающего в деревянных домах. В среднем этот период оказался равным 50 годам. С учетом радиоактивного распада ^{137}Cs можно ожидать, что доза внешнего облучения сельского населения от чернобыльского загрязнения будет снижаться примерно на 4% в год. Наша оценка уменьшения мощности дозы внешнего излучения близка к оценке, которая была ранее получена другими авторами для описания медленной компоненты динамики эффективной дозы внешнего облучения взрослых жителей в сельских населенных пунктах Брянской области.

Ключевые слова: *Чернобыль, ^{137}Cs, гамма-излучение, мощность поглощенной дозы в воздухе, эффективная доза.*

Введение

Авария на Чернобыльской АЭС в 1986 г. привела к широкомасштабному загрязнению окружающей среды различными техногенными радионуклидами, включая изотоп долгоживущего ^{137}Cs (период полураспада T_{phys} = 30,0 лет) [1, 2]. Этот радионуклид в равновесии с дочерним метастабильным изотопом ^{137m}Ba (T_{phys} = 2,55 мин)] в настоящее время определяет чернобыльскую компоненту дозы внешнего облучения населения, проживающего на загрязненных территориях [2–4].

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

Для оценки дозы внешнего облучения населения от ^{137}Cs в условиях чернобыльского загрязнения были предложены модели, которые учитывают как продолжительность нахождения человека в том или ином месте (локации) внутри загрязненной территории, так и мощность дозы гамма-излучения в воздухе от ^{137}Cs (DR) в этих локациях [1, 2, 5–7]. Последний параметр характеризуется существенными различиями между локациями.

Динамика мощности дозы в локации, во-первых, зависит от скорости радиоактивного распада изотопа (для ^{137}Cs 2,3% в год), что формально может быть представлено:

$$DR(t) = DR(0) \times \exp(-\lambda_{phys} \times t), \quad (1)$$

где *DR(t)* – мощность дозы в момент времени *t*; *DR(0)* – мощность дозы в начальный момент времени (*t* = 0); λ_{phys} – постоянная распада, год$^{-1}$ (для ^{137}Cs 0,023 год$^{-1}$); *t* – время, прошедшее от момента 0 (год).

Второй компонентой, определяющей динамику мощности дозы в воздухе, является скорость уменьшения *DR(t)* за счет экологических (природных) процессов и деятельности человека, включая дезактивацию территории. Динамика данной компоненты характеризуется «экологическим периодом полууменьшения» (T_{eco}, год) *DR(t)*. Соответственно, постоянная экологического уменьшения (λ_{eco}, год$^{-1}$) *DR(t)*, может быть представлена в виде:

$$\lambda_{eco} = \frac{\ln 2}{T_{eco}} \quad (2)$$

В данном случае динамику мощности дозы гамма-излучения в воздухе от ^{137}Cs *DR(t)* в локации можно описать экспоненциальной зависимостью:

$$DR(t) = DR(0) \times \exp(-(\lambda_{phys} + \lambda_{eco}) \times t) \quad (3)$$

Обозначив сумму $\lambda_{phys} + \lambda_{eco}$ как постоянную эффективного уменьшения мощности дозы, λ_{eff}, получаем:

$$DR(t) = DR(0) \times \exp(-\lambda_{eff} \times t) \quad (4)$$

Эффективный период полууменьшения мощности дозы, T_{eff}, вычисляем:

$$T_{eff} = \frac{\ln 2}{\lambda_{eff}} \quad (5)$$

Экологический период полууменьшения мощности дозы, T_{eco}, вычисляем, используя следующую формулу:

$$T_{eco} = \frac{\ln 2}{(\lambda_{eff} - \lambda_{phys})} \quad (6)$$

Для отдаленного периода после Чернобыльской аварии (1996–2003 гг.) показано, что, проведя серию последовательных измерений мощности дозы в одной и той же точке на протяжении нескольких лет, можно аппроксимировать зависимость *DR(t)* от времени одной экспонентой [выражение (4)] и вычислить T_{eff} и T_{eco} [6]. Выполненные в работе Ramzaev et al. [6] оценки выявили существенную разницу между локациями в отношении значений T_{eco}. Одновременно было указано на необходимость более длительного наблюдения за динамикой мощности дозы в воздухе, т.к. значения T_{eco} могли достигать величины десятков или даже сотен лет и отличались высокой неопределенностью.

Цель исследования – уточнение результатов, полученных в [6], и определение T_{eff} и T_{eco} на основе результатов, полученных за более длительный период наблюдений после аварии на ЧАЭС (1998–2012 гг.), применительно к типичным локациям сельских населенных пунктов юго-западных районов Брянской области России.

Материалы и методы

Исследования были проведены на территории Злынковского, Клинцовского и Новозыбковского районов Брянской области в период 1998–2012 гг. Всего было обследовано 14 сельских населенных пунктов (н.п.) и один городской н.п., – г. Новозыбков. Перечень н.п., в ареалах которых проводили работы, представлен в таблице 1. Эта таблица также содержит официальные данные [8–10] о плотности загрязнения территории н.п. ^{137}Cs (σ_{Cs}, кБк/м^2) для 1986, 2001 и 2014 гг. Можно видеть, что начальные уровни загрязнения были весьма высокими и все н.п. попали в зону отселения (σ_{Cs} > 555 кБк/м^2). Выбор сильно загрязненных н.п. для наших исследований не был случайным, т.к. долговременные наблюдения требовали значений DR, надежно регистрируемых на протяжении всего периода времени наблюдений.

Сопоставление уровней загрязнения в различные годы (колонки 5 и 6 в таблице 1) показывает, что уменьшение запаса (плотности загрязнения) ^{137}Cs на территории н.п. происходило в близком соответствии с законом радиоактивного распада радионуклида. Для радиоактивного распада доля σ_{Cs} в 2005 г. (на 1 января) и 2014 г. (на 1 января) равняется, 0,65 и 0,53 соответственно, относительно показателя 1986 г. (на 10 мая).

Измерения были проведены в восьми типичных локациях, использованных ранее при оценке доз облучения населения после Чернобыльской аварии [1, 5, 6]: 1) целинные участки почвы (луга), расположенные вне н.п.; 2) целинные участки почвы, расположенные внутри н.п.; 3) леса; 4) пахотные поля; 5) огороды; 6) прочие земляные поверхности (земляные дворы рядом с жилыми домами); 7) жилые одноэтажные деревянные дома; 8) асфальтированные поверхности (улицы, дороги, дворы рядом с жилыми домами). В городе Новозыбков измерения проводили на окраине в той части, где застройка соответствовала таковой в сельских н.п. Количество точек наблюдения в локациях находилось в диапазоне от 6 до 19 (всего 103 точки). Серии измерений в отдельных точках были начаты в период 1998–2001 гг. и закончены в 2009–2012 гг. В среднем продолжительность серии была равна 11,1 года. В каждой точке было записано в среднем по 13 спектров. Измерения проводили в весенне-осенний период ежегодно (за исключением 2011 г.), в отсутствие снежного покрова (в отдельные годы в некоторых точках по два-три раза в год).

Для измерения мощности поглощенной дозы в воздухе (нГр/ч) использовали переносной спектрометр-дозиметр гамма-излучения МКС-СК1 «СКИФ» фирмы «Синко» (Санкт-Петербург, Россия) [11]. Спектрометр-дозиметр «СКИФ» имел сцинтилляционный детектор с цилиндрическим кристаллом NaI(Tl) размером 63 мм × 63 мм и 480-канальный анализатор импульсов. Детектор был размещен в защитном футляре. Процедура калибровки прибора для измерения общей мощности дозы и последующего определения вклада природной и чернобыльской компоненты в величину общей мощности дозы приведены в работах

Таблица 1

Список населенных пунктов, обследованных в Брянской области в 1998–2012 гг., и официально установленные средние значения плотности загрязнения почвы ^{137}Cs (σ_{Cs}) в населенных пунктах [8–10]

[Table 1

List of settlements surveyed in the Bryansk region in 1998–2012 and the officially determined mean values of ^{137}Cs soil contamination density (σ_{Cs}) for the settlements [8–10]]

Населенный пункт [Settlement]	Плотность загрязнения ^{137}Cs (кБк/м^2) [^{137}Cs contamination density (kBq/m^2)]			Отношение плотностей загрязнения ^{137}Cs [^{137}Cs contamination densities ratio]	
	1986 г. [1986 y]	2005 г. [2005 y]	2014 г. [2014 y]	2005 г./1986 г. [2005 y/1986 y]	2014 г./1986 г. [2014 y/1986 y]
Ущерпье [Uscherpie]	656	452	370	0,69	0,56
Мамай [Mamay]	684	465	377	0,68	0,55
Синявка [Sinavka]	696	459	392	0,66	0,56
Новозыбков [Novozybkov]	697	471	396	0,68	0,57
Дубровка [Dubrovka]	784	532	433	0,68	0,55
Веприн [Veprin]	853	564	459	0,66	0,54
Новые Бобовичи [Novie Bobovichi]	1090	729	592	0,67	0,54
Ясная Поляна [Yasnaya Polyana]	1100	676	551	0,61	0,50
Муравинка [Muravinka]	1130	729	592	0,65	0,52
Деменка [Demenka]	1170	780	636	0,67	0,54
Барки [Barki]	1200	750	611	0,63	0,51
Грива [Griva]	1210	801	651	0,66	0,54
Старый Вышков [Stary Vishkov]	1470	1060	847	0,72	0,58
Святск [Svyatsk]	1490	963	751	0,65	0,50
Бабаки [Babaki]	2190	1410	1140	0,64	0,52
Средняя [Mean]	1100	723	587	0,66	0,54
Стандартное отклонение [Standard deviation]	411	266	210	0,03	0,02

[12, 13]. Небольшой и постоянно снижающийся со временем вклад гамма-излучения ^{134}Cs (около 2% в начале серии измерений) был вычтен.

Для измерений детектор вывешивали на алюминиевом треножнике на высоте 1 м над подстилающей поверхностью (иллюстрация приведена в [14]). Продолжительность набора спектра находилась в диапазоне от 200 с до 600 с (типично 300 с). Статистическая неопределенность оценки мощности поглощенной дозы в воздухе от ^{137}Cs в подавляющем большинстве случаев не превышала 5% и во всех случаях была менее 15% (2 ст. откл.). Отклонение точки расположения треноги в последующие годы от изначально выбранной точки не превышало 5 м для локации «пахотное поле»; для остальных локаций этот показатель был менее 2 м.

Статистический анализ полученных результатов включал в себя вычисление средней, медианы, стандартного отклонения. Различия между группами исследовали с помощью непараметрического критерия Манна – Уитни.

Результаты и обсуждение

В начальный момент времени (1998–2001 гг.) значения мощности поглощенной дозы в воздухе гамма-излучения ^{137}Cs [*DR(t)*] находились в диапазоне от 40 до 2020 нГр/ч. Значения *DR(t)* для отдельных локаций приведены в таблице 2. Как видно из данных таблицы 2, максимальные значения были зарегистрированы над целинными почвами, расположенными вне н.п., и в лесах, а минимальные – внутри домов и над асфальтированными поверхностями. Такое распределение локаций в отношении мощности дозы в воздухе от чернобыльского цезия соответствует данным и оценкам, полученным другими авторами на территориях, загрязненных в результате Чернобыльской аварии [1, 2, 6, 7]. К концу наших наблюдений (2009–2012 гг.) *DR(t)* уменьшилась (см. табл. 2) во всех точках, в среднем на 33% (диапазон 6–64%).

По результатам измерений в каждой серии были построены зависимости *DR(t)* от времени, прошедшего с 1 января 1998 г. (момент времени t = 0). Динамика уменьшения мощности дозы в воздухе во всех точках хорошо аппроксимировалась экспоненциальной зависимостью от времени [выражение (4)]. Примеры результатов измерений и их экспоненциальной аппроксимации приведены на рисунке 1. Коэффициент детерминации (R^2) был высоким и в среднем для 103 мест наблюдения составил 0,858 (диапазон 0,495–0,977). Наблюдаемый разброс результатов измерений относительно линии аппроксимации можно объяснить комбинацией таких факторов, как: 1) статистическая погрешность измерений общей мощности дозы и вычисления *DR(t)*; 2) некоторая

Таблица 2

Мощность поглощенной дозы в воздухе от ^{137}Cs для первого измерения (1998–2001 гг.) и последнего измерения (2009–2012 гг.) в серии наблюдений в выбранных локациях в Брянской области в 1998–2012 гг.

[Table 2

Absorbed dose rates in air from ^{137}Cs for the first measurement (1998–2001) and the last measurement (2009–2012) in series of observations at the selected locations in the Bryansk region in 1998–2012]

Локация [Location]	n	Мощность поглощенной дозы в воздухе от ^{137}Cs (нГр/ч) [Absorbed dose rate in air from ^{137}Cs (nGy/h)]			
		1998–2001 гг. [1998–2001]		2009–2012 гг. [2009–2012]	
		Диапазон [Range]	Средняя ± С.о. [Mean ± s.d.]	Диапазон [Range]	Средняя ± С.о. [Mean ± s.d.]
Лес [Forest]	23	359 – 1110	736 ± 215	260 – 709	463 ± 120
Целинная почва вне населенного пункта [Virgin soil outside settlement]	15	576 – 2020	1120 ± 421	319 – 1420	679 ± 326
Пахотное поле [Arable field]	22	141 – 655	350 ± 177	100 – 517	266 ± 148
Целинная почва внутри населенного пункта [Virgin soil inside settlement]	6	632 – 824	719 ± 69	376 – 632	454 ± 93
Земляной двор [Earthen yard]	8	135 – 427	281 ± 113	87 – 269	167 ± 63
Огород [Kitchen garden]	10	166 – 576	360 ± 135	130 – 455	268 ± 105
Асфальтированная поверхность [Asphalted area]	12	60 – 317	138 ± 81	41 – 225	95 ± 59
Деревянный дом [Wooden house]	7	38 – 100	77 ± 22	26 – 70	53 ± 15

n – число обследованных точек [n – number of sites surveyed].
С.о. – стандартное отклонение [s.d. – standard deviation].

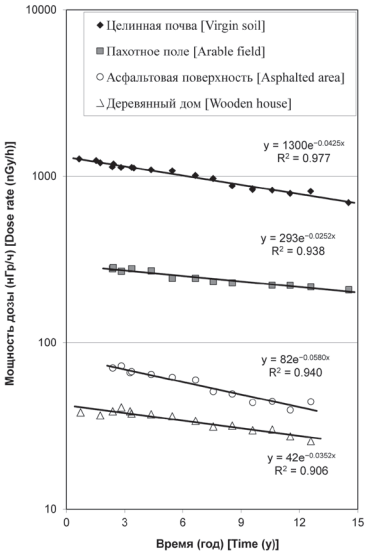

Рис. 1. Примеры экспериментальных значений мощности поглощенной дозы в воздухе от ^{137}Cs и экспоненциальные кривые, соответствующие данным для индивидуальных точек наблюдения. Измерения проводились в период 1998–2012 гг. на лугу (целинная почва), расположенном вблизи села Муравинка, на пахотном поле, расположенном недалеко от деревни Веприн, и в городе Новозыбков на улице (асфальтовая поверхность) и внутри деревянного дома. 1 января 1998 г. взято в качестве нулевой точки на оси времени [**Fig. 1.** Examples of experimental values of absorbed dose rate in air from ^{137}Cs and exponential fits to the data for individual sites. The measurements were performed in the period 1998–2012 at a meadow (virgin soil) located near the village Muravinka, at an arable field located near the village Veprin, and at a street (asphalted area) and in a wooden house in the town Novozybkov. The first of January 1998 is defined as the zero point in the time axis]

вариабельность размещения спектрометра на площадке в разные годы; 3) изменения влажности почвы и, соответственно, мощности дозы гамма-излучения на протяжении коротких промежутков времени (см., например, [15]).

Значения постоянной эффективного уменьшения *DR(t)*, λ_{eff}, в 103 пунктах наблюдения находились в диапазоне от 0,0252 год$^{-1}$до 0,0734 год$^{-1}$, что соответствует скорости снижения *DR(t)* от 2,52% до 7,34% в год.

Вычисленные [выражение (5)] значения эффективного период полууменьшения *DR(t)*, T_{eff}, варьировали от 9,4 до 27,5 лет. Соответственно, вычисленные [выражение (6)] значения экологического периода полууменьшения *DR(t)*, T_{eco}, лежали в диапазоне от 14 до 320 лет. Столь широкий диапазон значений может быть объяснен различиями в скорости уменьшения *DR(t)* как между отдельными точками внутри одной и той же локации, так и между разными локациями (табл. 3).

Для целинных участков почвы, расположенных вне н.п., среднее значение T_{eco} равнялось 34 годам. Целинные участки почвы используются в качестве референтной локации (референтного места) при моделировании распределения доз внешнего облучения в различных локациях после аварии на ЧАЭС и проведении дозовых оценок [1, 5, 16]. На основе анализа вертикальных распределений ^{137}Cs в почве Golikov et al. [1] пришли к заключению, что применительно к Брянской области динамика *DR(t)* (в части природной миграции) может быть описана суммой двух экспонент, имеющих значения T_{eco} 2,4 года [короткий период полууменьшения *DR(t)*] и 37 лет [длинный период полууменьшения *DR(t)*]. Последнее значение хорошо соответствует полученному нами среднему (34 года) и медианному (33 года) значению T_{eco} для целинных участков почвы вне н.п. в отдаленном периоде времени после аварии. Такое совпадение в определенной мере связано с тем, что в изученный нами период времени (1998–2012 гг.) влия-

Таблица 3

Эффективный период полууменьшения мощности дозы от ^{137}Cs (T_{eff}) и экологический период полууменьшения мощности дозы от ^{137}Cs (T_{eco}) для выбранных локаций в Брянской области в 1998–2012 гг.

[Table 3

^{137}Cs-dependent dose rate effective half-live (T_{eff}) and ^{137}Cs-dependent dose rate ecological half-live (T_{eco}) for the selected locations in the Bryansk region in 1998–2012]

Локация [Location]	n	T_{eff} (год) [T_{eff} (y)]			T_{eco} (год) [T_{eco} (y)]		
		Диапазон [Range]	Медиана [Median]	Средняя ± С.о. [Mean ± s.d.]	Диапазон [Range]	Медиана [Median]	Средняя ± С.о. [Mean ± s.d.]
Лес [Forest]	23	13 – 19	16	16 ± 2	22 – 54	36	37 ± 9
Целинная почва вне населенного пункта [Virgin soil outside settlement]	15	11 – 20	16	16 ± 2	18 – 57	33	34 ± 11
Пахотное поле [Arable field]	22	16 – 28	21	21 ± 3	34 – 320	70	93 ± 71
Целинная почва внутри населенного пункта [Virgin soil inside settlement]	6	10 – 18	15	15 ± 3	15 – 42	31	30 ± 11
Земляной двор [Earthen yard]	8	9,4 – 22	14	15 ± 4	14 – 77	28	33 ± 20
Огород [Kitchen garden]	10	16 – 26	23	22 ± 3	33 – 200	89	99 ± 56
Асфальтированная поверхность [Asphalted area]	12	12 – 26	18	18 ± 4	20 – 220	46	60 ± 54
Деревянный дом [Wooden house]	7	13 – 23	18	17 ± 4	22 – 96	46	45 ± 26

n – число обследованных точек [n – number of sites surveyed].
С.о. – стандартное отклонение [s.d. – standard deviation].

ние быстрой компоненты на динамику мощности дозы в воздухе уже является пренебрежимо малым. Аналогичные средние и медианные значения T_{eco} были вычислены нами для земляных дворов и участков целинной почвы, расположенных внутри н.п., а также для лесов (см. табл. 3). Статистически значимых различий между этими локациями и целинными участками почвы, расположенными вне н.п., не было найдено (тест Манна – Уитни, P > 0,05). Не было обнаружено и статистически значимой разницы (P > 0,05) между асфальтированными поверхностями и целинными участками почвы, хотя и среднее (60 лет), и медианное (46 лет) значения T_{eco} для заасфальтированных площадок заметно превышали таковые для целинных лугов. Не было найдено различий (P > 0,05) также между целинными участками почвы и деревянными домами. Значения T_{eco} для пахотных полей и огородов были в 2–3 раза больше, чем таковое для целинных участков почвы (см. табл. 3). Здесь различия были уже статистически значимыми (тест Манна – Уитни, P < 0,01).

С учетом полученных значений T_{eco} для мощности дозы гамма-излучения в типичных локациях (см. табл. 3), можно оценить значения экологического периода полууменьшения эффективной дозы внешнего облучения (T_{eco}) для сельского населения, которое проживает в деревянных домах. Для этих вычислений мы использовали нормированные (на плотность загрязнения территории ^{137}Cs) значения *DR(t)*, полученные в работе [6] для типичных локаций на летний период 1996–2001 гг., и значения доли времени (так называемый «фактор поведения»), которую человек проводит в каждой из локаций также в летний период [7]. Оценка была выполнена для трех групп жителей, выделенных в работе В.Ю. Голикова [7]: 1) работающие, преимущественно внутри помещений (группа 1 – например, служащие, продавцы, учителя), 2) работающие, преимущественно вне помещений (группа 2 – сельскохозяйственные рабочие), 3) пенсионеры. Для выполнения расчетов были приняты следующие допущения: 1) доля времени, которую человек проводит вне помещения в жилой зоне, распределена равномерно между огородом и двором; 2) двор в жилой зоне имеет земляное покрытие; 3) значения *DR(t)* для жилого дома и рабочего помещения одинаковы; 4) значения T_{eco} для жилого дома и помещения в рабочей зоне одинаковы; 5) двор в рабочей зоне имеет твердое покрытие, и значения *DR(t)* и T_{eco} равны таковым для других заасфальтированных поверхностей.

Используем следующий алгоритм. Вычисляем нормированную месячную дозу внешнего облучения человека в точке времени *t* (t = 0 соответствует 1 июня 1998 г.):

$$E_i(t) = 10^{-3} \times 720 \times k \times \sum_j DR_j(t) \times p_{ij}\ , \quad (7)$$

где $E_i(t)$ – месячная доза внешнего облучения представителя i-й группы населения в момент времени *t*, нормированная на плотность загрязнения территории ^{137}Cs [(мЗв/месяц)/(МБк/м^2)]; $DR_j(t)$ – мощность поглощенной дозы гамма-излучения в воздухе в j-й локации в момент времени *t*, нормированная на плотность загрязнения территории ^{137}Cs [(нГр/ч)/(кБк/м^2)]; p_{ij} – фактор поведения для представителя i-й группы населения в j-й локации (безразмерная величина); *k* – коэффициент перехода от поглощенной дозы в воздухе к эффективной дозе облучения человека (0,72 Зв/Гр [17]); 720 – количество часов в месяце; 10^{-3} – фактор перевода [(нГр/ч)/(кБк/м^2)] в [(мГр/ч)/(МБк/м^2)].

Значение мощности дозы в воздухе в каждой из локаций для интересующей нас точки времени *t* (например, 5 лет) вычисляем, используя значения T_{eco} из таблицы 3:

$$DR_j(t) = DR_j(0) \times \exp(-\frac{\ln 2 \times t}{T_{eco(j)}})\ , \quad (8)$$

где $DR_j(t)$ – мощность поглощенной дозы гамма-излучения в воздухе в j-й локации в момент времени t > 0, нор-

мированная на плотность загрязнения территории ^{137}Cs [(нГр/ч)/(кБк/м²)]; $DR_j(0)$ – мощность поглощенной дозы гамма-излучения в воздухе в j-й локации в момент времени 0, нормированная на плотность загрязнения территории ^{137}Cs [(нГр/ч)/(кБк/м²)]; $T_{eco(j)}$ – экологический период полуумеьшения мощности поглощенной дозы гамма-излучения в воздухе в j-й локации (год); t – время, прошедшее от первого измерения в момент $t = 0$ (год).

По результатам расчетов были построены зависимости E_i от времени, прошедшего с момента времени $t = 0$ (рис. 2). Интервал между точками равен 1 году. Как видно из рисунка 2, динамику месячной эффективной дозы в летний период (июнь) для всех трех групп можно аппроксимировать одной экспонентой:

$$E_i(t) = E_i(0) \times \exp(-\lambda^E_{eco} \times t) \text{ , (9)}$$

где $E_i(t)$ – месячная доза внешнего облучения представителя i-й группы населения в момент времени $t > 0$, нормированная на плотность загрязнения территории ^{137}Cs [(мЗв/месяц)/(МБк/м²)]; $E_i(0)$ – месячная доза внешнего облучения представителя i-й группы населения в момент времени $t = 0$, нормированная на плотность загрязнения территории ^{137}Cs [(мЗв/месяц)/(МБк/м²)]; λ^E_{eco} – экологическая постоянная снижения эффективной дозы внешнего облучения (год⁻¹); t – время, прошедшее от первого измерения в момент t = 0 (год).

Значение экологического периода (год) полуумеьшения эффективной дозы внешнего облучения (T_{eco}) вычисляем, используя выражение:

$$T^E_{eco} = \frac{\ln 2}{\lambda^E_{eco}}, \text{ (10)}$$

где λ^E_{eco} – экологическая постоянная снижения эффективной дозы внешнего облучения (год⁻¹).

Для группы 1 (работающие внутри помещений) группы 2 (работающие вне помещений) и пенсионеров значения T^E_{eco} оценены величиной 50, 54 и 49 лет соответственно. Округленное значение T^E_{eco}, равное 50 годам, может быть принято в качестве репрезентативной величины для взрослого населения, проживающего в деревянных домах в юго-западных районах Брянской области. Таким образом, в среднем скорость экологического уменьшения дозы внешнего облучения равна 1,4% в год. С учетом радиоактивного распада ^{137}Cs (2,3% в год) можно принять, что доза внешнего облучения населения от чернобыльского загрязнения будет снижаться на 3,7% в год.

Выведенное нами значение скорости уменьшения эффективной дозы внешнего облучения сельского населения в отдаленном периоде после Чернобыльской аварии (1998–2012 гг.) меньше, чем наиболее вероятное значение – 8% в год (при диапазоне 2–16% в год), предсказанное в работе Thornberg et al. [18] по результатам индивидуальных дозиметрических исследований, которые были выполнены в Брянской области в период 1990–2000 гг. Вместе с тем, наша усредненная оценка T^E_{eco} (50 лет) очень хорошо совпадает с оценкой, которая была ранее дана В.Ю. Голиковым [7] для медленной компоненты (50 лет) снижения эффективной дозы внешнего облучения взрослого человека по результатам индивидуального дозиметрического контроля, проведенного в двух сельских населенных пунктах Брянской области в 1991–2003 гг.

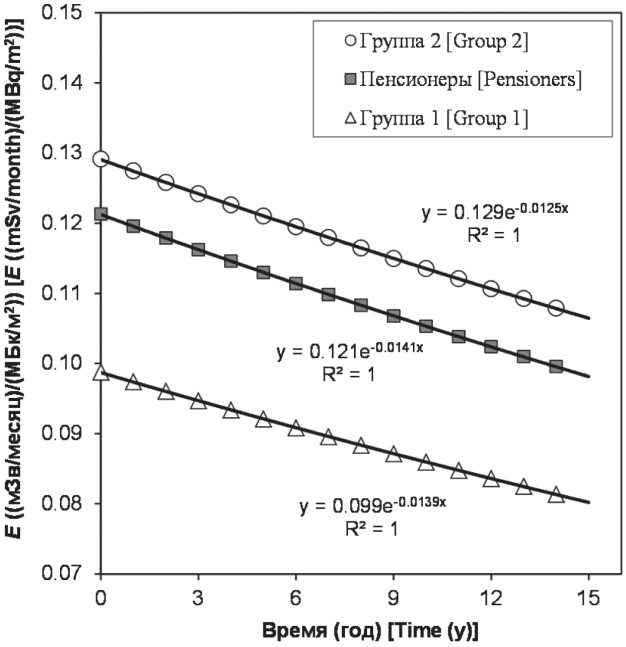

Рис. 2. Динамика месячной эффективной дозы внешнего облучения от ^{137}Cs (E) в летний период 1998–2012 гг., нормированной на плотность загрязнения территории ^{137}Cs, (мЗв/мес.)/(МБк/м²). Оценки приведены для трех групп взрослых жителей Брянской области: группа 1 (работающие преимущественно внутри помещений), группа 2 (работающие преимущественно вне помещений) и пенсионеры. Нулевая точка на оси времени соответствует 1 июня 1998 г.
[**Fig. 2.** Dynamics of the monthly effective external dose from ^{137}Cs (E) in the summer of 1998–2012, normalized to the density of contamination of the territory with ^{137}Cs, (mSv/month)/(MBq/m²). The estimates are given for three groups of adult residents of the Bryansk region: Group 1 (working mainly indoors), Group 2 (working mainly outdoors) and Pensioners. The zero point on the time axis corresponds to June 1, 1998]

Выводы

1. В период 1998–2012 гг. в типичных локациях сельских населенных пунктов Злынковского, Клинцовского и Новозыбковского районов Брянской области России были проведены мониторинговые измерения мощности дозы гамма-излучения в воздухе с использованием полевого гамма-спектрометра дозиметра. Для 103 точек наблюдения выполнена оценка скорости снижения мощности дозы гамма-излучения от ^{137}Cs.

2. Значения экологического периода полуумеьшения мощности дозы гамма-излучения в воздухе, вычисленные для отдельных точек, лежали в диапазоне от 14 до 320 лет, а для отдельных локаций составляли: 34 года (целинные участки почвы, расположенные вне н.п.), 30 лет (целинные участки почвы, расположенные внутри н.п.), 37 лет (леса), 93 года (пахотные поля), 99 лет (огороды), 33 года (прочие земляные поверхности), 45 лет (деревянные дома), 60 лет (асфальтированные поверхности).

3. Полученные значения скорости уменьшения мощности дозы гамма-излучения в воздухе в обследованных локациях были использованы для оценки значения экологического периода полуумеьшения эффективной дозы внешнего облучения для сельского населения, которое

проживает в деревянных домах. В среднем оно оказалось равным 50 годам. С учетом радиоактивного распада ^{137}Cs можно ожидать, что доза внешнего облучения сельского населения от чернобыльского загрязнения будет снижаться примерно на 4% в год.

4. Полученные значения скорости снижения мощности дозы гамма-излучения в воздухе могут быть использованы для ретроспективной и проспективной оценки значений мощности эффективной дозы и накопленной дозы внешнего облучения сельского населения Брянской области России в отдаленном периоде после Чернобыльской аварии. При этом для вычисления годовых доз следует учитывать сезонные (зима/лето) вариации как мощности дозы гамма-излучения в воздухе, так и режима поведения человека.

Литература

1. Golikov V.Yu., 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, No. 10. P. 185–193.
2. Радиационно-гигиенические аспекты преодоления последствий аварии на Чернобыльской АЭС / под ред. акад. РАН Г.Г. Онищенко и проф. А.Ю. Поповой. СПб.: НИИРГ им. проф. П.В. Рамзаева, 2016. Т. 1. 488 с.
3. Брук Г.Я., Базюкин А.Б., Барковский А.Н., и др. Облучение населения Российской Федерации вследствие аварии на Чернобыльской АЭС и основные направления дальнейшей работы на предстоящий период // Радиационная гигиена. 2014. Т. 7, № 4. С. 78–83.
4. Брук Г.Я., Базюкин А.Б., Братилова А.А., Яковлев В.А. Закономерности формирования и прогноз доз внутреннего облучения населения Российской Федерации и его критических групп в отдаленный период после аварии на Чернобыльской АЭС // Радиационная гигиена. 2019. Т. 12, № 2 (Спецвыпуск). С. 66–74.
5. Jacob P., Prohl G., Likhtarev I., Kovgan L., Gluvchinsky R., Perevoznikov O., et al. Pathway Analysis and Dose Distributions. European Commission, Brussels: 1996. EUR 16541 EN. 130 p.
6. Ramzaev V., Yonehara H., Hille R., Barkovsky A., Mishine A., Sahoo S.K., 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.
7. Golikov V.Yu. Analysis of the long-term dynamics of external doses of the population after the Chernobyl accident // Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene. 2018. Vol. 11, No. 4. P. 39–50.

Балонов М.И., Савкин М.Н., Питкевич В.А., и др. Средние эффективные накопленные дозы // Радиация и риск. 1999. Специальный выпуск. С. 1–125.

8. Брук Г.Я., Балонов М.И., Голиков В.Ю., и др. Средние накопленные за 1986–2005 годы эффективные дозы облучения жителей населенных пунктов Брянской, Калужской, Орловской и Тульской областей Российской Федерации, отнесенных к зонам радиоактивного загрязнения по постановлению правительства Российской Федерации № 1582 от 18 декабря 1997 года «Об утверждении перечня населенных пунктов, находящихся в границах зон радиоактивного загрязнения вследствие катастрофы на Чернобыльской АЭС» // Радиация и риск. 2007. Т. 16, № 1. С. 3–73.
9. Брук Г.Я., Базюкин А.Б., Братилова А.А., и др. Средние годовые эффективные дозы облучения в 2014 году жителей населенных пунктов Российской Федерации, отнесенных к зонам радиоактивного загрязнения вследствие катастрофы на Чернобыльской АЭС (для целей зонирования населенных пунктов) // Радиационная гигиена. 2015. Т. 8, № 2. С. 32–128.
10. Спектрометры-дозиметры гамма и рентгеновского излучения МКС-СК1 «СКИФ»: https://all-pribors.ru/opisanie/19630-00-mks-sk1-skif-14822 (дата обращения: 09.11.2019 г.).
11. 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 // Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene. 2015. Vol. 8, No. 3. P. 6–20.
12. Рамзаев В.П., Голиков В.Ю. Сравнение расчетных и измеренных значений мощности кермы в воздухе над почвой, загрязненной ^{137}Cs // Радиационная гигиена. 2015. Т. 8, № 4. С. 42–51.
13. Ramzaev V., Barkovsky A., Mishine A., Andersson K.G. Decontamination tests in the recreational areas affected by the Chernobyl accident: efficiency of decontamination and long-term stability of the effects. Journal of the Society for Remediation of Radioactive Contamination in the Environment. 2013. Vol. 1, No. 2. P. 93–107. Available from: http://khjosen.org/journal/FullText/Vol1/V1N2-RAMZAEV-full.pdf (дата обращения: 12.12.2019 г.).
14. Roed J., Lange C.L., Andersson K.G., et al. Decontamination in a Russian Settlement. Risø National Laboratory report Risø-R-870 (EN). Risø National Laboratory, Roskilde, Denmark, 1996. Available from: https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/27/053/27053487.pdf?r=1&r=1 (дата обращения 12.12.2019 г.).
15. Bailiff I.K., Slim H.A. Development of reference database for gamma dose assessment in retrospective luminescence dosimetry // Radiation Measurements. 2008. Vol. 43. P. 859–863.
16. 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, No. 4. P. 375–382.
17. Thornberg C., Vesanen R., Wallström E., et al. External and internal irradiation of a rural Bryansk (Russia) population from 1990 to 2000, following high deposition of radioactive caesium from the Chernobyl accident // Radiation and Environmental Biophysics. 2005. Vol. 44, No. 2. P. 97–106.

Поступила: 15.12.2019 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

Для цитирования: Рамзаев В.П., Барковский А.Н. Динамика уменьшения мощности дозы гамма-излучения в воздухе в сельских населенных пунктах Брянской области России в отдаленном периоде после Чернобыльской аварии // Радиационная гигиена. 2020. Т. 13, № 1. С. 38–46. DOI: 10.21514/1998-426X-2020-13-1-38-46

Dynamics of decrease of the gamma dose rate in air in rural settlements of the Bryansk region (Russia) in the remote period after the Chernobyl accident

Valery P. Ramzaev, Anatoly N. Barkovsky

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

The aim of this study was to determine the dynamics of decrease of the dose rate of gamma radiation in air from ^{137}Cs in typical rural locations in the remote period after the Chernobyl accident. The dose rate measurements were performed in the areas of 15 settlements of the Zlynka, Klintsy and Novozybkov districts of the Bryansk region of Russia in the period 1998–2012. After the accident in 1986, the density of contamination of the territory with ^{137}Cs in all settlements was higher than the value of 555 kBq/m^2. Monitoring measurements of the dose rate were performed in eight locations commonly used in assessing the radiation doses to the rural population after the Chernobyl accident: 1) virgin soils (meadows) located outside settlements, 2) virgin soils located inside settlements, 3) forests, 4) arable fields, 5) kitchen gardens, 6) other ground surfaces (earthen yards next to residential buildings), 7) single-story wooden houses, 8) asphalted areas (streets, roads, courtyards next to residential buildings). The number of observation sites in individual locations ranged from 6 to 19 (a total of 103 sites). Series of measurements at individual sites were launched in the period 1998–2001 and completed in 2009–2012. On average, the duration of the series was 11.1 years. The measurements were made in the spring-autumn period annually (in some years at some sites two to three times a year) using a portable gamma-ray spectrometer-dosimeter. In the initial period of the study (1998–2001), the values of the absorbed dose rate in air from ^{137}Cs were in the range from 40 to 2020 nGy/h. The maximum values were recorded in virgin meadows and forests, and the minimum ones were observed inside houses and over asphalted surfaces. By the end of our series of observations (2009–2012), the dose rate decreased at all sites, by an average of 33% (range 6–64%). The values of the ecological period of half-reduction of the dose rate, calculated for individual sites, ranged from 14 to 320 years and averaged 34 years (virgin soils located outside settlements), 30 years (virgin soils located inside settlements), 37 years (forests), 93 years (arable fields), 99 years (kitchen gardens), 33 years (other earth surfaces), 45 years (wooden houses), 60 years (asphalted areas). The deduced values of the rate of decrease of the dose rate of gamma radiation in the air in the surveyed locations were used to estimate the ecological period of the half-reduction of the effective external dose for rural population living in wooden houses. On average, this period was equal to 50 years. Given the radioactive decay of ^{137}Cs, we can expect that the external dose from Chernobyl ^{137}Cs to the rural population will decrease by approximately 4% per year. Our estimate of the rate of decrease of the external effective dose from ^{137}Cs in the remote period after the Chernobyl accident is in agreement with the estimates that were previously given by other authors for the slow component of decreasing external doses from ^{137}Cs to adults living in rural settlements of the Bryansk region.

Key words: *Chernobyl, ^{137}Cs, gamma radiation, absorbed dose rate in air, effective dose.*

References

1. Golikov VYu, 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(10): 185–193.
2. Radiological and Hygienic Issues of the Mitigation of the Chernobyl NPP Accident Consequences. Eds.: Onishchenko GG, Popova AYu. St.-Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene after Professor P.V. Ramzaev. 2016; 1. 448 p. (In Russian).
3. Bruk GYa, Bazyukin AB, Barkovsky AN, Bratilova AA, Vlasov AYu, Goncharova YuN, et al. The exposure for populations of the Russian Federation due to the Chernobyl accident and main directions of further work in the coming period.

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

Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene. 2014;7(4): 78–83 (In Russian).

4. Bruk GYa, Bazyukin AB, Bratilova AA, Yakovlev VA. Trends of development and prediction of the doses from the internal exposure of the public of the Russian Federation and its critical groups in the distant post-Chernobyl NPP accident period. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2019;12(2) (Special issue): 66–74 (In Russian).
5. Jacob P, Prohl G, Likhtarev I, Kovgan L, Gluvchinsky R, Perevoznikov O, et al. Pathway Analysis and Dose Distributions. European Commission, Brussels: 1996. EUR 16541 EN. 130 p.
6. 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.
7. Golikov VYu. Analysis of the long-term dynamics of external doses of the population after the Chernobyl accident. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2018;11(4): 39–50.
8. Balonov MI, Savkin MN, Pitkevich VA, Schukina NV, Podleschuk VB, Ogorodnikova GV, et al. Mean effective cumulated doses. *Radiation and Risk*. 1999;(Special issue): 1–125 (In Russian).
9. Bruk GYa, Balonov MI, Golikov VYu, Bazyukin AB, Romanovich IK, Shutov VN, et al. The average effective doses accumulated during 1986–2005 for the residents of the settlements of the Bryansk, Kaluga, Oryol and Tula regions of the Russian Federation, assigned to the zones of radioactive contamination by decree of the Government of the Russian Federation No. 1582 of December 18, 1997 “On approval of the list of settlements located in the boundaries of the zones of radioactive contamination due to the catastrophe at the Chernobyl nuclear power plant. *Radiation and Risk*. 2007;16(1): 3–73 (In Russian).
10. Bruk GYa, Bazyukin AB, Bratilova AA, Vlasov AYu, Goncharova YuN, 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), 2014. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2015;8(2): 32–128 (In Russian).
11. MKS-SK1 «SKIF» x-ray and gamma radiation spectrometer-dosimeters. – Available from: https://all-pribors.ru/opisanie/19630-00-mks-sk1-skif-14822 [Accessed 09 November 2019] (In Russian).
12. 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.
13. Ramzaev VP, Golikov VYu. A comparison of measured and calculated values of air kerma rates from ^{137}Cs in soil. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2015;8(4): 42–51 (In Russian).
14. Ramzaev V, Barkovsky A, Mishine A, Andersson KG. Decontamination tests in the recreational areas affected by the Chernobyl accident: efficiency of decontamination and long-term stability of the effects. *Journal of the Society for Remediation of Radioactive Contamination in the Environment*. 2013;1(2): 93–107. Available from: http://khjosen.org/journal/FullText/Vol1/V1N2-RAMZAEV-full.pdf [Accessed 12 December 2019].
15. Roed J, Lange CL, Andersson KG, Prip H, Olsen S, Ramzaev V, et al. Decontamination in a Russian Settlement. Ris National Laboratory report Risø-R-870 (EN). Risø National Laboratory, Roskilde, Denmark. 1996. Available from: https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/27/053/27053487.pdf?r=1&r=1 [Accessed 12 December 2019].
16. Bailiff IK, Slim HA. Development of reference database for gamma dose assessment in retrospective luminescence dosimetry. *Radiation Measurements*. 2008;43: 859–863.
17. 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(4): 375–382.
18. Thornberg C, Vesanen R, Wallström E, Zvonova I, Zhesko T, Balonov M, et al. External and internal irradiation of a rural Bryansk (Russia) population from 1990 to 2000, following high deposition of radioactive caesium from the Chernobyl accident. *Radiation and Environmental Biophysics*. 2005;44(2): 97–106.

Received: December 15, 2019

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 Well-Being (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.

For citation: Ramzaev V.P., Barkovsky A.N. Dynamics of decrease of the gamma dose rate in air in rural settlements of the Bryansk region (Russia) in the remote period after the Chernobyl accident. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2020. Vol. 13, No 1. P. 38-46. (In Russian). DOI: 10.21514/1998-426X-2020-13-1-38-46