

УДК 539.163:546.36 (539.166.3+502.521+630\*81)

## ИЗМЕНЕНИЕ РАДИАЦИОННОЙ ОБСТАНОВКИ В СОСНЯКАХ МШИСТЫХ В ЗОНЕ ОТЧУЖДЕНИЯ ЧЕРНОБЫЛЬСКОЙ АЭС

© 2021 г. Д. К. Гарбарук<sup>1,\*</sup>, А. В. Углынец<sup>1</sup>, М. В. Кудин<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Государственное природоохранное научно-исследовательское учреждение “Полесский государственный радиационно-экологический заповедник”, Хойники, Республика Беларусь

\*E-mail: dima.garbaruk.77@mail.ru

Поступила в редакцию 18.03.2021 г.

После доработки 20.06.2021 г.

Принята к публикации 30.06.2021 г.

Возобновление исследований на постоянных пунктах наблюдения радиационно-экологического мониторинга позволило оценить изменение радиационной обстановки в сосняках мшистых ближней зоны Чернобыльской АЭС через 30 лет после аварии. Выявлены особенности динамики мощности дозы  $\gamma$ -излучения, плотности загрязнения почв  $^{137}\text{Cs}$ , очищения древесины и коры сосны от  $^{137}\text{Cs}$  за последние 20–25 лет. Установлено, что снижение этих показателей протекает быстрее радиоактивного распада и сделанных ранее прогнозов. Даны уточненные прогнозы. Определены основные факторы, влияющие на изменение радиационной обстановки в сосняках мшистых зоны отчуждения Чернобыльской АЭС.

**Ключевые слова:**  $^{137}\text{Cs}$ , мощность дозы, плотность загрязнения почвы, удельная активность, древесина, кора, сосняк мшистый, зона отчуждения

DOI: 10.31857/S0869803121050064

Вследствие аварии на Чернобыльской АЭС (далее ЧАЭС) радиоактивными выбросами было загрязнено около 20000 км<sup>2</sup>, или 22% лесов Беларуси [1]. На прилегающей к ЧАЭС территории сразу после аварии была установлена зона эвакуации (отчуждения), из которой эвакуировано население и прекращена хозяйственная деятельность. В 1988 г. в ее границах был образован Полесский государственный радиационно-экологический заповедник.

С 1987 г. сотрудниками Института леса БССР (ныне ГНУ “Институт леса НАН Беларуси”) были организованы радиоэкологические исследования в лесных насаждениях загрязненной части лесного фонда страны. В лесах зоны отчуждения на “ближнем” следе радиоактивных выпадений (до 30 км) в 1987–1994 гг. было заложено 15 опытных объектов, большая часть которых расположена в сосновых лесах [2]. Сосняки занимают 43.2% лесопокрытой площади заповедника. В их структуре доминирует (51.7%) мшистый тип леса [3].

Регулярные радиоэкологические наблюдения на объектах осуществлялись до 2006 г., периодические — до 2010 г. Результаты исследований опубликованы в монографии [2] и десятках других работ. В них освещены вопросы формирования радиационной обстановки в лесных экосистемах после аварии на ЧАЭС, миграции  $^{137}\text{Cs}$  и

$^{90}\text{Sr}$  в почвах, распределения и динамики их в компонентах древесных растений, влияния на эти процессы экологических факторов, даны прогнозные оценки изменения загрязненности лесных почв и компонентов древесных пород и ряд других вопросов.

В целях продолжения многолетних радиоэкологических наблюдений в 2016–2018 гг. были возобновлены исследования на пяти объектах ГНУ “Институт леса НАН Беларуси” в сосняках мшистых. Полученные результаты с учетом имеющихся данных позволяют проанализировать динамику загрязнения  $^{137}\text{Cs}$  отдельных компонентов сосновых насаждений за прошедшее после аварии время, в течение которого запас  $^{137}\text{Cs}$  в лесных биогеоценозах в результате радиоактивного распада (период полураспада  $^{137}\text{Cs}$  — 30.07 лет) сократился как минимум в 2 раза по отношению к выпавшему количеству.

Цель работы — на основе многолетних данных оценить изменение радиационной обстановки в сосняках мшистых в зоне отчуждения ЧАЭС через 30 лет после аварии, выявить особенности очищения верхнего слоя почв, древесины и коры сосны от  $^{137}\text{Cs}$ , установить влияние на эти процессы отдельных экологических факторов.

**Таблица 1.** Характеристика насаждений сосны в год закладки ППН (по [2])  
**Table 1.** Characteristics of pine stands in the year of laying the permanent monitoring point (PMP) (by [2])

Шифр ППН	Год закладки	Расстояние и направление от ЧАЭС	Состав древостоя	Возраст, лет	Средние		Класс бонитета
					H, м	D, см	
Мс-1	1987	11 км на С	10С	12	4.1	4.0	II
Кл-1	1993	22 км на С-В	10С	25	11.5	10.7	II
Кр-1	1988	20 км на С-В	10С	20	7.8	8.3	II
Пг-1	1987	25 км на С	10С	25	12.8	11.6	I
Гн-1	1987	35 км на С-З	10С	20	9.2	8.3	II

**Таблица 2.** Характеристика насаждений сосны в год последней таксации  
**Table 2.** Characteristics of pine stands in the year of the last taxation

Шифр ППН	Год таксации	Возраст, лет	Средние		Класс бонитета	Густота, шт./га	Сумма площадей сечений, м <sup>2</sup> /га	Запас, м <sup>3</sup> /га
			H, м	D, см				
Мс-1	2016	41	13.4	11.9	II.1	2912	32.3	221
Кл-1	2017	49	14.8	15.0	II.4	2296	40.6	300
Кр-1	2018	50	15.9	17.5	II.0	1969	47.7	375
Пг-1	2016	54	18.2	16.9	I.6	2304	51.6	452
Гн-1	2016	49	16.0	15.4	I.9	2316	46.4	356

**Таблица 3.** Характеристика нижних ярусов насаждений  
**Table 3.** Characteristics of the lower layers of pine stands

Шифр ППН	Густота, шт./га/средняя высота, см		Проективное покрытие почвы, %	
	подроста	подлеска	травянистыми растениями	мхами
Мс-1	—	—	—	70
Кл-1	96/17	8/46	<1	70
Кр-1	108/22	176/51	<5	50
Пг-1	64/18	112/35	<2	80
Гн-1	24/19	124/39	<2	70

**МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДИКА**

На объектах ГНУ “Институт леса НАН Беларуси” в 2016–2018 гг. заложили постоянные пункты наблюдения (ППН) радиационно-экологического мониторинга размером 50 × 50 м в соответствии с действующими в Беларуси нормативными документами [4, 5] с сохранением за ними присвоенных шифров. Таксацию насаждений и определение таксационных показателей выполняли в соответствии с описанными в источниках [6–8] методами, густоту и высоту подроста и подлеска определяли путем сплошного перечета и замеров, процент проективного покрытия почвы травянистыми растениями и мхами – глазомерно.

Таксационная характеристика насаждений в год закладки приведена в табл. 1, в год последней таксации – в табл. 2, характеристика нижних ярусов фитоценозов – в табл. 3.

Объекты исследований – чистые насаждения сосны обыкновенной искусственного происхождения мшистого типа леса в белорусском секторе зоны отчуждения ЧАЭС, произрастающие на дерново-подзолистых слабоподзоленных (старопашотных) связнопесчаных почвах, развивающихся на водно-ледниковых песчаных отложениях. Тип лесорастительных условий – А<sub>2</sub>.

Отбор проб почвы и биологических образцов сосны на ППН производили теми же способами и аналогичными пробоотборниками, что и сотруд-

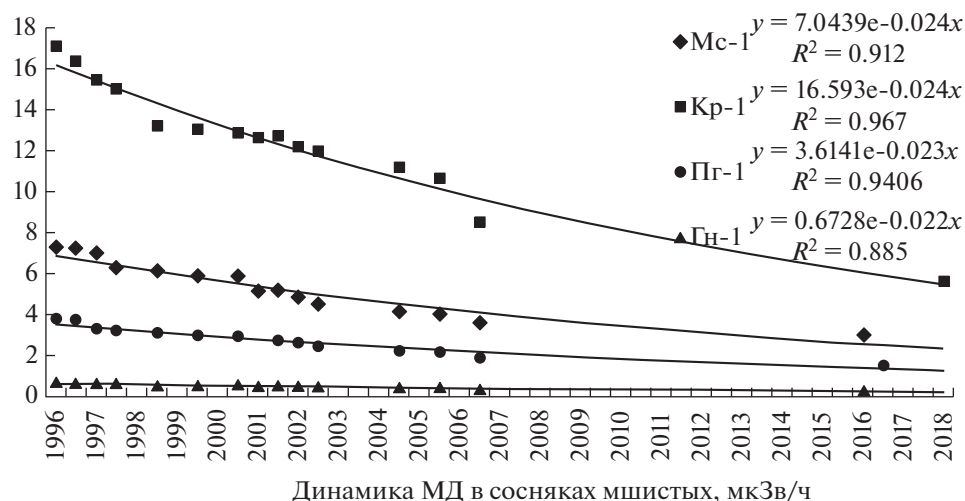


Рис. 1. Динамика МД в сосняках мшистых, мкЗв/ч.

Fig. 1. Dynamics of the  $\gamma$ -radiation dose rate in mossy pine forests,  $\mu\text{Sv h}^{-1}$ .

ники ГНУ “Институт леса НАН Беларуси”, и в соответствии с [4, 5]. Мощность дозы  $\gamma$ -излучения (далее МД) на ППН измеряли в местах отбора проб почвы дозиметром-радиометром МКС–АТ6130 (Атомтех, Беларусь).

Удельную активность (далее  $A_y$ )  $^{137}\text{Cs}$  в пробах почвы и образцах древесины и коры сосны определяли в лаборатории спектрометрии и радиохимии заповедника на сцинтилляционном гамма-бета-спектрометре МКС–АТ1315 (Атомтех, Беларусь).

Для расчетов коэффициентов перехода (далее  $K_{\text{п}}$ ) в ткани сосны для построения временных рядов и графиков использовали предоставленные И.М. Булавиком многолетние данные замеров МД,  $A_y$   $^{137}\text{Cs}$  древесины и коры, величины плотности загрязнения почв  $^{137}\text{Cs}$  (далее ПЗ) на опытных объектах за 1987–2010 гг.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

**Динамика мощности дозы  $\gamma$ -излучения.** В многолетней динамике МД в лесах выделено два этапа – интенсивного и медленного снижения. Сразу после радиоактивных выпадений МД в лесных фитоценозах была очень высокой в связи с пространственным распределением радионуклидов. Основной вклад в  $\gamma$ -фон вносили  $^{144}\text{Ce}$ ,  $^{106}\text{Ru}$ ,  $^{134}\text{Cs}$  и  $^{137}\text{Cs}$ . До середины 1990-х годов за счет распада короткоживущих радионуклидов МД в лесах снижалась быстро: в 1987–1990 гг. на 19–20% в год, в 1990–1992 гг. на 8–10% в год. С 1996 г., когда МД стал формировать преимущественно  $^{137}\text{Cs}$  при парциальном вкладе в радиоактивное загрязнение почв 97%, процесс ее падения замедлился [2].

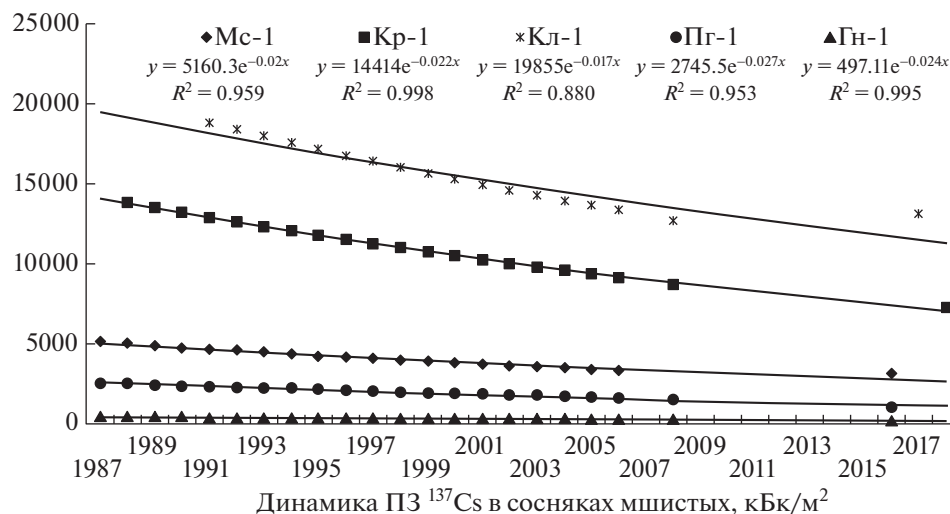
На втором этапе МД на ППН уменьшается по экспоненциальным кривым, приближающимся к

прямым линиям, и на высоком уровне значимости аппроксимируются уравнениями этой функции (рис. 1).

За 1996–2016 (2018) гг. МД на ППН уменьшилась на 55.7–59.5% (67.0%) при темпах снижения 2.8–3.0% в год. Это быстрее естественного радиоактивного распада  $^{137}\text{Cs}$  для анализируемого периода (2.3% в год) и среднегодовых темпов падения МД на “дальнем” следе радиоактивных выпадений (2.2%) через 30 лет после аварии на ЧАЭС [9]. Между этим показателем и расстоянием до ЧАЭС прослеживается недостоверная (здесь и далее по шкале Чеддока) обратная средняя корреляционная связь ( $R = -0.628$ ). Снижение МД в лесах обусловлено естественным распадом  $\gamma$ -излучающих радионуклидов, миграцией их вглубь по профилю почвы, экранированием излучения верхними слоями почвы и лесной подстилкой, поглощением растительностью [1, 10].

По прогнозу [10] к 2025 г. МД должна выйти на уровень 2.95–3.20 мкЗв/ч (ППН Мс-1), 1.85–2.19 мкЗв/ч (ППН Пг-1), 8.0–9.0 мкЗв/ч (ППН Кр-1), но уже в 2016–2018 гг. она опустилась до 3.04, 1.53 и 5.65 мкЗв/ч соответственно. Период полужизни МД для этапа медленного снижения определен величиной 15–18 лет [11]. За 2002–2020 гг. ожидалось ее падение в 2 раза. За 14–16 лет (с 2002 по 2016–2018 гг.) она уменьшилась в 1.6–2.1 раза. При таких темпах к 2020 г. МД понизится в 2.1–2.4 раза. Следовательно, реальное смягчение  $\gamma$ -фона в сосняках мшистых зоны отчуждения ЧАЭС протекает быстрее прогнозного.

**Динамика поверхностного загрязнения почв  $^{137}\text{Cs}$ .** Высокая мозаичность пространственного распределения радиоактивных выпадений в зоне отчуждения на фоне общей тенденции снижения



**Рис. 2.** Динамика ПЗ <sup>137</sup>Cs в сосняках мшистых, кБк/м<sup>2</sup>.  
**Fig. 2.** Dynamics of <sup>137</sup>Cs soil contamination density in mossy pine forests, kBq m<sup>-2</sup>.

загрязнения почв по мере удаления от ЧАЭС [12] обусловили широкий диапазон значений ПЗ <sup>137</sup>Cs в сосняках мшистых. Ее изменение за 26–30 лет графически отображается почти прямыми линиями, которые весьма надежно аппроксимируются экспоненциальными уравнениями регрессии (рис. 2), что говорит об однотипном процессе очищения верхнего 200-миллиметрового слоя почвы от <sup>137</sup>Cs на всех объектах.

За анализируемый период за счет радиоактивного распада <sup>137</sup>Cs ПЗ на ППН должна была снизиться на 45.1–49.9%, в среднем на 1.7% в год. Фактически она уменьшилась на 30.3–59.7% при темпах снижения 1.2–2.1% в год (табл. 4). Очищение верхнего 200-миллиметрового слоя почв от <sup>137</sup>Cs в сосняках мшистых в зоне отчуждения протекает несколько медленнее, чем в загрязненной части лесного фонда Беларуси – около 2.0–2.1% в год [1, 9].

Изменение относительной разницы между фактическим снижением ПЗ <sup>137</sup>Cs и естественным распадом <sup>137</sup>Cs в насаждениях от –14.8% до +10.9% говорит о наложении на процесс распада радионуклида других факторов. В балансе запаса <sup>137</sup>Cs в верхнем 200-миллиметровом слое почвы расход радионуклида, помимо радиоактивного распада, определяется корневым поступлением его в растения, миграцией в нижележащие слои почвы; приход – возвратом с растительным опадом и отпадом в лесную подстилку и переходом в минеральную часть почвы. В зависимости от соотношения прихода и расхода <sup>137</sup>Cs очищение от него почв по отношению к радиоактивному распаду ускоряется или замедляется.

За год с вертикальным и поверхностным стоком за пределы почвенного профиля уходят десятые доли процента содержащихся там радионуклидов [13]. Вклад вертикальной составляющей

**Таблица 4.** Снижение ПЗ <sup>137</sup>Cs в сосняках мшистых  
**Table 4.** Reduction of <sup>137</sup>Cs soil contamination density in mossy pine forests

Шифр ППН	Период (продолжительность, лет)/расстояние до ЧАЭС, км	ПЗ на начало периода, кБк/м <sup>2</sup> (Ки/км <sup>2</sup> )	ПЗ на конец периода		Снижение ПЗ за			Относительная разница между фактическим снижением ПЗ и распадом <sup>137</sup> Cs, %
			кБк/м <sup>2</sup> (Ки/км <sup>2</sup> )	%	период		год	
					кБк/м <sup>2</sup> (Ки/км <sup>2</sup> )	%		
Кл-1	1991–2017 (26)/22	18870 (510.0)	13154 (355.5)	69.7	5716 (154.5)	30.3	1.2	–14.8
Mc-1	1987–2016 (29)/11	5180 (140.0)	3153 (85.2)	60.9	2027 (54.8)	39.1	1.4	–9.7
Kp-1	1988–2018 (30)/20	13870 (374.9)	7269 (196.5)	52.4	6601 (178.4)	47.6	1.6	–2.3
Gn-1	1987–2016 (29)/35	481 (13.0)	230 (6.2)	48.0	250 (6.8)	52.0	1.8	+3.2
Pp-1	1987–2016 (29)/25	2590 (70.0)	1044 (28.2)	40.3	1546 (41.8)	59.7	2.1	+10.9

**Таблица 5.** Прогнозные показатели очищения почв от  $^{137}\text{Cs}$  в сосняках мшистых  
**Table 5.** Forecast indicators of soil purification from  $^{137}\text{Cs}$  in mossy pine forests

Шифр ППН	ПЗ, кБк/м <sup>2</sup> (Ки/км <sup>2</sup> )		Уточненные		Прогноз на 2035 г.	
	1991	2021	ПЗ 2021/ ПЗ 1991 г., %	период полу- очистения, лет	ПЗ, кБк/м <sup>2</sup> (Ки/км <sup>2</sup> )	ПЗ 2035/ ПЗ 2021, %
Кл-1	18870 (510.0)	11745 (317.4)	37.8	27	9193 (248.5)	51.3
Мс-1	4726 (127.7)	2626 (71.0)	44.4	23	1985 (53.6)	58.0
Кр-1	12949 (350.0)	6928 (187.2)	46.5	22	5077 (137.2)	60.8
Гн-1	439 (11.9)	220 (5.9)	49.9	20	157 (4.2)	64.2
Пг-1	2363 (63.9)	1104 (29.8)	53.3	19	758 (20.5)	67.9

миграции  $^{137}\text{Cs}$  в балансе его запасов в 200-мм слое почвы не превышает 2% от радиоактивного распада [14].

В биологический круговорот ежегодно включаются лишь десятые доли процента запаса радионуклидов [15], поглощение и аккумуляция  $^{137}\text{Cs}$  растительностью существенно влияет на уменьшение его запасов в почвах лесного фонда Беларуси [1]. За вегетационный период в надземную фитомассу средневозрастных сосняков поступает большее количество этого радионуклида (0.7–1.8% от общего его содержания в почве), чем возвращается с опадом (0.1–0.5% от количества, содержащегося в насаждении) [16]. В середине 2000-х годов в древесине с корой в сосняке мшистом было аккумулировано 42.2–77.5% запаса  $^{137}\text{Cs}$  от общего в деревьях [17]. В середине 2010-х годов в этих тканях содержалось 4.3% от его запаса в биогеоценозе (без сучьев и хвои) [18]. Запасы  $^{137}\text{Cs}$  в подросте, подлеске и живом напочвенном покрове в надземной фитомассе данного типа леса не превышают 10% [17, 18]. В исследованных сосняках эти элементы лесного фитоценоза, кроме мхов, представлены мизерным количеством растений (табл. 3) и, следовательно, ничтожной биомассой. Корреляционная связь относительного снижения ПЗ  $^{137}\text{Cs}$  с проективным покрытием почвы мхами крайне слабая ( $R = 0.205$ ). Следовательно, основную роль в круговороте радионуклида в основных насаждениях на ППН играет древостой.

На содержание  $^{137}\text{Cs}$  в компонентах древостоя сосны основное влияние оказывают величина  $K_{\text{п}}$   $^{137}\text{Cs}$  и биомасса на единице площади [19]. В древостоях с низкими запасами стволовой древесины ПЗ  $^{137}\text{Cs}$  уменьшается медленнее естественно-го распада радионуклида, а в самом продуктивном насаждении – быстрее (табл. 2, 4). Величины относительного снижения ПЗ  $^{137}\text{Cs}$  в сосняках мшистых тесно ( $R = 0.963$ ) и достоверно ( $p < 0.01$ ) связаны с классами бонитета древостоев. Вероятно, более продуктивные насаждения сосны, произрастающие в более благоприятных лесорастительных условиях, больше выносят  $^{137}\text{Cs}$  из почвы и аккумулируют его в фитомассе деревьев.

В расположенных в 11–22 км от реактора сосняках ПЗ  $^{137}\text{Cs}$  снижалась на 2.3–14.8% медленнее естественного его распада, на удаленных от ЧАЭС на 25 и 35 км объектах – на 10.9 и 3.2% быстрее (табл. 4). Однако низкие коэффициенты корреляции расстояния объектов до реактора с абсолютным снижением ПЗ ( $R = 0.487$ ) и с относительной разницей фактического снижения ПЗ и радиоактивным распадом  $^{137}\text{Cs}$  ( $R = 0.546$ ) указывают на слабое влияние данного фактора на очищение 200-мм слоя почвы от  $^{137}\text{Cs}$  в пределах зоны отчуждения.

Ожидаемое количество  $^{137}\text{Cs}$  в слое 0–200 мм автоморфных почв к 2021 г. должно составить около 44% по отношению к 1991 г. при периоде их полураспада 28 лет [2]. С учетом полученных данных снижение ПЗ  $^{137}\text{Cs}$  в 2021 г. будет приближаться к прогнозной величине только на одном ППН (Мс-1), а уточненное время полуснижения загрязнения почв во всех насаждениях ниже прогнозного. В каждом насаждении оно индивидуально и снижается по мере удаления от реактора. К 2035 г. ожидается снижение ПЗ  $^{137}\text{Cs}$  на 51–68% по сравнению с 1991 г. (табл. 5).

Динамика загрязнения древесины сосны  $^{137}\text{Cs}$ . Вопросы многолетней динамики накопления радионуклидов древесным ярусом достаточно хорошо освещены для первых 10–20 лет ([10, 19–21] и др.). В белорусском секторе зоны отчуждения ЧАЭС  $A_{\text{y}}$   $^{137}\text{Cs}$  в древесине достигла максимальной концентрации в 1992–1996 гг. и после короткой стабилизации стала медленно снижаться [2]. Пик его содержания в древесине сосны на ППН наступил через 6–9 лет после радиоактивных выбросов [22, 23]. В дальней зоне ЧАЭС это произошло несколько позже [24]. Связи времени достижения максимума  $A_{\text{y}}$   $^{137}\text{Cs}$  в этой ткани с расстоянием до ЧАЭС не выявлено ( $R = 0.334$ ).

После достижения наибольшего содержания  $^{137}\text{Cs}$  в надземной фитомассе установилось устой-

стой-

стой-

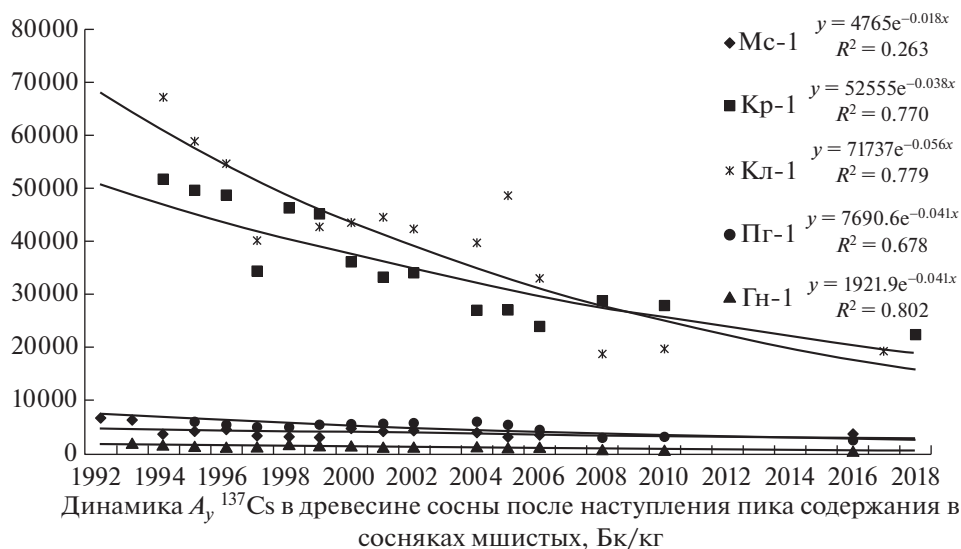


Рис. 3. Динамика  $A_y^{137}\text{Cs}$  в древесине сосны после наступления пика содержания в сосняках мшистых, Бк/кг.  
 Fig. 3. Dynamics of the specific activity of  $^{137}\text{Cs}$  in pine wood after the peak of the content in mossy pine forests,  $\text{Bq kg}^{-1}$ .

чивое квазиравновесное распределение его в системе “почва—растение” [25]. Последующее снижение концентрации радионуклида в древесине сосны в сосняках мшистых протекает с разной скоростью и описывается экспоненциальными кривыми, стремящимися к прямым линиям. Этот процесс на большинстве ППН, кроме ППН Мс-1, на 67.8–80.2%-ном уровне значимости аппроксимируется экспоненциальной функцией (рис. 3).

На ППН снижение  $A_y^{137}\text{Cs}$  в древесине сосны происходило достоверно синхронно с уменьшением ПЗ (табл. 6). Это объясняется существующими прямыми корреляционными связями и функциональными зависимостями между этими показателями [2, 10, 21 и др.]. Самая низкая корреляция между этими показателями наблюдается на ППН Мс-1.

Сокращение поступления  $^{137}\text{Cs}$  в древесную ткань обусловлено естественным его распадом, уменьшением корневого поступления радионуклида в растения за счет оттока его вниз по профилю почвы, снижением доступного для поглощения корнями растений количества радионуклида в связи с переходом в фиксированную форму [2, 9, 10, 15, 26]. По этим причинам в стволах сосны

ежегодно образуется более “чистая” древесина. Увеличение ее прироста с меньшей концентрацией  $^{137}\text{Cs}$  и перераспределение радионуклида по стволу [2, 10, 20, 26] фактически обеспечивают его разбавление в этой ткани.

За время наблюдений общее снижение  $A_y^{137}\text{Cs}$  в древесной ткани сосны по отношению к пику накопления составило 43.0–71.2% (1.8–3.1% в год), в том числе за счет радиоактивного распада – 38.4–42.5%. В большинстве насаждений ее очищение протекало на 14.2–30.0% быстрее распада радионуклида, приближаясь к нему (0.5%) только на самом близком к ЧАЭС объекте (Мс-1) (табл. 7).

Разные уровни содержания  $^{137}\text{Cs}$  в деревьях и насаждениях обусловлены совокупностью физиологических и биогеохимических процессов, распределением радионуклидов и корневых систем растений в почвенных горизонтах, наличием в каждом из горизонтов доступных форм радионуклида [26].

По мере “старения” деревьев физиологические процессы в них замедляются. Поэтому наиболее интенсивно  $^{137}\text{Cs}$  депонируется в древесине сосны молодых и средневозрастных насаждений [10, 21]. С возрастом содержание радионуклида в

Таблица 6. Коэффициенты корреляции между  $A_y^{137}\text{Cs}$  в древесине сосны и ПЗ  
 Table 6. Correlation coefficients of the specific activity of  $^{137}\text{Cs}$  in pine wood and the density of soil contamination

Шифр ППН	Мс-1	Кл-1	Кр-1	Пг-1	Гн-1
Период	1992–2016	1994–2017	1994–2018	1995–2016	1993–2016
Коэффициенты корреляции	0.586	0.843	0.888	0.759	0.838
Критерий Пирсона для $p = 0.05$	0.514	0.532	0.532	0.553	0.514

**Таблица 7.** Снижение  $A_y$   $^{137}\text{Cs}$  в древесине сосны после наступления пика  
**Table 7.** Decrease in the specific activity of  $^{137}\text{Cs}$  in pine wood after the peak of the content

Шифр ППН	Период (продолжительность, лет)/расстояние до ЧАЭС, км	$A_y$ , Бк/кг		Снижение $A_y$ за			Относительная разница между фактическим снижением $A_y$ и распадом $^{137}\text{Cs}$ , %
		на время пика накопления	на конец наблюдений	период		год	
				Бк/кг	%	%	
Мс-1	1992–2016 (24)/11	6697	3816	2881	43.0	1.8	0.5
Кр-1	1994–2018 (24)/20	51600	22364	29236	56.7	2.4	14.2
Пг-1	1995–2016 (21)/25	6031	2491	3540	58.7	2.8	20.3
Гн-1	1993–2016 (23)/35	1998	646	1352	67.7	2.9	26.5
Кл-1	1994–2017 (23)/22	67200	19366	47874	71.2	3.1	30.0

**Таблица 8.** Динамика  $K_n$   $^{137}\text{Cs}$  в древесину сосны в зоне отчуждения ЧАЭС по данным разных авторов,  $n \times 10^{-3} \text{ м}^2/\text{кг}$   
**Table 8.** Dynamics of  $^{137}\text{Cs}$  transition coefficients ( $T_{ag}$ ) to pine wood in the Chernobyl exclusion zone according to different authors,  $10^{-3} \text{ м}^2 \text{ kg}^{-1}$

Годы, источник	1996–2001 [2]	2003–2004 [30]	2005 [31]	2009–2010 [32]	2014 [18]
$K_n$	2.53	2.0–2.2	1.42	1.75–2.04	0.51–1.68

этой ткани по одним сведениям [27] повышается, по другим [15] – понижается, а между классами возраста древостоев и уровнями накопления  $^{137}\text{Cs}$  компонентами сосны существуют обратные корреляционные зависимости. Согласно [2] строгая закономерность аккумуляции этого радионуклида в основной древесине с возрастом отсутствует. Установленная на ППН высокая ( $R = 0.740$ ) корреляционная связь темпов очищения древесины сосны от  $^{137}\text{Cs}$  с возрастом древостоев не достигает 5%-ного уровня статистической значимости.

Из прочих элементов лесных фитоценозов на ППН в значимых количествах присутствуют только мхи (табл. 3). В них аккумулируется  $^{137}\text{Cs}$  больше, чем в растениях и других систематических группах живого напочвенного покрова [28, 29]. Вообще в живом напочвенном покрове лесных фитоценозов суммарное содержание радионуклидов выше, чем в древостое и в подростово-подлесочном ярусе [1]. Выявлена высокая обратная корреляционная связь  $A_y$   $^{137}\text{Cs}$  в древесине сосны с общим проективным покрытием почвы мхами ( $R = -0.722$ ) на ППН, но с учетом незначимой корреляции ( $p > 0.05$ ) позволяет лишь предполагать о возможном отвлечении мхами некоторой части запаса радионуклида на себя и снижении поступления его в деревья.

Высокие, но статистически незначимые ( $p > 0.05$ ), корреляционные связи расстояния со средними годовыми темпами уменьшения  $A_y$   $^{137}\text{Cs}$  в древесине ( $R = 0.767$ ) и с относительной разницей между фактическим падением  $A_y$   $^{137}\text{Cs}$  в данной ткани и его радиоактивным распадом ( $R = 0.784$ ) указывают на существующую тенденцию

ускорения очищения древесины сосны от  $^{137}\text{Cs}$  с удалением насаждений от ЧАЭС.

В ближней зоне ЧАЭС  $K_n$   $^{137}\text{Cs}$  в древесину сосны после непродолжительного роста стабилизировались к середине 1990-х годов [2], в дальней – несколько позже [23]. С этого времени прослеживается слабый тренд их падения (табл. 8). Это характерно и для среднего  $K_n$   $^{137}\text{Cs}$  в древесину сосны за 1992–2004 г. четырех ППН (кроме Мс-1) [25].

Со времени установления квазиравновесного распределения  $^{137}\text{Cs}$  в системе “почва–растение” снижение  $K_n$   $^{137}\text{Cs}$  в древесину сосны на ППН на протяжении более чем 20 лет происходило крайне медленно (табл. 9).

При условии, что эффективный период полувыведения  $^{137}\text{Cs}$  из древесины сосны составляет от 12–14 [10] до 22–25 лет [2],  $A_y$   $^{137}\text{Cs}$  в ней на ППН к 2016–2018 гг. должна быть в 4 или в 2 раза ниже максимума. Фактически за 21–24 года она уменьшилась в 2.3–5.9 раза, а на ППН Мс-1 – только в 1.8 раза. По мере удаления от ЧАЭС фактическое очищение данной ткани от  $^{137}\text{Cs}$  по сравнению с прогнозным возрастает.

По прогнозу [2] к 2035 г.  $A_y$   $^{137}\text{Cs}$  в древесине сосны должна снизиться в 3.2 раза. По уточненным расчетам, в 2035 г.  $A_y$   $^{137}\text{Cs}$  в древесине сосны на ППН Кл-1 будет составлять 7340 Бк/кг, на ППН Мс-1 – 2180 Бк/кг, на ППН Кр-1 – 11200 Бк/кг, на ППН Гн-1 – 340 Бк/кг, на ППН Пг-1 – 1490 Бк/кг и снизится в 3.1, 4.6, 9.2, 4.2 и 5.9 раза соответственно. Таким образом, со временем очищение древесной ткани сосны от этого радионуклида протекает быстрее прогнозного.

**Таблица 9.** Динамика  $K_{\text{п}}^{137}\text{Cs}$  в древесину сосны (с момента достижения пика),  $\text{л} \times 10^{-3} \text{ м}^2/\text{кг}$   
**Table 9.** Dynamics of  $^{137}\text{Cs}$   $T_{\text{ag}}$  to pine wood (since reaching the peak),  $10^{-3} \text{ м}^2 \text{ кг}^{-1}$

Год	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2004	2005	2006	2008	2016	2017	2018
Мс-1	0.8	1.0	1.1	0.8	0.8	0.8	1.2	1.1	1.2	1.1	0.9	1.0	—	1.2	—	—
Кр-1	4.3	4.2	4.2	3.0	4.2	4.2	3.4	3.2	3.4	2.8	2.9	2.6	3.3	—	—	3.1
Кл-1	3.8	3.4	3.2	2.4	2.9	2.7	2.8	3.0	2.9	2.8	3.5	2.5	1.5	—	1.5	—
Пг-1	—	2.8	2.6	2.5	2.5	2.8	3.0	3.0	3.2	3.5	3.2	2.8	1.8	2.4	—	—
Гн-1	4.2	3.3	3.1	3.4	4.2	4.2	3.9	3.9	4.0	4.2	3.3	3.6	2.8	2.8	—	—

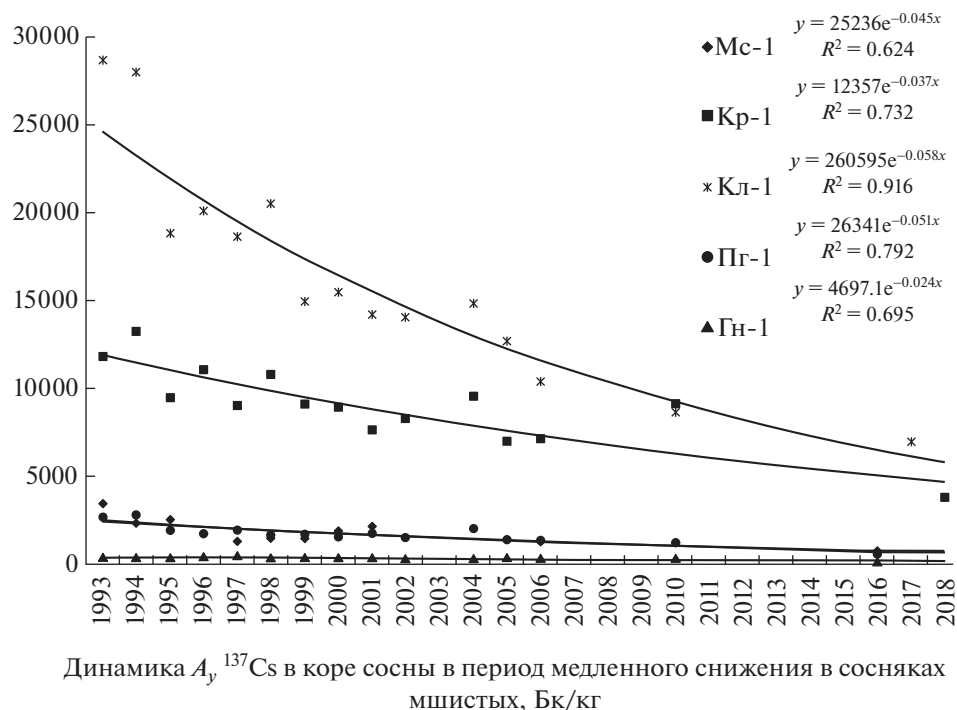
*Динамика загрязнения коры сосны  $^{137}\text{Cs}$ .* Радиоактивное загрязнение коры аэральным путем обусловило очень высокую концентрацию в ней  $^{137}\text{Cs}$  в первые годы после аварии на ЧАЭС. Распад короткоживущих радиоизотопов, поверхностный смыв радионуклидов осадками, шелушение и опад коры привели к быстрому снижению загрязнения этой ткани в течение первых 5 лет. С середины 1990-х годов этот процесс замедлился [2, 25].

На ППН этап медленного снижения  $A_{\text{y}}^{137}\text{Cs}$  в коре сосны начался с 1993 г. Динамика содержания в ней радионуклида на 62.4–91.6% уровне значимости аппроксимируется уравнениями экспоненциальных кривых (рис. 4). Между изменением  $A_{\text{y}}^{137}\text{Cs}$  в этой ткани и ПЗ на ППН наблюдаются высокие и очень высокие корреляционные

связи ( $R = 0.710\text{--}0.920$ ), достоверные на 5%-ном уровне значимости.

С 1993 г. замедлилось и снижение  $K_{\text{п}}^{137}\text{Cs}$  в коре сосны (табл. 10). Их относительная стабильность для анализируемого периода согласуется с данными других исследований [31, 32].

Установленные корреляционные связи МД, ПЗ, загрязнения древесины и коры сосны  $^{137}\text{Cs}$  с расстоянием до ЧАЭС объясняются различиями состава и физико-химических форм радиоактивных выбросов. Так, ближе к реактору выпали преимущественно тугоплавкие радионуклиды в составе “топливной” компоненты, на удалении — легкоплавкие радионуклиды конденсационной и газо-аэрозольной компонент, а в 15–20 км от ЧАЭС при наложении друг на друга выбросов с разными физико-химическими формами радио-



**Рис. 4.** Динамика  $A_{\text{y}}^{137}\text{Cs}$  в коре сосны в период медленного снижения в сосняках мшистых, Бк/кг.

**Fig. 4.** Dynamics of the specific activity of  $^{137}\text{Cs}$  in pine bark during the period of slow decline in mossy pine forests, Bq  $\text{кг}^{-1}$ .



**Таблица 10.** Динамика  $K_p$   $^{137}\text{Cs}$  в кору сосны,  $n \times 10^{-3} \text{ м}^2/\text{кг}$   
**Table 10.** Dynamics of  $^{137}\text{Cs}$   $T_{ag}$  in pine bark,  $10^{-3} \text{ м}^2 \text{ kg}^{-1}$

Год	1987	1989	1991	1993	1995	1997	1999	2000	2002	2004	2006	2016
Мс-1	92.0	28.6	15.4	7.7	5.9	3.2	3.7	4.9	4.1	5.9	3.9	2.4
Кр-1	—	35.6	13.5	9.6	8.0	8.0	8.5	8.5	8.3	10.0	7.8	5.3 <sup>1</sup>
Кл-1	—	—	—	3.4	3.4	2.4	2.7	2.8	2.9	2.8	2.5	1.5 <sup>2</sup>
Пг-1	58.9	29.5	14.2	12.2	9.0	9.5	8.6	8.3	8.2	11.7	8.2	5.6
Гн-1	81.5	49.2	13.0	9.4	9.8	12.4	10.0	9.7	10.0	9.2	9.9	6.5

Примечания. <sup>1</sup> 2017 г., <sup>2</sup> 2018 г.

нуклидов образовались пятна с очень высокими уровнями загрязнения биогеоценозов  $^{137}\text{Cs}$  [2, 10]. По мере удаления от ЧАЭС меняется соотношение физико-химических форм, увеличивается дисперсность топливных частиц, растут растворимость радионуклида и его доступность для растений. Влияние физико-химической формы выпадений на  $K_p$   $^{137}\text{Cs}$  в растения сохраняется достаточно долго и ослабевает со временем и с увеличением расстояния до источника радиоактивных выбросов [15]. Данным фактором объясняется и разная скорость очищения почв от  $^{137}\text{Cs}$ .

В ближней зоне постепенное разрушение “горячих” частиц и выщелачивание из них радионуклидов обеспечили постоянное поступление  $^{137}\text{Cs}$  в растения [10]. Пролонгированное его поступление в жидкую часть почв из труднорастворимых частиц топливной компоненты и существенное отставание поступления в древесной по сравнению с возвратом в почву [15] объясняют наиболее медленное снижение  $A_y$   $^{137}\text{Cs}$  в древесине и коре сосны, которое достоверно не аппроксимируется ни одной из наиболее распространенных математических функций, и самый низкий и практически не меняющийся  $K_p$   $^{137}\text{Cs}$  в древесину в самом близком к ЧАЭС насаждении сосны (ППН Мс-1).

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Через 30 лет после аварии на ЧАЭС радиационная обстановка в лесах зоны отчуждения существенно смягчилась. В сосняках мшистых медленно по экспоненциальному типу снижаются МД  $\gamma$ -излучения, ПЗ  $^{137}\text{Cs}$ ,  $A_y$   $^{137}\text{Cs}$  в древесине и коре сосны.

Уменьшение  $\gamma$ -фона и содержания  $^{137}\text{Cs}$  в древесине сосны протекает быстрее радиоактивного распада радионуклида. Снижение МД, фактическое очищение верхнего 200-миллиметрового слоя почвы и древесины сосны от  $^{137}\text{Cs}$  происходит, как правило, быстрее сделанных ранее прогнозов, а разница между ними растет с удалением от места радиоактивных выбросов. По мере при-

ближения к ЧАЭС прослеживается тенденция замедления темпов снижения МД, ПЗ  $^{137}\text{Cs}$ ,  $A_y$   $^{137}\text{Cs}$  в древесине и коре.

Процессы изменения радиационной обстановки индивидуальны для каждого насаждения, а на наиболее близком к аварийному реактору объекте они не вполне укладываются в рамки выявленных закономерностей. В значительной мере это определено территориальными различиями состава и физико-химических форм радиоактивных выпадений. Помимо этого фактора, на изменения МД и ПЗ  $^{137}\text{Cs}$  в сосняках мшистых некоторое влияние оказывают миграция радионуклида вниз по почвенному профилю, накопление его фитоценозами. Ускорение очищения древесины сосны от  $^{137}\text{Cs}$  связано с сокращением количества доступных его форм в корнеобитаемых почвенных горизонтах и поступления его в деревья, с отвлечением радионуклида другими структурными элементами насаждений (мхами), с физиологическими особенностями деревьев сосны, перераспределением радионуклида в пределах деревьев и стволов, с условиями местопроизрастания.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Аверин В.С., Агеев В.Ю., Алейникова О.В. и др.* 20 лет после черновильской катастрофы: последствия в Республике Беларусь и их преодоление. Национальный доклад. Минск: Комитет по проблемам последствий катастрофы на Чернобыльской АЭС при Совете Министров Республики Беларусь, 2007. 112 с. [Averin V.S., Ageets V.Yu., Aleinikova O.V. et al. 20 let posle chernobyl'skoi katastrofy: posledstviya v Respublike Belarus' i ikh preodolenie. [national report] Minsk: Komitet po problemam posledstviiv katastrofy na Chernobyl'skoi AES pri Sovete Ministrov Respubliki Bekarus', 2007. 112 p. (In Russian)]
2. *Переволоцкий А.Н.* Распределение  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{90}\text{Sr}$  в лесных биогеоценозах. Гомель: Институт радиологии, 2006. 255 с. [Perevolotsky A.N. Raspredelenie  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{90}\text{Sr}$  v lesnykh biogeotsenozakh. Gomel: Institut radiologii, 2006. 255 p. (In Russian)]
3. *Кудин М.В.* Современное состояние сосновых лесов белорусского сектора зоны отчуждения Чернобыльской АЭС // Пробл. лесоведения и лесоводства. 2015. Вып. 75. С. 468–479. [Kudin M.V. Current

- state of pine forests of the Belarusian sector in the Exclusion zone of the Chernobyl NPS // Problems of forest science and forestry. 2015. V. 75. P. 468–479. (In Russian)]
4. Радиационный контроль. Обследование земель лесного фонда. Порядок проведения = Радиационный контроль. Абследаванне зямель ляснаго фонду. Парадак правядзення: ТКП 240-2010 (02080). Введ. 22.02.10. Минск: Мин-во лесного хозяйства Республики Беларусь, 2010. 18 с. [Radiatsionnyi kontrol'. Obsledovanie zemel' lesnogo fonda. Poryadok provedeniya: ТКП 240-2010. Minsk: Ministerstvo lesnogo khozyaistva Respubliki Belrus', 2010. 18 p. (In Russian)]
  5. Радиационный мониторинг лесного фонда. Закладка постоянного пункта наблюдения. Порядок проведения = Радиационный мониторинг лесного фонда. Закладка пастаяннага пункта назірання. Парадак правядзення: ТКП 498-2013 (02080). Введ. 03.10.13. Минск: Министерство лесного хозяйства Республики Беларусь, 2013. 28 с. [Radiatsionnyi monitoring lesnogo fonda. Zakladka postoyannogo punkta nablyudeniya. Poryadok provedeniya: ТКП 498-2013. Minsk: Ministerstvo lesnogo khozyaistva Respubliki Belrus', 2013. 28 p. (In Russian)]
  6. Анучин Н.П. Лесная таксация. М.: Лесная промышленность, 1982. 561 с. [Anuchin N.P. Lesnaya taksatsiya. Moscow: Lesnaya promyshlennost', 1982. 561 p. (In Russian)]
  7. Багинский В.Ф., Кисляков В.Н., Швеиц В.Ф. и др. Нормативные материалы для таксации леса Белорусской ССР. М.: ЦБНТИ, 1984. 308 с. [Baginskiy V.F., Kislyakov V.N., Shveits V.F. et al. Normativnye materialy dlja taksacii lesa Belorusskoj SSR. Moscow: CBNTI, 1984. 308 p. (In Russian)]
  8. Мирошников В.С., Труль О.А., Ермаков В.Е. и др. Справочник таксатора. Минск: Ураджай, 1980. 360 с. [Miroschnikov V.S., Trull' O.A., Ermakov V.E. et al. Spravochnik taksatora. Minsk: Uradzhaj, 1980. 360 p. (In Russian)]
  9. Черников В.А., Цыбулько Н.Н., Семененя И.Н. и др. 30 лет чернобыльской аварии: итоги и перспективы преодоления ее последствий. Национальный доклад Республики Беларусь. Минск: Институт радиологии, 2016. 116 с. [Chernikov V.A., Tsybul'ko N.N., Semenenya I.N. et al. 30 let chernobyl'skoi avarii: itogi i perspektivy preodoleniya ee posledstviy. [national report Republic of Belarus]. Minsk: Institut radiologii. 2016. 116 p. (In Russian)]
  10. Ипатьев В.А., Багинский В.Ф., Булавик И.М., и др. Лес. Человек. Чернобыль. Лесные экосистемы после аварии на Чернобыльской АЭС: состояние, прогноз, реакция населения, пути реабилитации. Гомель: Речицкая укрупненная типография, 1999. 454 с. [Ipatyev V.A., Baginsky V.F., Bulavik I.M. et al. Forest. Human. Chernobyl. Forest ecosystems after the accident at the Chernobyl NPP: condition, prediction, response of the population, ways of rehabilitation. Gomel: Rechitskaya ukрупnennaya tipografiya, 1999. 454 p. (In Russian)]
  11. Переволоцкий А.Н. К вопросу о многолетней динамике мощности дозы внешнего  $\gamma$ -излучения в лесных биогеоценозах // Радиация и риск. 2012. Т. 21. № 4. С. 61–65. [Perevolotsky A.N. On the question of long-term dynamics of the external dose rate  $\gamma$ -radiation in forest biocenosis // Radiation and Risk. 2012. V. 21. № 4. P. 61–65. (In Russian)]
  12. Израэль Ю.А., Богдевич И.М. и др. Атлас современных и прогнозных аспектов последствий аварии на Чернобыльской АЭС на пострадавших территориях России и Беларуси (АСПА Россия–Беларусь). М.: Фонд “Инфосфера”–НИА–Природа; Минск: Белкартография, 2009. 140 с. [Izrael Yu.A., Bogdevich I.M. et al. Atlas of recent and predictable aspects of consequences of Chernobyl accident on polluted territories of Russia and Belarus (ARPA Russia–Belarus). Moscow: Fond “Infosfera”–NIA–Priroda; Minsk: Belkartografiya; 2009. 140 p. (In Russian)]
  13. Тихомиров Ф.А., Кляшторин А.Л., Щеглов А.И. Радионуклиды в составе вертикального внутрипочвенного стока в лесных почвах ближней зоны Чернобыльской АЭС // Почвоведение. 1992. № 6. С. 38–44. [Tihomirov F.A., Klyashtorin A.L., Shcheglov A.I. Radionuklidy v sostave vertikal'nogo vnutripochvennogo stoka v lesnykh pochvah blizhnej zony Chernobyl'skoi AES // Pochvovedenie. 1992. № 6. P. 38–44. (In Russian)]
  14. Переволоцкая Т.В., Булавик И.М., Переволоцкий А.Н. Распределение  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{90}\text{Sr}$  в вертикальном профиле почвы геохимически сопряженных ландшафтов // Междунар. науч. конф. “Радиация и экосистемы”. Гомель, 2008. С. 55–59. [Perevolotskaya T.V., Bulavik I.M., Perevolotskiy A.N. Raspreделение  $^{137}\text{Cs}$  i  $^{90}\text{Sr}$  v vertikal'nom profile pochvy u geokhimicheskii sopryazhennykh landshaftov // Mezhdunar. nauch. konf. “Radiatsiya i ekosistemy”. (Conf. proc.) Gomel, 2008. P. 55–59. (In Russian)]
  15. Щеглов А.И. Биогеохимия техногенных радионуклидов в лесных экосистемах: По материалам 10-летних исследований в зоне влияния аварии на ЧАЭС. М.: Наука, 2000. 268 с. [Shcheglov A.I. Biogeochemical migration of technogenic radionuclides in forest ecosystems: by the materials of 10-year research in the area effected by the Chernobyl accident. Moscow: Nauka, 2000. 268 p. (In Russian)]
  16. Переволоцкий А.Н., Переволоцкая Т.В. К вопросу вовлечения  $^{137}\text{Cs}$  в биологический круговорот сосновыми насаждениями // Междунар. науч. конф. “Радиация и Чернобыль: наука и практика”. Минск, 2011. С. 133–134. [Perevolotskiy A.N., Perevolotskaya T.V. K voprosu вовлечениya  $^{137}\text{Cs}$  v biologicheskii krugovorot sosnovymi nasazhdeniyami // Mezhdunar. nauch. konf. “Radiatsiya i Chernobil’: nauka i praktika”. (Conf. proc.) Minsk, 2011. P. 133–134. (In Russian)]
  17. Матусов Г.Д., Рошин В.Е., Китиков В.И. Распределение радионуклидов в лесных биогеоценозах // Междунар. науч. конф. “Радиация и Чернобыль: наука и практика”. Минск, 2011. С. 107–111. [Matusev G.D., Roshchin V.E., Kitikov V.I. Raspreделение radionuklidov v lesnykh biogeotsenozakh // Mezhdunar. nauch. konf. “Radiatsiya i Chernobil’: nauka i praktika”. (Conf. proc.) Minsk, 2011. P. 107–111. (In Russian)]
  18. Кудзин М., Забровский В., Харбарук Д. Distribution of  $^{137}\text{Cs}$  Between the Components of Pine Forest of Cher-

- nobyl NPP Exclusion Zone. In: Impact of Cesium on Plants and the Environment / Ed. D.K. Gupta, C.I. Walther. Switzerland: Springer Int. Publ., 2017. P. 149–169.
19. *Переволоцкий А.Н., Переволоцкая Т.В.* Анализ многолетней динамики накопления  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{90}\text{Sr}$  древесиной и корой сосны обыкновенной в различных типах условий местопроизрастания // Пробл. лесоведения и лесоводства. 2010. Вып. 70. С. 467–478. [*Perevolotsky A.N., Perevolotskaya T.V.* Analysis of long-term  $^{137}\text{Cs}$  and  $^{90}\text{Sr}$  accumulation dynamics by Scots pine bark and wood under various growing conditions // Problems of forest science and forestry. 2010. V. 70. P. 467–478. (In Russian)]
  20. *Щеглов А.И., Цветнова О.Б.* Основные закономерности сезонной и многолетней динамик накопления  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{90}\text{Sr}$  в древесине // Радиационная биология. Радиоэкология. 2004. Т. 44. № 1. С. 113–117. [*Shcheglov A.I., Tsvetnova O.B.* Basic features of seasonal and multiyear dynamics of  $^{137}\text{Cs}$  and  $^{90}\text{Sr}$  in wood // Radiation biology. Radioecology. 2004. V. 44. № 1. P. 113–117. (In Russian)]
  21. *Краснов В.П., Орлов А.А., Бузун В.А. и др.* Прикладная радиэкология леса. Житомир: Полісся, 2007. 680 с. [*Krasnov V.P., Orlov A.A., Buzun V.A. et al.* Prikladnaya radioekologiya lesa. Zhitomir: Poles'e, 2007. 680 p. (In Russian)]
  22. *Угалец А.В., Гарбарук Д.К., Кудин М.В.* Динамика загрязнения  $^{137}\text{Cs}$  древесины и коры сосны в сосняках вересковых и мшистых зоны отчуждения Чернобыльской АЭС // Природопользование. 2017. Вып. 31. С. 79–85. [*Ugalec A.V., Garbaruk D.K., Kudin M.V.* The  $^{137}\text{Cs}$  contamination dynamic of pine wood and bark in the heathery and mossy pine forests of the Chernobyl NPP Exclusion zone // Nature Management. 2017. V. 31. P. 79–85. (In Russian)]
  23. *Угалец А.В., Гарбарук Д.К., Кудин М.В.* Динамика загрязнения древесины и коры сосны  $^{137}\text{Cs}$  в сосняке вересковом на стационаре “Кулажин-1” в зоне отчуждения Чернобыльской АЭС // Междунар. науч.-практ. конф. “Проблемы и перспективы развития территорий, пострадавших в результате катастрофы на Чернобыльской АЭС, на современном этапе”. Хойники, 2018. С. 152–156. [*Ugalec A.V., Garbaruk D.K., Kudin M.V.* The dynamics of pine wood and bark pollution  $^{137}\text{Cs}$  in the heath of pine forest on the plot “Kulagin-1” in the Exclusion zone of the Chernobyl NPP // Mezhdunar. nauchno-prakt. konf. “Problemy i perspektivy razvitiya territorii, posttradaвшikh v rezul'tate katastrofy na Chernobyl'skoi AES, na sovremennom etape”. (Conf. Proc.) Khoyniki, 2018. P. 152–156. (In Russian)]
  24. *Булко Н.И., Шабалева М.А., Митин Н.В., и др.* Динамика длительных процессов поступления  $^{137}\text{Cs}$  в компоненты фитомассы сосны обыкновенной из автоморфных почв в дальней зоне аварии на ЧАЭС // Пробл. лесоведения и лесоводства. 2016. Вып. 76. С. 371–379. [*Bulko N.I., Shabaleva M.A., Mitin N.V. et al.* Long-term dynamics of  $^{137}\text{Cs}$  intake in components of scotch pine phytomass on automorphic soils in the far zone of Chernobyl accident // Problems of forest science and forestry. 2016. V. 76. P. 371–379. (In Russian)]
  25. *Переволоцкий А.Н., Переволоцкая Т.В.* Обоснование ведения системы радиоэкологического мониторинга в лесных биогеоценозах на различных этапах послеварийных радиоактивных выпадений // Радиационная биология. Радиоэкология. 2012. Т. 52. № 3. С. 312–316. [*Perevolotsky A.N., Perevolotskaya T.V.* Substantiation of radio-ecological monitoring of forest ecosystems at various stages after the accident fallout // Radiation biology. Radioecology. 2012. V. 52. № 3. P. 312–316. (In Russian)]
  26. *Fesenko S.V., Soukhova N.V., Sanzharova N.I. et al.* Identification of processes governing long-term accumulation of  $^{137}\text{Cs}$  by forest trees following the Chernobyl accident // Radiat. Environ. Biophys. 2001. V. 40. P. 105–113.
  27. *Барабашкин А.В., Карбанович Л.Н., Булко Н.И., Митин Н.В.* Факторы, влияющие на загрязнение цезием-137 древесины основных лесообразующих пород // Пробл. лесоведения и лесоводства. 2005. Вып. 63. С. 451–454. [*Barabashkin A.V., Karbanovich L.N., Bulko N.I., Mitin N.V.* Faktory, vliyayushchie na zagryaznenie tseziem-137 drevesiny osnovnykh lesoobrazuyushchikh porod // Problems of forest science and forestry. 2005. V. 63. P. 451–454. (In Russian)]
  28. *Парфёнов В.И., Якушев Б.И., Мартинович Б.С. и др.* Радиоактивное загрязнение растительности Беларуси. Минск: Наука і тэхніка, 1995. 578 с. [*Parfenov V.I., Yakushev B.I., Martinovich B.S. et al.* Radioaktivnoe zagryaznenie rastitel'nosti Belarusi. Minsk: Nauka i tekhnika, 1995. 578 p. (In Russian)]
  29. *Кубасова М.С.* Экологическая оценка накопления  $^{137}\text{Cs}$  лесными объектами Архангельской области: почвой, мхами, лишайниками, грибами и ягодами: Автореф. дис. ... канд. биол. наук. М., 2016. 24 с. [*Kubasova M.S.* Ekologicheskaya otsenka nakopleniya  $^{137}\text{Cs}$  lesnymi ob'ektami Arkhangel'skoi oblasti: pochvoi, mkhami, lishainikami, gribami i yagodami: [dissertation]. Moscow, 2016. 24 p. (In Russian)]
  30. *Забродский В.Н., Бондарь Ю.И., Кудин М.В., Блинова Н.В.* Динамика перехода  $^{137}\text{Cs}$  в древесину лесных насаждений зоны отчуждения по данным 2003–2015 гг. // Междунар. науч. конф. “Чернобыль: 30 лет спустя”. Гомель, 2016. С. 101–104. [*Zabrotski V.N., Bondar Yu.I., Kudzin M.V., Blinova N.V.* Dynamics of  $^{137}\text{Cs}$  transfer to the wood of forests of ChNPP Exclusion zone according to the data of 2003–2015 // Mezhdunar. nauch. konf. “Chernobyl': 30 let spustya”. (Conf. Proc.) Gomel, 2016. P. 101–104. (In Russian)]
  31. *Матусов Г.Д.* Аккумуляция  $^{137}\text{Cs}$  сосновыми насаждениями в ПГРЭЗ в различных типах леса // Сб. науч. тр. Полесского государственного радиационно-экологического заповедника “20 лет после чернобыльской катастрофы”. Хойники, 2006. С. 120–125. [*Matusov G.D.* Akkumulyatsiya  $^{137}\text{Cs}$  sosnovymi nasazhdeniyami v PGREZ v razlichnykh tipakh lesa // Trudy Poles'skogo gosudarstvennogo radiatsionno-ekologicheskogo zapovednika “20 let posle chernobyl'skoi katastrofy”. Khoyniki, 2006. P. 120–125. (In Russian)]
  32. *Бондарь Ю.И., Матусов Г.Д., Булавик И.М., Роцин В.Е.* Особенности перехода  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{90}\text{Sr}$  в древесину и

кору сосновых и лиственных насаждений в северной и южной частях заповедника // Сб. науч. тр. Полесского государственного радиационно-экологического заповедника “Экосистемы и радиация: аспекты существования и развития”. Хойники, 2013. С. 156–164. [Bondar Yu.I., Matusov G.D., Bulavik I.M., Roshchin V.E. Osobennosti perekhoda

$^{137}\text{Cs}$  и  $^{90}\text{Sr}$  v drevesinu i koru sosnovykh i listvennykh nasazhdeniy v severnoy i yuzhnoy chastyakh zapovednika. Trudy Poleskogo gosudarstvennogo radiatsionno-ekologicheskogo zapovednika “Ekosistemy i radiatsiya: aspekty sushchestvovaniya i razvitiya”. Khoyniki, 2013. P. 156–164. (In Russian)]

## Changes in the Radiation Situation in the Mossy Pine Forests of the Chernobyl NPP Exclusion Zone

D. K. Garbaruk<sup>a,#</sup>, A. V. Uglyanets<sup>a</sup>, and M. V. Kudin<sup>a</sup>

<sup>a</sup> Polesye State Radiation-Ecological Reserve, Khoyniki, Belarus

<sup>#</sup> E-mail: dima.garbaruk.77@mail.ru

The resumption of research at the permanent observation points of radiation and environmental monitoring allowed us to assess the change in the radiation situation in the mossy pine forests of the near zone of the Chernobyl NPP 30 years after the accident. The features of the dynamics of the dose rate of  $\gamma$ -radiation, the density of  $^{137}\text{Cs}$  soil contamination, and the purification of wood and pine bark from  $^{137}\text{Cs}$  over the past 20–25 years were revealed. It is established that the decrease in these indicators proceeds faster than the radioactive decay and the previously made forecasts. Updated forecasts are given. The main factors influencing the change in the radiation situation in the mossy pine forests of the of the Chernobyl NPP exclusion zone are determined.

**Keywords:**  $^{137}\text{Cs}$ , dose rate, soil contamination density, specific activity, wood, bark, mossy pine forest, exclusion zone