

УДК 630*114.351(630*176.322.6):539.163(546.36+546.42)

ЗАПАСЫ ^{137}Cs И ^{90}Sr В ЛЕСНЫХ ПОДСТИЛКАХ ДУБОВЫХ ЛЕСОВ БЛИЖНЕЙ ЗОНЫ ЧЕРНОБЫЛЬСКОЙ АЭС

А. В. УГЛЯНЕЦ¹⁾, Д. К. ГАРБАРУК¹⁾

¹⁾Полесский государственный радиационно-экологический заповедник,
ул. Терешковой, 7, 247618, г. Хойники, Беларусь

Приведены результаты изучения содержания ^{137}Cs и ^{90}Sr в лесных подстилках дубовых лесов ближней зоны Чернобыльской атомной электростанции в границах заповедной зоны Полесского государственного радиационно-экологического заповедника (ПГРЭЗ) Беларуси. В 2021 г. перед началом листопада суммарный запас ^{137}Cs в подстилках дубовой формации этой территории площадью 49,21 км² оценивался в $(1,65\text{--}2,02)\times 10^{12}$ Бк, ^{90}Sr – в $(0,51\text{--}0,80)\times 10^{12}$ Бк. Удельный вес накопленного в них ^{137}Cs составлял 40,5–45,1 % от общего запаса радионуклида в мортмассе лесных подстилок, ассоциированного с органическим веществом фитоценозов, ^{90}Sr – 33,4–50,4 %. Содержание радионуклидов в лесных подстилках дубрав пространственно крайне неоднородно. Размах колебания частных значений удельной активности ^{137}Cs в них достигал 19,4 раз, ^{90}Sr – 96, запаса ^{137}Cs – 30,5, ^{90}Sr – 146 раз. Удельная активность и запасы обоих радионуклидов в подстилках повышались в типологическом ряду дубрава прируслово-пойменная (*Quercetum sublveto-fluvialis*) – дубрава кисличная (*Q. oxalidosum*) – дубрава снытевая (*Q. aegopodiosum*) – дубрава злаково-пойменная (*Q. graminoso-fluvialis*). Пространственные величины запаса ^{137}Cs в отдельных типах леса колебались в пределах 5,5–11,1 раз, ^{90}Sr – 2,7–69,5 раз. Запасы ^{137}Cs и ^{90}Sr в лесных подстилках дубрав связаны с их удельной активностью в верхнем 20-сантиметровом слое почвы, расстоянием до места выброса радионуклидов, условиями местопроизрастания, продуктивностью древостоев, запасы ^{137}Cs – с толщиной и запасами мортмассы лесных подстилок, запасы ^{90}Sr – с долей участия в составе древостоев дуба примеси других пород. Существенное влияние на удержание радионуклидов лесными подстилками оказывают погодно-климатические факторы.

Ключевые слова: Чернобыльская атомная электростанция; ближняя зона; дубрава; лесная подстилка; ^{137}Cs ; ^{90}Sr ; удельная активность; запас радионуклида.

Благодарность. Исследования выполнены в соответствии с Программой совместной деятельности России и Беларуси в рамках Союзного государства по защите населения и реабилитации территорий, пострадавших в результате катастрофы на Чернобыльской АЭС в части ответственности белорусской стороны.

CURRENT STOCKS OF ^{137}Cs AND ^{90}Sr IN FOREST LITTERS OF OAK FORESTS IN THE CHERNOBYL NUCLEAR POWER PLANT NEAR ZONE

A. V. UGLYANETS^a, D. K. GARBARUK^a

^aPolesie State Radiation-Ecological Reserve,
7 Tserashkovay Street, Khoyniki 247618, Belarus
Corresponding author: D. K. Garbaruk (dima.garbaruk.77@mail.ru)

Образец цитирования:

Углянец АВ, Гарбарук ДК. Запасы ^{137}Cs и ^{90}Sr в лесных подстилках дубовых лесов ближней зоны Чернобыльской АЭС. Журнал Белорусского государственного университета. Экология. 2025;2:52–67.
<https://doi.org/10.46646/2521-683X/2025-2-52-67>

For citation:

Uglyanets AV, Garbaruk DK. Current stocks of ^{137}Cs and ^{90}Sr in forest litters of oak forests in the Chernobyl nuclear power plant near zone. Journal of the Belarusian State University. Ecology. 2025;2:52–67. Russian.
<https://doi.org/10.46646/2521-683X/2025-2-52-67>

Авторы:

Анатолий Владимирович Углянец – кандидат сельскохозяйственных наук, доцент; ведущий научный сотрудник отдела экологии растительных комплексов.
Дмитрий Константинович Гарбарук – заведующий отделом экологии растительных комплексов.

Authors:

Anatoliy V. Uglyanets, PhD (agriculture), docent; leading researcher at the department of ecology of vegetative complexes. uhlianets@mail.ru
Dmitriy K. Garbaruk, head of the department of ecology of vegetative complexes.
dima.garbaruk.77@mail.ru

The results of the study of ^{137}Cs and ^{90}Sr content in forest litter of oak forests of the near zone of the Chernobyl nuclear power plant within the boundaries of the protected area of the Polesky State Radiation and Ecological Reserve of Belarus are presented. In 2021, before the beginning of leaf fall, the total ^{137}Cs stock in the litter of the oak formation of this 49.21 km² area was estimated at $(1.65\text{--}2.02)\times 10^{12}$ Bq, ^{90}Sr – at $(0.51\text{--}0.80)\times 10^{12}$ Bq. The specific weight of ^{137}Cs accumulated in them amounted to 40.5–45.1% of the total radionuclide stock in the mortmass of forest litter associated with organic matter of phytocenoses, ^{90}Sr – 33.4–50.4%. The radionuclide content in forest litter of oak forests is spatially extremely heterogeneous. The range of fluctuations of specific activity of ^{137}Cs in them reached 19.4 times, ^{90}Sr – 96 times, ^{137}Cs stock – 30.5 times, ^{90}Sr – 146 times. Specific activity and stocks of both radionuclides in the litter increased in the typological series *Quercetum sublveto-fluvialis* – *Quercetum oxalidosum* – *Quercetum aegopodiosum* – *Quercetum graminoso-fluvialis*. The spatial values of ^{137}Cs stock in individual forest types varied within 5.5–11.1 times, ^{90}Sr – 2.7–69.5 times. ^{137}Cs and ^{90}Sr stocks in forest litter of oak forests are related to their specific activity in the upper 20-cm layer of soil, distance to the radionuclide release site, growing conditions, stand productivity; ^{137}Cs stocks – to the thickness and stocks of the mortmass of forest litter; ^{90}Sr stocks – to the share of other species admixture in the composition of oak stands. Weather-climatic factors have a significant influence on radionuclide retention by forest litter.

Keywords: Chernobyl Nuclear Power Plant; near zone; oak forest; forest litter; ^{137}Cs ; ^{90}Sr ; specific activity; stock of radionuclide.

Acknowledgements. This study was carried out as part of the Programme for Cooperation between Belarus and the Russian Federation for protecting the population and rehabilitating territories affected by the Chernobyl NPP catastrophe within the responsibility of the Republic of Belarus.

Введение

После аварии на Чернобыльской АЭС (ЧАЭС) на примыкающей к ней наиболее загрязненной радиоактивными веществами территории создана зона отчуждения (ЗО), а в ее границах в 1988 г. – Полесский государственный радиационно-экологический заповедник (заповедник), в котором выделена заповедная зона, расположенная выше изолинии плотности поверхностного загрязнения почвы (P_s) ^{137}Cs 1480 кБк/м². Она несколько шире 30-километровой зоны вокруг ЧАЭС и условно является территорией «ближней» зоны радиоактивных выпадений.

Высокая лесистость примыкающей к ЧАЭС местности обеспечила первичное осаждение большого количества переносимых воздушными массами радиоактивных веществ в результате их фильтрации наземной фитомассой лесных насаждений [1; 2]. В итоге, на территории заповедника осело до 30 % ^{137}Cs от выпавшего в Беларуси и 70 % ^{90}Sr ¹. Лесные экосистемы стали барьером дальнейшего распространения радиоактивных веществ, закрепляя их в биологическом круговороте, перераспределяя по своим компонентам, создавая тем самым «почвенно-растительный антинуклидный барьер» для их миграции [3]. Особую роль в этом процессе играют лесные подстилки (ЛП), представляющие важное звено в биологическом круговороте радионуклидов, удерживающие их в себе, замедляя вертикальное перемещение [1–4].

В первые месяцы после аварии на ЧАЭС почти все выпавшие в лесах радиоактивные вещества были сосредоточены на поверхности растений [1; 2]. Затем основная их часть перешла в ЛП, которая уже в августе 1986 г. в смешанных дубовых насаждениях 30-километровой зоны ЧАЭС содержала 80,5–86,4 % запаса радионуклидов от общего их количества в биогеоценозе [1]. По мере миграции радионуклидов в минеральную часть почвы, вовлечения в биологический круговорот и перераспределения по элементам фитоценозов их содержание в ЛП сокращалось. В 1992 г. в 30-километровой зоне ЧАЭС Украины в них находилось 58,3–90,5 % ^{137}Cs от суммарной P_s , в 1995 г. – до 70 % от объема радиоактивных выпадений [1]. В конце 1980-х гг. в лесах белорусской части ЗО ЧАЭС ЛП удерживали 30–75 % радионуклидов от общего количества в почве, в начале 1990-х гг. – 10–60 % [2]. Во второй половине 2000-х гг. в подстилке березняка мшистого находилось 41,9 % ^{137}Cs и 12,4 % ^{90}Sr , березняка черничного – 7,0 % ^{137}Cs и 8,3 % ^{90}Sr от их общих запасов в наземной и надземной фитомассе [5]. К концу 2010-х гг. в ЛП сосняков на автоморфных и полугидроморфных почвах содержалось 38,5–52,0 % ^{137}Cs [6] и 22,9–37,1 % ^{90}Sr [7] от их количества в фитоценозах. Через 30 лет после аварии на ЧАЭС максимальная концентрация радионуклидов в березняках переместилась из ЛП в 0–5-сантиметровые минеральные слои почв². Через 35 лет после катастрофы здесь было сосредоточено уже более половины общего запаса ^{137}Cs в подстильно-почвенном комплексе насаждений всех

¹35 лет после Чернобыльской катастрофы: итоги и перспективы преодоления ее последствий: Национальный доклад Республики Беларусь. Минск: ИВЦ Минфина; 2020. 152 с.

²30 лет чернобыльской аварии: итоги и перспективы преодоления ее последствий. Национальный доклад Республики Беларусь. Минск: Институт радиологии; 2016. 116 с.

лесообразующих древесных пород [8]. В 2023 г. содержание ^{137}Cs в органогенных слоях лесных почв ближней зоны, включая дубраву, составляло 2,4–13,7 % от общего его количества, депонированного в почвенном профиле, ^{90}Sr – 1,1–11,1 % [9].

В 2019 г. в заповедной зоне Полесского заповедника в ЛП черноольшаников, характеризующихся наименьшими запасами радионуклидов [1; 2; 4; 8], содержалось 37,7 % ^{137}Cs и 31,4 % ^{90}Sr от их запасов, суммарно накопленных в ЛП, наземной и надземной фито- и мортмассе биогеоценозов [10]. Там же в ЛП дубрав в 2021 г. было сосредоточено 21,3 % ^{137}Cs и 24,2 % ^{90}Sr от их запасов в ЛП, ассоциированных с запасами в наземной и надземной фитомассе [11]. Отметим, что в прилегающем к Семипалатинскому испытательному полигону сосновом бору в комплексе «ЛП – верхний 5-см слой почвы» на долю подстилки приходилось 80 % запаса ^{137}Cs и 64 % ^{90}Sr даже через 70 лет после радиоактивных выпадений [12]. Приведенные данные свидетельствуют о том, что ЛП остаются одним из основных «депо» радиоактивных веществ в лесных биогеоценозах, а изучение содержания в них ^{137}Cs и ^{90}Sr на современном этапе последствий аварии на ЧАЭС является актуальным вопросом.

Уровни аккумуляции радионуклидов в ЛП определяют их толщина и запас, погодно-климатические условия, влагообеспеченность почв, микробиологическая деятельность, состав и возраст древостоя, характеристики нижних ярусов фитоценозов и ряд других факторов. Наиболее значимую роль в этом процессе играют древостой, дающий основное количество опада, и его породный состав, определяющий характер разлагаемой органики, а также режим увлажнения почвы, влияющий на активность микробиоты и скорость разложения подстилки [1; 2; 4; 8; 13; 14].

Значение лесообразующей древесной породы в накоплении радионуклидов ЛП подтверждают следующие данные. Через 8 лет после аварии подстилки сосняков в ЗО ЧАЭС содержали 77–91 % валового запаса ^{137}Cs и 14–22 % ^{90}Sr , березняков – 66–84 и 35–71 %, дубрав – 27–71 и 26–28 %, черноольшаников – 13–48 и 30–61 % соответственно [15]. Этот расклад не изменился и к 2020 г., когда удельный вес запаса ^{137}Cs в ЛП в 20-сантиметровом подстильно-почвенном комплексе уменьшался в том же ряду лесных формаций: сосняки (30,9 %) > березняки (22,8 %) > дубравы (12,4 %) > черноольшаники (5,9 %) [8]. Как видим, ЛП дубрав характеризуются более низкой способностью удержания радионуклидов в сравнении с подстилками других лесных формаций, уступая лишь черноольшаникам, приуроченным к полугидроморфным и гидроморфным почвам.

Дубравы в заповеднике занимают 7863 га, или 5,6 % лесопокрываемой площади, в «ближней» зоне ЧАЭС – 4921 га, или 62,6 % площади формации. В экологической группе суходольных (условно плакорных) дубрав самыми распространенными являются кисличный (28,8 %) и снытевый (10,8 %) типы леса; в экологической группе пойменных дубрав – злаково-пойменный (10,7 %) и прируслово-пойменный (10,8 %). На них приходится 61,2 % всей площади дубрав белорусского сектора ЗО ЧАЭС.

Цель исследования – оценить запасы ^{137}Cs и ^{90}Sr в ЛП дубрав белорусского сектора «ближней» зоны ЧАЭС по состоянию на 2021 г., установить влияние на них наиболее значимых экологических факторов.

Материалы и методы исследования

Объект исследований – ЛП в естественных дубравах ближней зоны белорусского сектора ЗО ЧАЭС выше изолинии P_s ^{137}Cs 40 Ки/км² (1480 кБк/м²) на 2009 г. [16].

Изучение содержания ^{137}Cs и ^{90}Sr в ЛП проводили до начала листопада (24.08.2021–7.09.2021 г.) на момент стабилизации их мощности [17] на 25 временных пробных площадях (ВПП), в том числе в дубравах кисличных (*Quercetum oxalidosum*) – на 8 ВПП, снытевых (*Q. aegopodiosum*) – на 7 ВПП, прируслово-пойменных (*Q. sublveto-fluvialis*) – на 5 ВПП и злаково-пойменных (*Q. graminoso-fluvialis*) – на 5 ВПП. Типологическая подборка объектов вполне репрезентативна дубовой лесной формации, о чем свидетельствует покрытие насаждениями этих типов леса 64,6 % площади дубрав в заповедной зоне.

Закладку ВПП проводили в соответствии с ТКП 498-2013 (02080) «Радиационный мониторинг лесного фонда. Закладка постоянного пункта наблюдения. Порядок проведения» и описанными в источнике [18] методами. Таксацию древостоев и расчет таксационных показателей на ВПП выполнили с использованием справочников [19; 20]. Средние таксационные показатели древостоев и их диапазоны по типам дубрав приведены в табл. 1, детальные характеристики верхних ярусов – в работе [21].

На каждой ВПП в 12 точках отбирали образцы почвы с ЛП стандартным пробоотборником диаметром 4 см на глубину 20 см в соответствии с ТКП 499-2013 (02080). «Радиационный мониторинг лесного фонда. Обследование постоянного пункта наблюдения. Порядок проведения», которые высушивали до воздушно-сухого состояния, определяли в них удельную активность (A_s) ^{137}Cs и ^{90}Sr на сцинтилляционном гамма-бета-спектрометре МКС-АТ1315 (Беларусь) и рассчитывали P_s этими радионуклидами. Показатели загрязнения ими почвы по типам леса приведены на рис. 1.

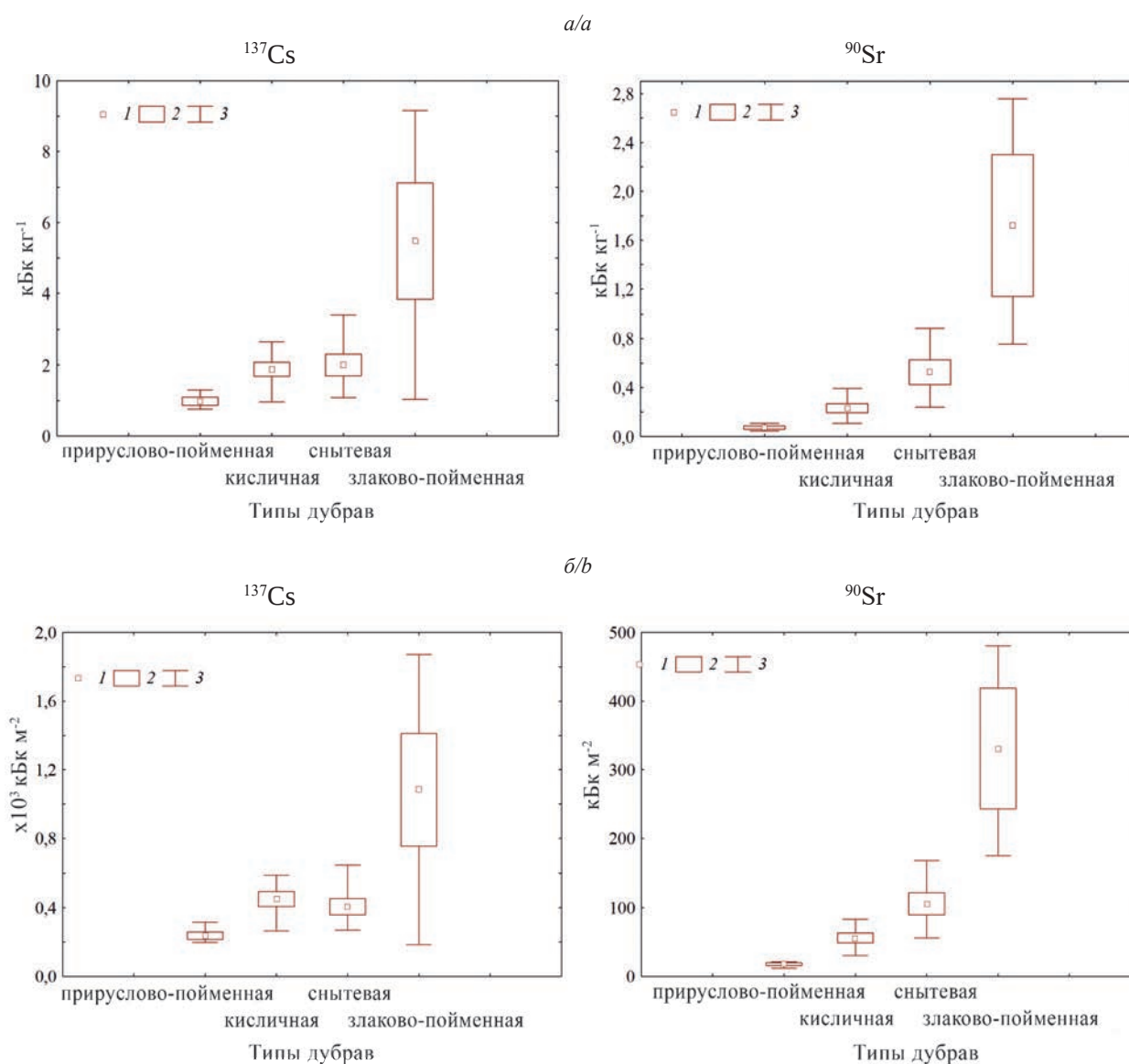


Рис. 1. Показатели загрязнения почвы радионуклидами по типам леса:
а – удельная активность, кБк/кг, б – плотность поверхностного загрязнения, кБк/м²

Fig. 1. Indicators of soil radionuclide contamination by forest types:
а – specific activity, kBq kg⁻¹, б – surface contamination density, kBq m⁻²

Таблица 1

Средние таксационные показатели древостоев дуба (числитель) и их диапазоны (знаменатель) по типам леса

Table 1

Average taxation indices of oak stands (numerator) and their ranges (denominator) by forest types

Тип леса / тип лесорастительных условий (ТЛУ)	Количество ВПП, шт.	Доля в составе, %	Возраст, лет	Средние		Класс бонитета	Густота, шт./га	Сумма площадей сечений, м²/га	Полнота	Запас, м³/га
				высота, м	диаметр, см					
				дуба						
Дубрава кисличная / D₂	8	<u>89</u> 68–100	<u>112</u> 80–130	<u>23,3</u> 20,8–27,4	<u>42,8</u> 31,6–58,9	<u>II,8</u> II–III	<u>254</u> 124–552	<u>24,2</u> 19,9–33,7	<u>0,7</u> 0,6–0,9	<u>260</u> 208–423
Дубрава снытевая / D₃	7	<u>59</u> 37–85	<u>101</u> 60–130	<u>22,1</u> 20,8–23,4	<u>42,9</u> 29,0–54,9	<u>II,6</u> I–III	<u>426</u> 128–637	<u>22,8</u> 14,1–27,6	<u>0,7</u> 0,7–0,9	<u>202</u> 133–246

Окончание табл. 1

Ending table 1

Тип леса / тип лесорастительных условий (ТЛУ)	Количество ВПП, шт.	Доля в составе, %	Возраст, лет	Средние		Класс бонитета	Густота, шт./га	Сумма площадей сечений, м²/га	Полнота	Запас, м³/га
				высота, м	диаметр, см					
				дуба						
Дубрава прируслово-пойменная / А _{2п} , В _{2п}	5	<u>92</u> 85–98	<u>72</u> 65–80	<u>12,7</u> 9,1–14,5	<u>31,3</u> 28,6–34,7	<u>IV,2</u> IV–V	<u>240</u> 157–363	<u>17,4</u> 12,1–21,6	<u>0,8</u> 0,5–1,1	<u>143</u> 121–162
Дубрава злаково-пойменная / С _{2п} , С _{3п}	5	<u>75</u> 62–98	<u>85</u> 60–130	<u>20,9</u> 17,5–25,8	<u>29,8</u> 21,8–36,9	<u>II,4</u> II–III	<u>443</u> 188–636	<u>23,9</u> 19,9–27,1	<u>0,8</u> 0,6–0,9	<u>223</u> 202–260

Дубравы прируслово-пойменные приурочены к наиболее повышенным элементам рельефа (прирусловые валы, высокие останцы надпойменных террас). Почвы в них (здесь и ниже по [22]) бедные аллювиальные иловато-песчаные. Дубравы кисличные покрывают плоские и слегка повышенные участки моренных равнин, подножья склонов водно-ледниковых возвышенностей, гряды и гривы надпойменных террас Припяти. Почвы под ними автоморфные супесчаные на песках или рыхлых супесях сменяемых рыхлыми песками или моренными суглинками с глубины до 1 м. Дубравы снытевые произрастают в понижениях моренных равнин, подножьях водно-ледниковых возвышенностей, склонах и пониженных частях грив надпойменных террас. Почвы полугидроморфные глееватые песчаные и супесчаные на связных и рыхлых песках, сменяемых песками рыхлыми или подстилаемые суглинками моренными с глубины до 1 м. Дубравы злаково-пойменные занимают плоские гривы, повышенные плоские участки поймы, как правило, затопливаемые паводковыми водами. Почвы аллювиальные дерново-глееватые и глеевые на песчаном и супесчаном аллювии. По классификации [23] ЛП в дубраве прируслово-пойменной относятся к деструктивному, в кисличной – преимущественно к ферментативному, в злаково-пойменной и снытевой – преимущественно к гумифицированному типам.

Образцы ЛП отбирали на 15 учетных площадках на каждой ВПП. Методы и результаты изучения характеристик ЛП в дубравах ЗО ЧАЭС изложены в работе [24]. Основные их параметры по типам леса приведены в табл. 2.

Таблица 2

Средние показатели характеристик лесных подстилок по типам леса

Table 2

Average forest litter characteristics by forest type

Показатель лесной подстилки	Дубрава			
	прируслово-пойменная	кисличная	снытевая	злаково-пойменная
Количество переменных	75	120	105	75
Толщина, см	1,7 ± 0,10	2,5 ± 0,09	2,6 ± 0,12	2,9 ± 0,14
Запас, кг/м²	1,6 ± 0,10	2,1 ± 0,10	2,7 ± 0,13	2,0 ± 0,10

Примечание. Точность определения толщины ЛП составила 3,7–5,8 %, запаса ЛП – 4,8–6,5 %.

Для определения концентрации радионуклидов в ЛП на каждой ВПП отбирали средние пробы ЛП из 15 смешанных образцов, делили их на 3 равные части и в каждой определяли $As^{137}Cs$ и ^{90}Sr на сцинтилляционном гамма-бета-спектрометре. Величины $As^{137}Cs$ и ^{90}Sr в ЛП на ВПП получали путем вычисления средних арифметических из трех измеренных частей пробы. На основе данных $As^{137}Cs$ и ^{90}Sr и запасов ЛП рассчитывали запас (Mr) каждого радионуклида в ЛП.

Обработку материалов производили при помощи стандартных пакетов прикладных программ *Microsoft Excel 2010* и *Statistica 6.1*.

Достоверность различий ($t_{\text{факт.}}$) для двух сравниваемых малых выборок ($n < 20$) рассчитывали по формуле:

$$t_{\text{факт.}} = (M_1 - M_2) \sqrt{\frac{1 - 2(n_1 + n_2)^{-1}}{\frac{\sigma_1^2}{n_2} + \frac{\sigma_2^2}{n_1}}},$$

где M – среднее значение выборки; σ – стандартное отклонение.

Результаты исследования и их обсуждение

Содержание радионуклидов в лесных подстилках дубрав. As ^{137}Cs и ^{90}Sr в ЛП дубовых лесов варьирует в очень широких пределах. Размах колебаний частных значений As ^{137}Cs в ЛП в пределах типов леса составляет 3,4–8,6 раза, As ^{90}Sr – 2,2–85,6 раз (табл. 3). Общая изменчивость индивидуальных величин As ^{137}Cs в дубовой лесной формации достигает 19 раз и ^{90}Sr – 96 раз.

Таблица 3

Статистические показатели удельной активности ^{137}Cs и ^{90}Sr в лесных подстилках, кБк/кг

Table 3

Statistical indicators of the ^{137}Cs and ^{90}Sr specific activity in forest litters, kBq kg⁻¹

Статистический показатель	Дубрава			
	прируслово-пойменная	кисличная	снытевая	злаково-пойменная
n	5	8	7	5
^{137}Cs				
min–max	2,77–9,44	7,06–30,58	4,39–25,00	6,22–53,84
Ci	0,97–7,94	9,79–23,57	9,78–22,39	6,43–56,51
$M \pm m$	4,46 ± 1,26	16,68 ± 2,91	16,08 ± 2,58	31,47 ± 9,02
σ	2,81	8,24	6,82	20,16
Cv	63,0	49,4	42,4	64,1
G	3,96	15,07	14,30	24,68
Me	3,42	14,74	18,92	27,32
^{90}Sr				
min–max	0,60–1,35	0,58–4,96	1,68–6,82	0,65–55,64
Ci	0,58–1,34	2,33–4,62	2,59–5,58	–9,77–46,23
$M \pm m$	0,96 ± 0,14	3,48 ± 0,48	4,08 ± 0,61	18,23 ± 10,08
σ	0,31	1,37	1,62	22,55
Cv	32,0	39,3	39,6	123,7
G	0,92	3,02	3,78	6,25
Me	0,88	3,84	4,08	13,50

Примечание. Здесь и далее: n – количество ВПП, min и max – минимальное и максимальное значения, Ci – доверительный интервал на 95 % уровне значимости, M – среднее арифметическое значение, $\pm m$ – стандартная ошибка среднего значения, σ – среднеквадратическое отклонение, Cv – коэффициент вариации, %, G – среднее геометрическое, Me – среднее срединное значение, медиана.

Наименьшая средняя арифметическая As ^{137}Cs в ЛП установлена в дубравах прируслово-пойменных. В кисличном и снытевом типах леса она увеличивается в 3,5 раза и максимума достигает в ЛП дубрав злаково-пойменных. Достоверно по этому показателю различаются только дубрава прируслово-пойменная с дубравами кисличной ($t_{\text{факт.}} = 2,909 > t_{0,95} = 2,228$), снытевой ($t_{\text{факт.}} = 3,332 > t_{0,95} = 2,201$) и злаково-пойменной ($t_{\text{факт.}} = 2,654 > t_{0,95} = 2,306$). Средние арифметические величины As ^{90}Sr в ЛП возрастают в ряду дубрава прируслово-пойменная < дубрава кисличная < дубрава снытевая < дубрава злаково-пойменная. По концентрации радионуклида в ЛП достоверно между собой различаются дубрава прируслово-пойменная с дубравами кисличной ($t_{\text{факт.}} = 3,742$) и снытевой ($t_{\text{факт.}} = 3,881$).

В большинстве типов леса наблюдается обычная для радиоэкологических исследований вариабельность средних арифметических величин As ^{137}Cs и ^{90}Sr в ЛП (32–64 %), в то время как коэффициент вариации средней концентрации ^{90}Sr в подстилках дубравы злаково-пойменной чрезвычайно высокий.

Так как в пойменных дубравах доверительные интервалы $As^{137}Cs$ и ^{90}Sr в ЛПП односторонне выходят за границы выборок, то для более адекватной оценки средних ее значений по типам леса дополнительно были рассчитаны медианные и средние геометрические значения As обоих радионуклидов. Их величины существенно отклоняются от средних арифметических только по $As^{90}Sr$ и, в меньшей степени, по $As^{137}Cs$ в ЛПП дубравы злаково-пойменной. Акцентируем внимание на том, что значения всех трех средних показателей As обоих радионуклидов в ЛПП синхронно увеличиваются в типологическом ряду дубрава прируслово-пойменная < дубрава кисличная ≤ дубрава снытевая < дубрава злаково-пойменная.

$Mr^{137}Cs$ и ^{90}Sr в ЛПП дубрав ЗО ЧАЭС крайне неоднородны (табл. 4). Отношения частных максимальных определений $Mr^{137}Cs$ к минимальным по типам леса составляет 5,5–11,1 раз, в целом по формации – 30,5 раз; для $Mr^{90}Sr$ они равны 2,7–69,5 и 146 раз соответственно.

Таблица 4

Статистические показатели запасов ^{137}Cs и ^{90}Sr в лесных подстилках, $кБк/м^2$

Table 4

Statistical indicators of the ^{137}Cs and ^{90}Sr stocks in forest litters, $кБк м^{-2}$

Статистический показатель	Дубрава			
	прируслово-пойменная	кисличная	снытевая	злаково-пойменная
^{137}Cs				
n	5	8	7	5
min–max	3,60–19,82	11,30–64,21	6,15–68,40	14,32–109,84
Ci	0,00–16,28	20,26–49,95	23,84–67,27	17,60–109,92
$M \pm m$	$7,80 \pm 3,06$	$35,10 \pm 6,28$	$45,56 \pm 8,87$	$61,06 \pm 17,60$
σ	6,84	17,76	23,48	39,35
Cv	87,7	50,6	51,5	64,4
G	6,20	31,02	36,33	48,79
Me	5,42	29,62	56,53	54,12
^{90}Sr				
min–max	0,84–2,24	1,15–11,00	2,19–24,56	1,76–122,40
Ci	0,80–2,27	4,71–9,81	4,99–18,78	0,00–38,19
$M \pm m$	$1,54 \pm 0,26$	$7,26 \pm 1,08$	$11,88 \pm 2,83$	$35,73 \pm 22,50$
σ	0,59	3,05	7,46	50,30
Cv	38,4	42,0	62,7	140,8
G	1,44	6,21	9,61	12,35
Me	1,75	7,85	10,31	17,55

Средние арифметические значения $Mr^{137}Cs$ в ЛПП возрастают в ряду дубрава прируслово-пойменная – дубрава кисличная – дубрава снытевая – дубрава злаково-пойменная. Но из-за высокой вариабельности средних значений (51–88 %) достоверно по этому показателю различаются только дубрава прируслово-пойменная от дубрав кисличной ($t_{факт.} = 3,025$), снытевой ($t_{факт.} = 3,187$) и злаково-пойменной ($t_{факт.} = 2,667$). Средние запасы ^{90}Sr в ЛПП увеличиваются в той же последовательности типов леса при достоверных различиях между дубравой прируслово-пойменной, с одной стороны, и дубравами кисличной ($t_{факт.} = 3,813$) и снытевой ($t_{факт.} = 2,823$) – с другой.

Доверительные интервалы запасов обоих радионуклидов в ЛПП дубрав имеют, как правило, односторонние выходы за диапазоны выборок. Рассчитанные в связи с этим средние геометрические и медианные значения $Mr^{137}Cs$ в той или иной мере отклоняются от средних арифметических величин, чаще в сторону уменьшения, во всех типах дубрав, кроме снытевой. Те же средние величины $Mr^{90}Sr$ в ЛПП в основном близки к средним арифметическим значениям, но в 2 раза меньше их в дубраве злаково-пойменной. Тем не менее, и медианные и средние геометрические значения запасов ^{137}Cs и ^{90}Sr в ЛПП возрастают в типологическом ряду дубрава прируслово-пойменная < дубрава кисличная < дубрава снытевая < дубрава злаково-пойменная, за исключением близости медианных значений $Mr^{137}Cs$ в дубравах снытевых и злаково-пойменных. Из приведенного анализа следует, что тенденция повышения абсолютного большинства показателей загрязнения ЛПП в дубравах ЗО ЧАЭС ^{137}Cs и ^{90}Sr в приведенном типологическом ряду (табл. 3, 4) является универсальной.

Факторы, влияющие на накопление радионуклидов в ЛПП. Содержание радионуклидов в ЛПП зависит от количества изначально осажденных радиоактивных веществ, последующего их перераспределения

между элементами лесного биогеоценоза, и, в частности, от их баланса в звеньях биологического круговорота «фитоценоз – подстилка» и «подстилка – почва». Перемещение радионуклидов в них обусловлено рядом взаимосвязанных факторов, включающих запасы радионуклидов в экосистемах, степень загрязнения ими опада, интенсивность вертикального перераспределения в ЛП. В соответствии с [1] As радионуклидов в опаде зависит от Ps , породного состава древостоя, почвенных условий и определяющих интенсивность пылепереноса климатических факторов. Уровни загрязнения ЛП определяются характеристиками биогеоценозов, условиями местопроизрастания, составом, толщиной и запасами биомассы ЛП и микробиологической деятельностью в них при ведущей роли фактора влагообеспеченности почв [1; 2; 4; 8; 13; 14]. Влажность почв, в свою очередь, зависит от их гранулометрического состава, положения в рельефе, глубины залегания грунтовых вод, паводковых явлений, погодно-климатических условий.

Насаждения разных типов дубрав различаются между собой по таксационным характеристикам древостоя, индексам влажности и трофности эдафотопов (табл. 1), толщине и запасу ЛП (табл. 2) и другим показателям.

Связь загрязнения ЛП и почвы радионуклидами в лесных биогеоценозах самая непосредственная, так как, во-первых, ЛП является верхним горизонтом и составной частью лесных почв, во-вторых, почти все осаждаемое при аварии количество ^{137}Cs и ^{90}Sr прошло через ЛП [1] и в настоящее время основные их запасы сосредотачиваются в минеральных горизонтах почвы¹ [8; 9].

Так как As радионуклидов в опаде напрямую зависит от Ps ими почв [1], то вполне логичной является связь показателей загрязнения ЛП дубрав ^{137}Cs и ^{90}Sr с показателями загрязнения 20-сантиметрового подстильно-почвенного комплекса. Это подтверждает тесная корреляция запасов этих радионуклидов с As почвы и Ps в черноольховых лесах ЗО ЧАЭС [25] и почти синхронное изменение показателей As и Mr ^{137}Cs и ^{90}Sr в ЛП с Ps в типологическом ряду исследованных дубрав (рис. 2).

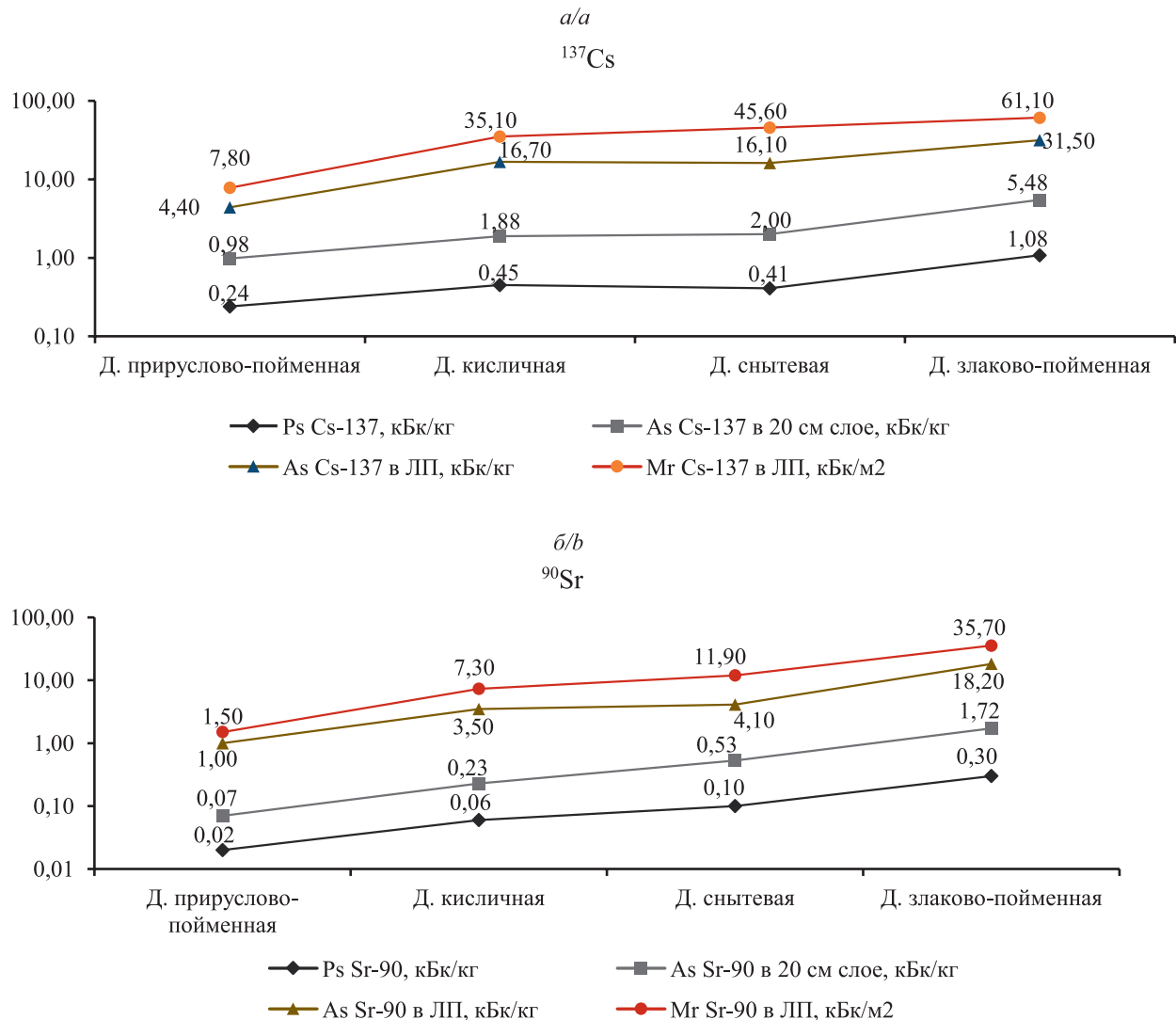


Рис. 2. Показатели загрязнения почвы и лесной подстилки а – ^{137}Cs и б – ^{90}Sr по типам леса

Fig. 2. Indicators of soil and forest litter contamination with а – ^{137}Cs and б – ^{90}Sr by forest types

Критерий Шапиро – Уилка показал, что статистическое распределение большинства включаемых в анализ показателей отличается от нормального (табл. 5), поэтому для определения искомых зависимостей применен коэффициент ранговой корреляции Спирмена.

Таблица 5

Проверка переменных на нормальность распределения (n = 25)

Table 5

Checking variables for the normality of the distribution (n = 25)

Показа- тель	Удельная активность, кБк/кг				Запас в лесной подстилке, кБк/м ²		Плотность загрязнения почвы, кБк/м ²		Расстояние до ЧАЭС, км	Лесная подстилка	
	лесной подстилки		почвы							толщина, см	запас, кг/м ²
	¹³⁷ Cs	⁹⁰ Sr	¹³⁷ Cs	⁹⁰ Sr	¹³⁷ Cs	⁹⁰ Sr					
<i>W</i>	0,895	0,467	0,667	0,650	0,476	0,469	0,682	0,700	0,854	0,939	0,876
<i>p</i>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,14*	0,01

Примечание. * – нормальное распределение.

Для ЛП дубрав 30 ЧАЭС установлены прямые значимые (здесь и далее – для $p < 0,05$) высокие (здесь и далее – по Чеддоку) корреляции As и Mr ¹³⁷Cs в ЛП с As ¹³⁷Cs в почве и с Ps ¹³⁷Cs, а также As и Mr ⁹⁰Sr в ЛП с As ⁹⁰Sr в почве и с Ps ⁹⁰Sr (табл. 6).

Таблица 6

Коэффициенты корреляции Спирмена между показателями загрязнения лесных подстилок радионуклидами и исследуемыми факторами (n = 25)

Table 6

Spearman correlation coefficients between indicators of contamination of forest litter with radionuclides and the studied factors (n = 25)

Показатель	Удельная активность в лесной подстилке, кБк/кг		Запас в лесной подстилке, кБк/м ²	
	¹³⁷ Cs	⁹⁰ Sr	¹³⁷ Cs	⁹⁰ Sr
Удельная активность в почве, кБк/кг	0,88*	0,85*	0,85*	– 0,89*
Плотность загрязнения почвы, кБк/м ²	0,83*	0,87*	0,73*	0,90*
Расстояние до ЧАЭС, км	–0,46*	–0,64*	–0,50*	–0,57*
Толщина лесной подстилки, см	0,58*	0,17	0,71*	0,36
Запас лесной подстилки, кг/м ²	0,39	0,18	0,63*	0,38

Примечание. * – значения достоверны на 95 % уровне значимости.

Фактор расстояния до ЧАЭС. С удалением от места выброса радиоактивных веществ имеет место тенденция к снижению количества выпавших радионуклидов, изменению их состава и формы [2; 4; 16], ускоряется интенсивность миграции из ЛП [1], что влияет на загрязнение радионуклидами различных элементов биогеоценозов. Так, исследованиями [21; 26] выявлены обратные значимые корреляционные связи Ps ¹³⁷Cs, As ¹³⁷Cs в древесине и неокоренных стволах дуба, Ps ⁹⁰Sr, As ⁹⁰Sr в почве, древесине, коре и неокоренных стволах этой породы с расстоянием до реактора в дубравах ближней зоны ЧАЭС.

Установлена обратная слабая значимая корреляция расстояния до ЧАЭС с концентрацией ¹³⁷Cs в ЛП и обратные средние значимые связи с As ⁹⁰Sr в ЛП и с Mr обоих радионуклидов (табл. 6). Низкую силу корреляционных связей обусловили пространственная мозаичность выпадения радионуклидов [1; 2; 16] и влияние других факторов.

Связь загрязнения ЛП радионуклидами с характеристиками подстилок. На корреляцию содержания радионуклидов в ЛП с их мощностью, составом и строением указывается в работе [1], при этом связь активности ¹³⁷Cs с толщиной подстилки прослеживается только до ее мощности 3,5–4 см. Для чистых сосняков установлена достоверная функциональная зависимость между мортмассой полнопрофильных ЛП и количеством в них ¹³⁷Cs и ⁹⁰Sr [2].

В лиственных лесах обычно образуются тонкие неполнопрофильные слабо удерживающие радионуклиды ЛП [1]. В исследованных дубравах их средняя мощность не превышает 3 см, а запасы биомассы варьируют в пределах 1,6–2,7 кг/м² (табл. 2). Толщина ЛП находится в прямой значимой средней по силе связи с A_s ¹³⁷Cs в них и значимой высокой – с Mr ¹³⁷Cs в ней, а мортмасса ЛП со средней силой значимо коррелирует с Mr ¹³⁷Cs. Статистические связи между характеристиками ЛП и показателями их загрязнения ⁹⁰Sr не выявлены (табл. 6).

Связь загрязнения ЛП радионуклидами с таксационными характеристиками древостоев. Загрязнение ЛП ¹³⁷Cs определено его поступлением с растительным опадом и в значительной мере зависит от типа биогеоценоза, а содержание радионуклида в опаде обусловлено уровнем его накопления в древостое [1]. В черноольшаниках ЗО ЧАЭС связи между содержанием ¹³⁷Cs и ⁹⁰Sr в ЛП и таксационными показателями древостоев не установлены [25]. В разновозрастном ельнике с примесью березы повислой отмечена значимая положительная корреляция A_s ¹³⁷Cs в ЛП с густотой древостоя [27].

На основании того, что распределения, отличными от нормальных, характеризуются все показатели загрязнения радионуклидами ЛП (табл. 5) и большинство таксационных показателей древостоев дубрав (табл. 7), то при оценке статистических связей между ними использован коэффициент ранговой корреляции Спирмена.

Установлены средние значимые корреляции A_s ¹³⁷Cs и Mr ¹³⁷Cs с классом бонитета, определяющим продуктивность древостоев, со средней высотой деревьев дуба, с суммой площадей сечений и с запасом стволовой древесины, то есть непосредственно с показателями их продуктивности, а также прямые преимущественно средние значимые корреляции A_s ⁹⁰Sr и Mr ⁹⁰Sr в ЛП с классом бонитета и долей примеси в общем составе дубовых древостоев и обратные – со степенью участия в нем дуба (табл. 7).

Таблица 7

Проверка переменных на нормальность распределения и коэффициенты корреляции Спирмена между показателями загрязнения лесной подстилки ¹³⁷Cs и ⁹⁰Sr и таксационными показателями древостоев

Table 7

Checking variables for normality of distribution and Spearman correlation coefficients between forest litter ¹³⁷Cs and ⁹⁰Sr contamination indicators and stand taxation indicators

Удельная актив- ность (A_s) и запас (Mr) ^{137}Cs и ^{90}Sr в подстилке	Доля дуба, %		Доля примеси в общем составе, %	Воз- раст, лет	Средние		Класс бони- тета	Число стволов, шт./га	Сумма площа- дей сечений, м ² /га	Пол- нота	Ство- ловый запас, м ³ /га
	в верх- нем ярусе	в общем составе			высота, м	диа- метр, см					
W	0,912	0,899	0,899	0,909	0,904	0,964	0,886	0,868	0,975	0,957	0,871
P	0,03	0,02	0,02	0,03	0,02	0,50*	0,01	0,00	0,78*	0,36*	0,00
A_s ^{137}Cs , Бк/кг	−0,25	−0,24	0,24	0,30	0,60**	0,06	0,70**	0,19	0,52**	0,15	0,65**
Mr ^{137}Cs , Бк/м ²	−0,38	−0,33	0,32	0,21	0,54**	0,11	0,67**	0,12	0,40**	0,04	0,52**
A_s ^{90}Sr , Бк/кг	−0,66**	−0,60**	0,58*	−0,02	0,27	−0,12	0,61**	0,38	0,32	0,03	0,36
Mr ^{90}Sr , Бк/м ²	−0,72**	−0,59**	0,58*	−0,05	0,27	−0,02	0,64**	0,26	0,30	−0,04	0,34

Примечание. W – индекс Шапиро–Уилкса, P – показатель точности, A_s – удельная активность, Mr – запас радионуклидов в ЛП, * – нормальное распределение, ** – статистически значимые результаты при $p < 0,05$.

Полагаем, что связь класса бонитета и продуктивности древостоев с активностью радионуклидов в ЛП объясняется тем, что на более производительных почвах формируются более продуктивные насаждения, дающие больше опада, содержащего большее количество радиоактивных веществ.

Связи показателей содержания ⁹⁰Sr в ЛП со степенью участия дуба и примеси других пород в составе древостоев обусловлены видовой спецификой накопления радиоактивных веществ структурными компонентами растений, прежде всего преобладающими в составе опада лесных насаждений листьями деревьев [1; 28], а также особенностями миграции ⁹⁰Sr в подстилке [2; 3]. Так как из-за медленного разложения листьев дуба основную роль в переходе ¹³⁷Cs из ЛП дубрав в подподстилочные слои почвы играет опад подлесочных пород [8], то полагаем, что аналогичное влияние на миграцию ⁹⁰Sr в подстилке исследованных насаждений оказывает опад граба. Граб в значительном количестве (до 40 % запаса) присутствует в господствующих ярусах обследованных древостоев и имеет абсолютное доминирование в подчиненных [29]. Листья дуба характеризуются наименьшей активностью ⁹⁰Sr в сравнении с листьями сосны, ольхи

черной, березы, осины [1]. Показатели накопления ^{90}Sr в листьях подроста граба в дубравах в 1,5–2,5 раза выше, чем в листьях дуба (табл. 8). Концентрация радионуклидов в живых и опавших листьях дуба близка, в то время как в листовом опаде других лиственных пород она выше, чем в вегетирующих [1]. Из этого следует, что с увеличением примеси граба и других пород в древостоях, поступающее в ЛП количество более загрязненного ^{90}Sr листового опада возрастает, а менее загрязненного им опада дуба – уменьшается.

Таблица 8

Показатели содержания ^{90}Sr в листьях подроста дуба и граба

Table 8

Indices of ^{90}Sr content in leaves of oak and hornbeam undergrowths

Тип леса	Удельная активность, Бк/кг		Коэффициент перехода, м ² /кг		Коэффициент накопления	
	дуб	граб	дуб	граб	дуб	граб
Дубрава кисличная / D ₂	1375	3382	0,022	0,055	4,76	11,70
Дубрава снытевая / D ₃	1746	2541	0,010	0,015	1,97	2,87

Погодно-климатические условия³, главным образом осадки, существенно влияют на накопление и разложение опада [30], поступление радионуклидов в ЛП и миграцию их в минеральные слои почв [1]. С конца 1980-х гг. в Полесье наблюдается потепление и аридизация климата [31; 32]. Влияние этого процесса на леса выражается в понижении уровней грунтовых вод, ухудшении влагообеспеченности первых весенних месяцев, увеличении дефицита влаги летом⁴. По данным исследовательской станции «Масаны», расположенной на территории ЗО ЧАЭС, в период региональной засухи 2015–2021 гг. количество осадков было ниже среднееголетней нормы или близко к ней, что в совокупности с повышенной температурой воздуха формировало дефицит увлажнения территории (табл. 9). Это привело к опусканию уровней подземных вод, пониженных в результате широкомасштабного осушения болот Полесья в 1950–1980 гг., иссушению верхних слоев почв и ЛП, замедлению разложения органического вещества. В итоге увеличились мощность и запас ЛП, а следовательно, и удерживаемое ими количество радионуклидов. Таким образом, воздействие погодно-климатических условий на содержание радионуклидов в ЛП проявляется через обеспечение влагой дубовых фитоценозов.

Таблица 9

Показатели тепло- и влагообеспеченности территории зоны отчуждения Чернобыльской АЭС за май–сентябрь (числитель) и за год (знаменатель), по данным научно-исследовательской станции «Масаны»

Table 9

Indicators of heat and moisture availability in the Chernobyl NPP exclusion zone territory for May-September (numerator) and for a year (denominator) according to the data of the research station «Masany»

Год	Метеорологический показатель		
	средняя температура воздуха, °C	количество осадков, мм	коэффициент увлажнения по Иванову
2015	17,9 / 8,7	180,2 / 453,9	0,36 / 0,54
2016	17,6 / 8,7	280,6 / 722,3	0,64 / 1,08
2017	17,2 / 8,4	311,0 / 652,1	0,72 / 1,04
2018	18,6 / 8,7	297,3 / 556,7	0,54 / 0,70
2019	17,9 / 9,3	183,1 / 377,1	0,46 / 0,55
2020	17,6 / 10,0	385,7 / 622,1	0,95 / 0,91
2021	17,7 / 8,2	295,0 / 519,1	0,81 / 0,75

Примечание. Среднееголетняя норма количества осадков – 609 мм, температуры воздуха – +7,8 °C [33].

³ Данный пункт является результатом логического анализа.
⁴ Стратегия адаптации лесного хозяйства Республики Беларусь к изменению климата на период до 2050 года. Минск: Минлесхоз; 2011. 119 с.

Влияние условий местопроизрастания. В работе [2] указывается на неоднозначность литературных сведений о влиянии условий местопроизрастания на накопление радионуклидов в ЛП. Их способность удерживать радиоактивные вещества возрастает от гидроморфных и полугидроморфных почв до автоморфных [1; 2]. В ЛП сосняков с повышением трофности и влажности почв происходит снижение запаса ^{137}Cs и ^{90}Sr [2]. В распределении радионуклидов по компонентам фитоценозов, включая подстилку, доля содержания ^{137}Cs в ЛП березняка черничного в сравнении с березняком мшистым уменьшается в 6 раз, ^{90}Sr – в 1,5 раза [5], что свидетельствует о значительном влиянии типа леса и типа лесорастительных условий на загрязнение подстилок радионуклидами в лиственных лесах. Быстрее всего от ^{137}Cs освобождаются ЛП на плодородных (трофотопы С и D) мокрых, сырых и влажных почвах [8]. Имеется информация о снижении ^{137}Cs и ^{90}Sr в ЛП дубрав ЗО ЧАЭС при повышении уровней грунтовых вод [34].

Запасы радионуклидов в ЛП возрастают в ряду типов леса дубрава прируслово-пойменная – дубрава кисличная – дубрава снытевая – дубрава злаково-пойменная ($A_2, B_2 - D_2 - D_3 - C_{2-3}$). В этом же ряду понижается рельеф, уровень грунтовых вод приближается к дневной поверхности, увеличивается влажность почв и улучшается их влагообеспеченность в целом [24]. В том же направлении растут мощность ЛП (табл. 2) и запасы в ней ^{137}Cs и ^{90}Sr (табл. 3, 4).

Количество радиоактивных выпадений в лесах определяется условиями их осаждения, геоморфологией поверхности, типом биогеоценоза, составом древесного яруса [1; 2; 14]. Минимальные запасы ^{137}Cs и ^{90}Sr в ЛП дубрав прируслово-пойменных обусловлены произрастанием насаждений на повышенных элементах рельефа открытой и полукрытой поймы [21], самыми низкими показателями густоты и продуктивности древостоев (табл. 1), тонкими подстилками с малыми запасами мортмассы (табл. 2). Близкие уровни ^{137}Cs и ^{90}Sr в ЛП дубрав кисличных и снытевых (табл. 3) обеспечены одинаковыми условиями выпадения радионуклидов [21], выравниванием толщины подстилки в связи с засушливыми погодными условиями [24]. В дубравах злаково-пойменных, благодаря периодическому весеннему подтоплению и более близкому залеганию грунтовых вод летом и осенью, формируются более мощные ЛП с запасами близкими к дубравам кисличным. Однако высокое их загрязнение радионуклидами определено преобладающим фактором близости к ЧАЭС.

Таким образом, условия местопроизрастания дифференцируют характеристики ЛП в дубравах и являются одним из значимых факторов, определяющих уровни их загрязнения.

Суммарный запас ^{137}Cs в ЛП дубрав ближней зоны ЗО ЧАЭС на площади 49,21 км² по разным средним значениям оценивается от 1654,5 до 2017,6×10⁹ Бк, ^{90}Sr – от 398,0 до 805,8×10⁹ Бк (табл. 10), с наиболее вероятными величинами – 1865×10⁹ Бк ^{137}Cs и 456×10⁹ Бк ^{90}Sr .

Таблица 10

Оценочный запас радионуклидов в лесной подстилке дубрав ближней зоны Чернобыльской АЭС

Table 10

Estimated stock of radionuclides in the forest litter of oak forests in the near zone of the Chernobyl NPP

Показатель		Дубрава				Всего по дубовой формации
		кисличная, орляковая, черничная	снытевая, папоротниковая, крапивная	прируслово-пойменная	злаково-пойменная, ольхово-пойменная, широколиственно-пойменная, пойменная	
Площадь, га		1461,0	1051,3	835,7	1573,2	4921,2
Запас ^{137}Cs в ЛП, кБк/м ²	M	35,10	45,56	7,80	61,06	–
	G	31,02	36,33	6,20	48,79	–
	Me	29,62	56,53	5,42	54,12	–
Запас ^{90}Sr в ЛП, кБк/м ²	M	7,26	11,88	1,54	35,73	–
	G	6,21	9,61	1,44	12,35	–
	Me	7,85	10,31	1,75	17,55	–
Общий запас ^{137}Cs в ближней зоне, 10 ⁹ Бк	M	512,8	479,0	65,2	960,6	2017,6
	G	453,2	381,9	51,8	767,6	1654,5
	Me	432,7	594,3	45,3	851,4	1923,7
Общий запас ^{90}Sr в ближней зоне, 10 ⁹ Бк	M	106,1	124,9	12,7	562,1	805,8
	G	90,7	101,0	12,0	194,3	398,0
	Me	114,7	108,4	14,6	276,1	513,8

Примечание. Полужирным шрифтом выделены базовые типы леса дубрав.

При оценке запасов радионуклидов в ЛП дубрав произвели группировку типов леса путем их присоединения к базовым (для которых выполнены расчеты запасов ^{137}Cs и ^{90}Sr в ЛП) с учетом условного сходства эдафических условий, близости классов бонитета, определенных на основе анализа лесотипологических таблиц [35]. В группу дубравы кисличной (D_2) включили дубравы орляковую (C_2) и черничную (C_3), характеризующиеся III и II классами бонитетов; в группу дубравы снытевой (D_3) – дубравы крапивную (D_4) и папоротниковую (C_4) I–II бонитетов, произрастающие на влажных и сырых почвах. К локализованной на наиболее бедных почвах дубраве прируслово-пойменной (IV класс бонитета) другие типы леса не присоединяли. Все остальные типы пойменных дубрав III и II классов бонитета объединили в группу дубравы злаково-пойменной.

На основе данных работы [11], с учетом рассчитанных запасов ^{137}Cs и ^{90}Sr в ЛП (табл. 10) установлено, что удельный вес запаса ^{137}Cs в подстилках составлял 40,5–45,1 % (в среднем 43,1 %) от общего запаса радионуклида, ассоциированного с органическим веществом в фитоценозе; аналогичный показатель для ^{90}Sr – 33,4–50,4 % (36,5 %). Таким образом, ЛП в биоценозах дубрав ближней зоны ЧАЭС через 35 лет после выпадения радиоактивных веществ продолжают оставаться значимыми аккумуляторами ^{137}Cs и ^{90}Sr .

Заключение

Лесные подстилки дубрав ближней зоны ЧАЭС на протяжении 35 лет с момента аварии являются одним из основных хранилищ радионуклидов. На начало осени 2021 г. суммарный запас ^{137}Cs в них оценивался в среднем от 1,65 до $2,02 \times 10^{12}$ Бк, ^{90}Sr – от 0,51 до $0,80 \times 10^{12}$ Бк, или в среднем 43,1 % ^{137}Cs и 36,5 % ^{90}Sr от их запаса, ассоциированного с органическим веществом фитоценоза.

Запасы ^{137}Cs и ^{90}Sr в ЛП дубовых лесов пространственно неоднородны. Запасы и удельная активность обоих радионуклидов в ЛП увеличиваются в ряду типов леса дубрава прируслово-пойменная < дубрава кисличная ≤ дубрава снытевая < дубрава злаково-пойменная.

Содержание ^{137}Cs и ^{90}Sr в ЛП дубрав коррелируют с их удельной активностью в 20-сантиметровом почвенно-подстилочном слое, зависят от условий местопроизрастания, погодно-климатических факторов, продуктивности древостоев, а также мощности и запасов мортмассы ЛП (^{137}Cs), доли примеси лиственных пород в составе древостоев (^{90}Sr).

Библиографические ссылки

1. Щеглов АИ. *Биогеохимия техногенных радионуклидов в лесных экосистемах: по материалам 10-летних исследований в зоне влияния аварии на ЧАЭС*. Москва: Наука; 2000. 268 с.
2. Переволоцкий АН. *Распределение ^{137}Cs и ^{90}Sr в лесных биогеоценозах*. Гомель: Институт радиологии; 2006. 255 с.
3. Ипатьев ВА, Булко НИ, Митин НВ, Шабалева МА, Диденко ЛГ. *Радиоэкологический феномен лесных экосистем*. Гомель: ИЛ НАН Беларуси; 2004. 310 с.
4. Ипатьев ВА, Багинский ВФ, Булавик ИМ, Дворник АМ, Волчков ВЕ, Гончаренко ГГ, Поджаров ВК, Булко НИ, Бордок ИВ, Волович ПИ, Гедых ВБ, Гримашевич ВВ, Диденко ЛГ, Есимчик ЛД, Жученко ТА, Кейзер ГИ, Ковалевич АИ, Кожевников АМ, Колодий ПВ, Копытков ВВ, Крушев ЛТ, Марченко ЯИ, Митин НВ, Падутов АЕ, Падутов ВЕ, Переволоцкий АН, Пикунлик ММ, Сидор АИ, Силин АЕ, Степанчик ВВ, Тарасенко ВП, Трухоновец ВВ, Усень ВВ, Фомина ВИ, Хотылева ЛВ, Чунихин ЛА, Шевчук ВЕ, Яцына АА. *Лес. Человек. Чернобыль. Лесные экосистемы после аварии на Чернобыльской АЭС: состояние, прогноз, реакция населения, пути реабилитации*. Гомель: Речицкая укрупненная типография; 1999. 454 с.
5. Матусов ГД, Воронцовская АН, Китиков ВИ. Распределение радионуклидов в лесных биогеоценозах. *Экосистемы и радиация: аспекты существования и развития*. 2013;211–221.
6. Kudzin M, Zabrotski V, Harbaruk D. Distribution of ^{137}Cs Between the Components of Pine Forest of Chernobyl NPP Exclusion Zone. *Impact of Cesium on Plants and the Environment*. 2017;149–169.
7. Kudzin M, Zabrotski V, Garbaruk D, Uhlianets A. ^{90}Sr in the Components of Pine Forest of Belarusian Part of Chernobyl NPP Exclusion Zone. *The Handbook of Environmental Chemistry*. 2020;88:159–183.
8. Булко НИ, Толкачева НВ, Потапенко АМ, Козлов АК, Машков ИА, Митин НВ, Шабалева МА, Серенкова ВА, Бутыковец ВВ. Поведение ^{137}Cs в лесных почвах (факторы, динамика, прогноз). В: *Лесные экосистемы: современные вызовы, состояние, продуктивность и устойчивость. Материалы Международной научно-практической конференции, посвященной 90-летию Института леса НАН Беларуси, г. Гомель, 13–15 ноября 2020 г.* Гомель: Институт леса НАН Беларуси; 2020:314–319.
9. Головешкин ВВ, Ненашев РА, Белаш ВЕ, Баленок АА, Карандевич АА. Исследование влияния погодно-климатических условий на параметры миграции радионуклидов в почвах зоны отчуждения Чернобыльской АЭС. В: *Радиобиология и экологическая безопасность – 2024. Материалы Международной научной конференции, г. Гомель, 30–31 мая 2024 г.* Минск: ИВЦ Минфина; 2024:56–60.
10. Гарбарук ДК, Углынец АВ, Шумак СВ. Потенциальный вклад компонентов черноольховых насаждений заповедной зоны ПГРЭЗ в биомассу лесных горючих материалов и содержание в них ^{137}Cs и ^{90}Sr . *Ботаника (исследования)*. 2021;50:123–139.
11. Углынец АВ, Гарбарук ДК. Оценка запаса лесных горючих материалов в компонентах дубовых лесов ближней зоны ЧАЭС и содержания в них ^{137}Cs и ^{90}Sr . *Ботаника (исследования)*. 2023;52:143–154.
12. Сысоева Е, Ларионова НВ, Лещенко НА, Меркель АИ. Искусственные радионуклиды в лесной подстилке на территории, прилегающей к Семипалатинскому испытательному полигону. В: *Радиоэкологические последствия радиационных аварий –*

к 35-ой годовщине аварии на ЧАЭС. Сборник докладов Международной научно-практической конференции, г. Обнинск, 22–23 апреля 2021 г. Обнинск: ФГБНУ ВНИИРАЭ; 2021:134–137.

13. Павлоцкая ФИ. Миграция радиоактивных продуктов глобальных выпадений в почвах. Москва: Атомиздат; 1974. 216 с.
14. Краснов ВП, Орлов ОО, Бузун ВО, Ландін ВП, Шелест ЗМ. Прикладна радіоекологія лісу. Житомир: Полісся; 2007. 680 с.
15. Пискунов ВС, Савельев ВВ. Загрязнение лесных фитоценозов ПГРЭС радионуклидами. В: *Экологический статус загрязненных радионуклидами территорий. Тезисы докладов Международного рабочего совещания, г. Минск, 19–20 апреля 1995 г.* Минск: Институт тепло- и массообмена имени А.В. Лыкова АНБ; 1995:104.
16. Израэль ЮА, Богдевич ИМ. *Атлас современных и прогнозных аспектов последствий аварии на Чернобыльской АЭС на пострадавших территориях России и Беларуси (АСПА Россия–Беларусь)*. Москва: Фонд «Инфосфера»–НИА–Природа; Минск: Белкартография; 2009. 140 с.
17. Кабанов СВ. Взаимосвязи запаса лесной подстилки с таксационными показателями дубовых низкоствольников. *Лесной журнал*. 1990;3:13–17.
18. Ковязин ВФ, Мартынов АН, Мельников ЕС, Аникин АС, Минаев ВН, Беляева НВ. *Основы лесного хозяйства и таксация леса*. Санкт-Петербург: Лань; 2010. 384 с.
19. Мирошников ВС, Труль ОА, Ермаков ВЕ, Дольский ЛВ, Костенко АГ. *Справочник таксатора*. Минск: Ураджай; 1980. 360 с.
20. Кузьменков МВ, Кулагин АП, Таркан АВ, Бузуновский РС. *Таксационно-лесоустроительный справочник*. Минск: Лесное и охотничье хозяйство; 2019. 335 с.
21. Углынец АВ, Гарбарук ДК. Оценка загрязнения древесины и коры дуба ^{137}Cs в зоне отчуждения Чернобыльской атомной электростанции. *Журнал Белорусского государственного университета. Экология*. 2022;4:33–45. DOI: 10.46646/2521-683X/2022-4-33-45.
22. Лапа ВВ, Цыбулько НН, Цырибко ВБ, Устинова АМ, Червань АН, Логачев ИА, Кудин МВ, Антипенко ОН. *Почвы Полесского государственного радиационно-экологического заповедника*. Минск: ИВЦ Минфина; 2019. 97 с.
23. Богатырев ЛГ, Демин ВВ, Матышак ГВ, Сапожникова ВА. О некоторых теоретических аспектах исследования лесных подстилок. *Лесоведение*. 2004;4:17–29.
24. Углынец АВ, Гарбарук ДК. Запасы лесных подстилок в дубовых лесах белорусского сектора зоны отчуждения Чернобыльской атомной электростанции. *Лесоведение*. 2024;5:534–544. DOI: 10.31857/S0024114824050082
25. Гарбарук ДК, Углынец АВ, Шумак СВ. Запасы лесных подстилок и содержание ^{137}Cs и ^{90}Sr в черноольховых лесах зоны отчуждения Чернобыльской атомной электростанции. *Почвоведение*. 2022;12:1610–1620. DOI: 10.31857/S0032180X22100318.
26. Углынец АВ, Гарбарук ДК. Современное загрязнение стволов дуба ^{90}Sr в ближней зоне радиоактивных выпадений чернобыльского следа. *Проблемы лесоведения и лесоводства*. 2023;83:282–293.
27. Липатов ДН, Щеглов АИ, Манахов ДВ. Влияние таксационных показателей древостоя на распределение чернобыльского радиоевлия в экотопах ельника. В: *Лесные почвы и функционирование лесных экосистем. Материалы VII Всероссийской научной конференции с международным участием, г. Москва, 24–27 сентября 2019 г.* Москва: ЦЭПЛ РАН; 2019:339–342.
28. Парфенов ВИ, Якушев БИ, Мартинович БС, Заболотный АИ, Дмитриева СА, Кабашникова ГИ, Кауров ИА, Моисеенко ИФ, Рахтеенко ЛИ, Савельев ВВ, Будкевич ТА, Ермакова ОО, Федоров ВН, Болотских ТН, Казей АП, Кузьмич ОТ, Пискунов ВС, Сак ММ, Голушко РМ, Жмойдяк РН. *Радиоактивное загрязнение растительности Беларуси (в связи с аварией на Чернобыльской АЭС)*. Минск: Навука і тэхніка; 1995. 582 с.
29. Углынец АВ, Гарбарук ДК, Шумак СВ. Динамика и продуктивность дубрав в условиях отсутствия хозяйственной деятельности на юго-востоке Белорусского Полесья. *Труды БГТУ. Серия 1. Лесное хозяйство, природопользование и переработка возобновляемых ресурсов*. 2022;2(258):55–66. DOI: 10.52065/2519-402X-2022-258-2-55-66.
30. Карпачевский ЛЮ. *Лес и лесные почвы*. Москва: Лесная промышленность; 1981. 264 с.
31. Логинов ВФ, Лысенко СА, Мельник ВИ. *Изменение климата Беларуси: причины, последствия, возможности регулирования*. Минск: Энциклопедикс; 2020. 264 с.
32. Бровка ЮА, Буяков ИВ. Изменение гидротермического коэффициента и повторяемости экстремальных условий увлажнения на территории Беларуси в период потепления климата. *Природопользование*. 2020;2:5–18. DOI: 10.47612/2079-3928-2020-2-5-18.
33. Марченко ЮД. Погодно-климатические условия в ближней зоне Чернобыльской АЭС. *Экосистемы и радиация: аспекты существования и развития*. 2013:32–45.
34. Переволоцкая ТВ. Вертикальная миграция ^{137}Cs и ^{90}Sr в лесных почвах под влиянием изменения уровня грунтовых вод. *Проблемы лесоведения и лесоводства*. 2009;69:621–636.
35. Юркевич ИД. *Выделение типов леса при лесоустроительных работах*. Минск: Наука и техника; 1980. 120 с.

References

1. Shcheglov AI. *Biogekhimiya tekhnogennykh radionuklidov v lesnykh ekosistemakh: po materialam 10-letnikh issledovaniy v zone vliyaniya avarii na ChAES* [Biogeochemical migration of technogenic radionuclides in forest ecosystems: by the materials of 10-year research in the area affected by the Chernobyl accident]. Moscow: Nauka; 2000. 268 p. Russian.
2. Perevolotskii AN. *Raspredelenie ^{137}Cs i ^{90}Sr v lesnykh biogeotsenozakh* [Distribution of ^{137}Cs and ^{90}Sr in forest biogeocenoses]. Gomel': Institut radiologii; 2006. 255 p. Russian.
3. Ipat'ev VA, Bulko NI, Mitin NV, Shabaleva MA, Didenko LG. *Radioekologicheskii fenomen lesnykh ekosistem* [Radioecological phenomenon of forest ecosystems]. Gomel': IL NAN Belarusi; 2004. 310 p. Russian.
4. Ipat'ev VA, Baginskii VF, Bulavik IM, Dvornik AM, Volchikov VE, Goncharenko GG, Podzharov VK, Bulko NI, Bordok IV, Volovich PI, Gedykh VB, Grimashevich VV, Didenko LG, Esimchik LD, Zhuchenko TA, Keizer GI, Kovalevich AI, Kozhevnikov AM, Kolodii PV, Kopytkov VV, Krushev LT, Marchenko YaI, Mitin NV, Padutov AE, Padutov VE, Perevolotskii AN, Pikulik MM, Sidor AI, Silin AE, Stepanchik VV, Tarasenko VP, Trukhonovets VV, Usenya VV, Fomina VI, Khotyleva LV, Chunikhin LA, Shevchuk VE,

Yatsyna AA. *Les. Chelovek. Chernobyl'. Lesnye ekosistemy posle avarii na Chernobyl'skoi AES: sostoyanie, prognoz, reaktsiya naseleniya, puti reabilitatsii* [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. Russian.

5. Matusov GD, Voronetskaya AN, Kitikov VI. *Raspredelenie radionuklidov v lesnykh biogeotsenozakh* [Distribution of radionuclides in forest biogeocenoses]. *Ekosistemy i radiatsiya: aspekty sushchestvovaniya i razvitiya*. 2013:211–221.

6. Kudzin M, Zabrotski V, Harbaruk D. Distribution of ^{137}Cs Between the Components of Pine Forest of Chernobyl NPP Exclusion Zone. *Impact of Cesium on Plants and the Environment*. 2017:149–169.

7. Kudzin M, Zabrotski V, Garbaruk D, Uhljanets A. ^{90}Sr in the Components of Pine Forest of Belarusian Part of Chernobyl NPP Exclusion Zone. *The Handbook of Environmental Chemistry*. 2020;88:159–183.

8. Bulko NI, Tolkacheva NV, Potapenko AM, Kozlov AK, Mashkov IA, Mitin NV, Shabaleva MA, Serenkova VA, But'kovets VV. *Povedenie ^{137}Cs v lesnykh pochvakh (faktory, dinamika, prognoz)* [Behavior of ^{137}Cs in forest soils (factors, dynamics, forecast)]. In: *Lesnye ekosistemy: sovremennye vyzovy, sostoyanie, produktivnost' i ustoichivost'* [Forest ecosystems: current challenges, status, productivity and sustainability]. Gomel': Institut lesa NAN Belarusi; 2020:314–319. Russian.

9. Goloveshkin VV, Nenashev RA, Belash VE, Balenok AA, Karandevich AA. *Issledovanie vliyaniya pogodno-klimaticheskikh uslovii na parametry migratsii radionuklidov v pochvakh zony otchuzhdeniya Chernobyl'skoi AES* [Research of the influence of weather and climatic conditions on the parameters of radionuclide migration in soils of the Exclusion Zone of the Chernobyl NPP]. In: *Radiobiologiya i ekologicheskaya bezopasnost' – 2024* [Radiobiology and environmental safety – 2024]. Minsk: IVTs Minfina; 2024:56–60. Russian.

10. Garbaruk DK, Uglyanets AV, Shumak SV. *Potentsial'nyi vklad komponentov chernool'khovykh nasazhdenii zapovednoi zony PGREZ v biomassu lesnykh goryuchikh materialov i sodержanie v nikh ^{137}Cs i ^{90}Sr* [Potential contribution of black alder plantations components into forest combustible materials and the ^{137}Cs and ^{90}Sr content on the protected area of the PSRER]. *Botanika (issledovaniya)*. 2021;50:123–139. Russian.

11. Uglyanets AV, Garbaruk DK. *Otsenka zapasa lesnykh goryuchikh materialov v komponentakh dubovykh lesov blizhnei zony ChAES i sodержaniya v nikh ^{137}Cs i ^{90}Sr* [Assessment of the forest combustible materials reserve in the oak forests components in the Chernobyl Nuclear Power Plant near zone and the content of ^{137}Cs and ^{90}Sr in them]. *Botanika (issledovaniya)*. 2023;52:143–154. Russian.

12. Sysoeva E., Larionova NV, Leshchenko NA, Merkel' AI. *Iskusstvennye radionuklidy v lesnoi podstilke na territorii, prilgayushchei k Semipalatinskomu ispytatel'nomu poligonu* [Artificial radionuclides in the forest litter at the territory adjacent to Semipalatinsk test site]. In: *Radioekologicheskie posledstviya radiatsionnykh avarii – k 35-oi godovshchine avarii na ChAES* [Radioecological consequences of radiation accidents: to the 35th anniversary of the Chernobyl accident]. Obninsk: FGBNU VNIIRAE; 2021:134–137. Russian.

13. Pavlotskaya FI. *Migratsiya radioaktivnykh produktov global'nykh vypadenii v pochvakh* [Migration of radioactive products of global fallout in soils]. Moscow: Atomizdat; 1974. 216 p. Russian.

14. Krasnov VP, Orlov OO, Buzun VO, Landin VP, Shelest ZM. *Prikladna radioekologiya lisu* [Applied radioecology of the forest]. Zhitomir: Polissya; 2007. 680 p. Russian.

15. Piskunov VS, Savel'ev VV. *Zagryaznenie lesnykh fitotsenozov PGREZ radionuklidami* [Radionuclide contamination of forest phytocenoses of PSRER]. In: *Ekologicheskii status zagryaznennykh radionuklidami territorii* [Ecological status of territories polluted by radionuclides]. Minsk: Institut teplo- i massoobmena imeni AV. Lykova ANB; 1995:104. Russian.

16. Izrael' YuA, Bogdevich IM. *Atlas sovremennykh i prognoznnykh aspektov posledstviy avarii na Chernobyl'skoi AES na postradavshikh territoriyakh Rossii i Belarusi (ASPA Rossiya–Belarus')* [Atlas of modern and predictive aspects of the consequences of the Chernobyl Nuclear Power Plant accident in the affected territories of Russia and Belarus (AMPA Russia–Belarus)]. Moscow: Fond «Infosfera»–NIA–Priroda; Minsk: Belkartografiya; 2009. 140 p. Russian.

17. Kabanov CB. *Vzaimosvyazi zapasa lesnoi podstilki s taksatsionnymi pokazatelyami dubovykh nizkostvol'nikov* [Relationships of forest litter stock with taxation indices of low oak stands]. *Lesnoi zhurnal*. 1990;3:13–17. Russian.

18. Kovyazin VF, Martynov AN, Mel'nikov ES, Anikin AS, Minaev VN, Belyaeva NV. *Osnovy lesnogo khozyaistva i taksatsiya lesa* [Fundamentals of forestry and forest inventory]. Saint Petersburg: Lan'; 2010. 384 p. Russian.

19. Miroshnikov VS, Trull' OA, Ermakov VE, Dol'skii LV, Kostenko AG. *Spravochnik taksatora* [Taxator's Handbook]. Minsk: Uradzhai; 1980. 360 p. Russian.

20. Kuz'menkov MV, Kulagin AP, Tarkan AV, Buzunovskii RS. *Taksatsionno-lesoustroitel'nyy spravochnik* [Taxation and forest inventory guide]. Minsk: Lesnoye i okhotnich'ye khozyaystvo; 2019. 335 p. Russian.

21. Uglyanets AV, Garbaruk DK. *Otsenka zagryazneniya drevesiny i kory duba ^{137}Cs v zone otchuzhdeniya Chernobyl'skoi atomnoi elektrostantsii* [Assessment of oak wood and bark contamination by ^{137}Cs in the exclusion zone of the Chernobyl nuclear power plant]. *Zhurnal Belorusskogo gosudarstvennogo universiteta. Ekologiya*. 2022;4:33–45. Russian. DOI: 10.46646/2521-683X/2022-4-33-45.

22. Lapa VV, Tsybul'ko NN, Tsyribko VB, Ustinova AM, Chervan' AN, Logachev IA, Kudin MV, Antipenko ON. *Pochvy Poles'skogo gosudarstvennogo radiatsionno-ekologicheskogo zapovednika* [Soils of Polesye state radiation-ecological reserve]. Minsk: IVTs Minfina; 2019. 97 p. Russian.

23. Bogatyrev LG, Demin VV, Matyshak GV, Sapozhnikova VA. *O nekotorykh teoreticheskikh aspektakh issledovaniya lesnykh podstilok* [On some theoretical aspects of studying forest litters]. *Lesovedenie*. 2004;4:17–29. Russian.

24. Uglyanets AV, Garbaruk DK. *Zapasy lesnykh podstilok v dubovykh lesakh belorusskogo sektora zony otchuzhdeniya Chernobyl'skoi atomnoi elektrostantsii* [Stocks of forest litter in the oak forests of the Chernobyl Nuclear Power Plant Exclusion Zone]. *Lesovedenie*. 2024;5:534–544. Russian. DOI: 10.31857/S0024114824050082

25. Garbaruk DK, Uglyanets AV, Shumak SV. *Zapasy lesnykh podstilok i sodержanie ^{137}Cs i ^{90}Sr v chernool'khovykh lesakh zony otchuzhdeniya Chernobyl'skoi atomnoi elektrostantsii* [Forest litter stocks and content of ^{137}Cs and ^{90}Sr in the black alder forests of the Chernobyl Nuclear Power Plant Exclusion Zone]. *Pochvovedenie*. 2022;12:1610–1620. Russian. DOI: 10.31857/S0032180X22100318.

26. Uglyanets AV, Garbaruk DK. *Sovremennoe zagryaznenie stvolov duba ^{90}Sr v blizhnei zone radioaktivnykh vypadenii chernobyl'skogo sleda* [Oak trunks modern contamination with ^{90}Sr in the near zone of radioactive fallout of the chernobyl trace]. *Problemy lesovedeniya i lesovodstva*. 2023;83:282–293. Russian.

27. Lipatov DN, Shcheglov AI, Manakhov DV. *Vliyaniye taksatsionnykh pokazatelei drevostoya na raspredeleniye chernobyl'skogo radiotseziya v ekotopakh el'nika* [Influence of stand taxation parameters on the distribution of Chernobyl radiocaesium in spruce forest ecotopes]. In: *Lesnye pochvy i funktsionirovaniye lesnykh ekosistem* [Forest soils and forest ecosystem functioning]. Moscow: TsEPL RAN; 2019:339–342. Russian.
28. Parfenov VI, Yakushev BI, Martinovich BS, Zabolotnyi AI, Dmitrieva SA, Kabashnikova GI, Kaurov IA, Moiseenko IF, Rakhtenko LI, Savel'ev VV, Budkevich TA, Ermakova OO, Fedorov VN, Bolotskikh TN, Kazei AP, Kuz'mich OT, Piskunov VS, Sak MM, Golushko RM, Zhmoidyak RN. *Radioaktivnoye zagryazneniye rastitel'nosti Belarusi (v svyazi s avariei na Chernobyl'skoi AES)* [Radioactive contamination of vegetation in Belarus (in connection with the Chernobyl NPP accident)]. Minsk: Navuka i tekhnika; 1995. 582 p. Russian.
29. Uglyanets AV, Garbaruk DK, Shumak SV. *Dinamika i produktivnost' dubrav v usloviyakh otsutstviya khozyaistvennoi deyatel'nosti na yugo-vostoke Belorusskogo Poles'ya* [Dynamics and productivity of oak forests in the absence of economic activities in the south-east of the Belarusian Polesye]. *Trudy BGTU. Seriya 1, Lesnoe khozyaistvo, prirodopol'zovanie i pererabotka vozobnovlyаемых resursov*. 2022;2(258):55–66. Russian. DOI: 10.52065/2519-402X-2022-258-2-55–66.
30. Karpachevskii LO. *Les i lesnye pochvy* [Forest and forest soils]. Moscow: Lesnaya promyshlennost'; 1981. 264 p. Russian.
31. Loginov VF, Lysenko SA, Mel'nik VI. *Izmeneniye klimata Belarusi: prichiny, posledstviya, vozmozhnosti regulirovaniya* [Climate change in Belarus: causes, consequences, regulatory opportunities]. Minsk: Entsiklopediks; 2020. 264 p. Russian.
32. Brovka YuA, Buyakov IV. *Izmeneniye gidrotermicheskogo koeffitsienta i povtoryaemosti ekstremal'nykh uslovii uvlazhneniya na territorii Belarusi v period potepleniya klimata* [Changes in the hydrothermal coefficient and in the frequency of extreme humidification conditions on the territory of Belarus during climate warming]. *Prirodopol'zovanie*. 2020;2:5–18. Russian. DOI: 10.47612/2079-3928-2020-2-5-18.
33. Marchenko YuD. *Pogodno-klimaticheskie usloviya v blizhnei zone Chernobyl'skoi AES* [Weather-climate conditions in the near zone of Chernobyl NPP]. *Ekosistemy i radiatsiya: aspekty sushchestvovaniya i razvitiya*. 2013:32–45. Russian.
34. Perevolotskaya TV. *Vertikal'naya migratsiya ^{137}Cs i ^{90}Sr v lesnykh pochvakh pod vliyaniem izmeneniya urovnya gruntovykh vod* [Vertical migration of ^{137}Cs and ^{90}Sr in forest soils under the influence of groundwater level changes]. *Problemy lesovedeniya i lesovodstva*. 2009;69:621–636. Russian.
35. Yurkevich ID. *Vydeleniye tipov lesa pri lesoustroitel'nykh rabotakh* [Identification of forest types in forest managements operations]. Minsk: Nauka i tekhnika; 1980. 120 p. Russian.

Статья поступила в редколлегию 20.01.2025.
Received by editorial board 20.01.2025.