
РАДИОЛОГИЯ И РАДИОБИОЛОГИЯ, РАДИАЦИОННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

RADIOLOGY AND RADIOBIOLOGY, RADIATION SAFETY

УДК (630*228.8(176.321.5)+182.46+231.1+182.47):539.163(546.36+546.42)

ТЕКУЩИЕ ИЗМЕНЕНИЯ ЗАГРЯЗНЕНИЯ ^{137}Cs И ^{90}Sr ЭЛЕМЕНТОВ ЧЕРНООЛЬХОВЫХ ЛЕСОВ В ЗОНЕ ОТЧУЖДЕНИЯ ЧЕРНОБЫЛЬСКОЙ АЭС

Д. К. ГАРБАРУК¹⁾, С. В. ШУМАК¹⁾, А. В. УГЛЯНЕЦ¹⁾

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

В зоне отчуждения Чернобыльской АЭС за период 2019–2025 гг. изучены текущие изменения в накоплении ^{137}Cs и ^{90}Sr органами и тканями растений основных элементов (древостой, подрост и подлесок, фоновые виды живого напочвенного покрова) высоковозрастных фитоценозов ольхи черной снытевого, папоротниково-го и осокового типов леса. За 6 лет текущая радиационная обстановка в черноольшаниках существенно улучшилась. Плотность загрязнения почв ^{137}Cs в 2019 г. составляла 364,3–655,8 кБк/м², в 2025 г. – 323,9–496,8 кБк/м², ^{90}Sr – 88,9–219,9 и 76,4–130,1 кБк/м² соответственно. В этот период мощность дозы γ -излучения ежегодно снижалась на 3,4–6,3 %, удельная активность ^{137}Cs в 20-сантиметровых слоях почвы – на 3,1–5,5 %, ^{90}Sr – на 0,6–9,9 %,

Образец цитирования:

Гарбарук ДК, Шумак СВ, Углянец АВ. Текущие изменения загрязнения ^{137}Cs и ^{90}Sr элементов черноольховых лесов в зоне отчуждения Чернобыльской АЭС. *Журнал Белорусского государственного университета. Экология*. 2026;2:54–72.
<https://doi.org/10.46646/2521-683X/2026-2-54-72>

For citation:

Garbaruk DK, Shumak SV, Uglyanets AV. Current contamination changes of ^{137}Cs and ^{90}Sr in black alder forests elements in the Chernobyl nuclear power plant exclusion zone. *Journal of the Belarusian State University. Ecology*. 2026;2:54–72. Russian.
<https://doi.org/10.46646/2521-683X/2026-2-54-72>

Авторы:

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

Authors:

Dmitriy K. Garbaruk, head of the department of ecology of vegetative complexes.
dmitrijgarbaruk@gmail.com
Svetlana V. Shumak, postgraduate student; junior researcher at the department of ecology of vegetative complexes.
shumaksvetlana@mail.ru
Anatoliy V. Uglyanets, PhD (agriculture), docent; leading researcher at the department of ecology of vegetative complexes.
uhlianets@mail.ru

плотность загрязнения почвы ^{137}Cs в большинстве насаждений – на 1,6–4,0 %, ^{90}Sr – 2,3–6,8 %. В отдельных насаждениях плотность загрязнения почв ^{137}Cs и ^{90}Sr увеличивалась. Изменения показателей текущего загрязнения почв обусловлены особенностями гидрологических режимов почв в разных типах леса под влиянием погодно-климатических условий и поведением в них ^{137}Cs и ^{90}Sr . В 2019–2025 гг. удельная активность ^{137}Cs в структурных компонентах деревьев ольхи черной находилась на уровне 0,66–9,67 кБк/кг, ^{90}Sr – 0,07–2,57 кБк/кг, коэффициенты перехода ^{137}Cs в ее органы и ткани составляли $(2,0\text{--}27,2)\times 10^{-3} \text{ м}^2/\text{кг}$, ^{90}Sr – $(0,7\text{--}13,2)\times 10^{-3} \text{ м}^2/\text{кг}$, в органы растений подроста и подлеска – $(3,1\text{--}37,5)\times 10^{-3} \text{ м}^2/\text{кг}$, ^{90}Sr – $(2,0\text{--}27,9)\times 10^{-3} \text{ м}^2/\text{кг}$, ^{137}Cs в части фитомассы живого напочвенного покрова – $(9,9\text{--}267,4)\times 10^{-3} \text{ м}^2/\text{кг}$, ^{90}Sr – $(1,4\text{--}24,3)\times 10^{-3} \text{ м}^2/\text{кг}$. За анализируемое время показатели загрязнения частей растений этими радионуклидами в элементах черноольховых фитоценозов изменялись разными темпами и в разных направлениях, различаясь по годам, типам леса и между собой в пределах этапов наблюдений. Суммарно во всех растениях всех типов леса коэффициенты перехода ^{137}Cs уменьшились у 50,6 % органов и тканей, ^{90}Sr – у 30,3 %. Установлены усредненные ранжированные ряды частей деревьев ольхи черной по загрязнению их ^{137}Cs (древесина < кора < ветви < листья < корни) и ^{90}Sr (древесина < ветви < корни < листья < кора); наиболее частые распределения органов подроста и подлеска (стволики < корни < листья); ранжированные ряды видов подроста и подлеска и ряды фоновых видов живого напочвенного покрова по коэффициентам перехода ^{137}Cs и ^{90}Sr в их органы или части фитомассы. Разные уровни и векторы перехода радионуклидов в органы и ткани растений определены эдафическими и погодно-климатическими условиями, спецификой их депонирования разными видами растений.

Ключевые слова: зона отчуждения Чернобыльской атомной электростанции; черноольшаник; тип леса; почва; элемент фитоценоза; органы и ткани растений; ^{137}Cs ; ^{90}Sr ; удельная активность; коэффициент перехода.

CURRENT CONTAMINATION CHANGES OF ^{137}Cs AND ^{90}Sr IN BLACK ALDER FORESTS ELEMENTS IN THE CHERNOBYL NUCLEAR POWER PLANT EXCLUSION ZONE

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

^aPolesye State Radiation-Ecological Reserve,
7 Tserashkovaj Street, 247618 Khoyniki, Belarus

Corresponding author: D. K. Garbaruk (dmitrijgarbaruk@gmail.com)

In the Chernobyl nuclear power plant exclusion zone for the period 2019–2025, current changes in the accumulation of ^{137}Cs and ^{90}Sr by the organs and tissues of plants of the main elements (stand, undergrowth and understory, background species of living ground cover) of high-age phytocenoses of black alder, goutweed, fern and sedge forest types were studied. Over the past 6 years, the current radiation situation in black alder plantations has improved significantly. The density of ^{137}Cs soil contamination in 2019 was 364.3–655.8 kBq m⁻², in 2025 – 323.9–496.8 kBq m⁻², ^{90}Sr – 88.9–219.9 and 76.4–130.1 kBq m⁻², respectively. During this period, the γ -radiation dose rate decreased annually by 3.4–6.3 %, the specific activity of ^{137}Cs in 20 cm soil layers – by 3.1–5.5 %, ^{90}Sr – by 0.6–9.9 %, the density of soil contamination in most plantations of ^{137}Cs – by 1.6–4.0 %, ^{90}Sr – 2.3–6.8 %. In some plantations, the density of soil contamination of ^{137}Cs and ^{90}Sr soils increased. Changes in the indicators of current soil contamination are due to the peculiarities of the hydrological regimes of soils in different types of forests under the influence of weather and climatic conditions and the behavior of ^{137}Cs and ^{90}Sr in them. In 2019–2025, the specific activity of ^{137}Cs in the structural components of black alder trees was at the level of 0.66–9.67 kBq kg⁻¹, ^{90}Sr – 0.07–2.57 kBq kg⁻¹, the transfer coefficients of ^{137}Cs to its organs and tissues were $(2.0\text{--}27.2)\times 10^{-3} \text{ м}^2 \text{ kg}^{-1}$, ^{90}Sr – $(0.7\text{--}13.2)\times 10^{-3} \text{ м}^2 \text{ kg}^{-1}$, ^{137}Cs in the organs of plants of undergrowth and understory – $(3.1\text{--}37.5)\times 10^{-3} \text{ м}^2 \text{ kg}^{-1}$, ^{90}Sr – $(2.0\text{--}27.9)\times 10^{-3} \text{ м}^2 \text{ kg}^{-1}$, ^{137}Cs in the part of the phytomass of living ground cover – $(9.9\text{--}267.4)\times 10^{-3} \text{ м}^2 \text{ kg}^{-1}$, ^{90}Sr – $(1.4\text{--}24.3)\times 10^{-3} \text{ м}^2 \text{ kg}^{-1}$. During the analyzed time, the indicators of contamination of plant parts with these radionuclides in the elements of black alder phytocenoses changed at different rates and in different directions, varying by year, type of forest and among themselves within the observation stages. In total, in all plants of all types of forest, the ^{137}Cs transition coefficients decreased in 50.6 % of the organs and tissues, ^{90}Sr – in 30.3 %. The average ranked rows of parts of black alder trees by their contamination are ^{137}Cs (wood < bark < branches < leaves < roots) and ^{90}Sr (wood < branches < roots < leaves < bark), the most frequent distributions of organs of undergrowth and understory (stems < roots < leaves); ranked rows of species of undergrowth and understory and rows background species of living ground cover by the transition coefficients of ^{137}Cs and ^{90}Sr to their organs or parts of the phytomass. The different levels and vectors of radionuclide transfer to plant organs and tissues are determined by edaphic and weather-climatic conditions, the specifics of their deposition by different plant species.

Keywords: Chernobyl nuclear power plant exclusion zone; black alder forest; type of forest; soil; element of phytocenosis; органы и ткани of the plants; ^{137}Cs ; ^{90}Sr ; specific activity; transition coefficient.

Введение

Выброшенные радиоактивные вещества при разгерметизации 4-го энергоблока во время аварии на Чернобыльской АЭС (ЧАЭС) наиболее плотно осаждались на прилегающей территории, которая в 1986 г. выведена из хозяйственного оборота с выделением зоны эвакуации (отчуждения) (ЗО). В границах этой зоны в 1988 г. был учрежден Полесский государственный радиационно-экологический заповедник (заповедник). Загрязнение природных комплексов ^{137}Cs и ^{90}Sr в ЗО ЧАЭС было наибольшим в Беларуси. В настоящее время, несмотря на то что их содержание в лесных биогеоценозах сократилось более чем в два раза за счет естественного их распада (период полураспада ^{137}Cs 30,0 лет, ^{90}Sr – 29,12 года)¹, уровни радиоактивного загрязнения лесов в ЗО ЧАЭС остаются высокими. Суммарный запас активности ^{137}Cs в биомассе черноольховых насаждений только в заповедной зоне заповедника оценивается в $102,0 \times 10^{12}$ Бк ^{137}Cs и ^{90}Sr – $10,4 \times 10^{12}$ Бк [1].

Ольха черная в силу биологических особенностей и экологических требований отличается от других главных лесообразующих древесных пород Беларуси локализацией насаждений на почвах повышенного и избыточного увлажнения [2; 3]. В ЗО ЧАЭС черноольховые леса занимают 10,6 % лесопокрывной площади (третье место по распространенности); 96,1 % их насаждений приурочены к полугидроморфным и гидроморфным почвам [4].

В гидроморфных почвах ^{137}Cs характеризуется повышенным количеством доступных для растений форм, высокой подвижностью и интенсивным поступлением в растения. С увеличением почвенного увлажнения переход ^{137}Cs в древесные растения возрастает, а ^{90}Sr – снижается [5; 6]. В то же время в работе [7] указывается на достижение максимального K_p ^{137}Cs в органы и ткани ольхи на торфяно-болотных почвах в 1990 г.

Исследования накопления радионуклидов ^{137}Cs и ^{90}Sr частями деревьев ольхи черной, прежде всего древесины и стволами, в ЗО ЧАЭС проводилось периодически [5–18]. Установлены уровни загрязнения ее органов и тканей этими радионуклидами на разных этапах последствий радиационной катастрофы по типам леса и типам лесорастительных условий (ТЛУ), корреляционные связи удельной активности (A_y) и K_p в древесине и коре ольхи черной с плотностью загрязнения почвы (ПЗ) и расстоянием до ЧАЭС, определены особенности концентрации ^{137}Cs и ^{90}Sr в радиальном профиле ее стволов, их содержание в деревьях разных классов роста и развития по Крафту. Выявлена динамика K_p ^{137}Cs и ^{90}Sr в коре и древесине ольхи черной, включающая их рост в первые десятилетия после аварии на ЧАЭС, и последующая стабилизация. Очищение ее деревьев от радионуклидов привело к увеличению количества насаждений, в которых древесина данной породы по содержанию ^{137}Cs соответствует действующим в стране гигиеническим нормативам. Эти выводы сделаны на основе данных, полученных на разных объектах, что в некоторой мере искажает оценки динамики этих радионуклидов в тканях и органах ольхи черной. Кроме того, крайне мало данных по загрязнению подростково-подлесочного и травяного ярусов в черноольховых лесах. Для современной оценки текущих изменений радиоэкологической ситуации в ЗО ЧАЭС созданы стационарные мониторинговые объекты. На первом этапе наблюдений в 2019 г. были получены исходные радиоэкологические параметры элементов черноольховых фитоценозов. Результаты опубликованы в работах [13; 17; 18]. Данные второго этапа наблюдений (2025 г.) дают возможность оценить текущие изменения показателей загрязнения ^{137}Cs и ^{90}Sr основных элементов черноольховых лесов.

Цель исследования: выявить направленность и темпы изменения текущих уровней загрязнения ^{137}Cs и ^{90}Sr в основных элементах насаждений ольхи черной в ЗО ЧАЭС на современном этапе последствий ядерной катастрофы.

Материалы и методы исследования

Объекты исследования – органы и ткани основных элементов черноольховых фитоценозов – древостои, подрост, подлесок и фоновые виды живого напочвенного покрова (ЖНП) на 3-х постоянных пунктах наблюдения (ППН) системы радиационно-экологического мониторинга лесных экосистем в ЗО ЧАЭС, заложенных в черноольшаниках снытевом, папоротниковом и осоковом (табл. 1). На эти типы леса приходится 66,3 % площади черноольховой лесной формации заповедника, что указывает на достаточно высокую репрезентативность типологической выборки.

Древостои ольхи черной на ППН чистые, спелые и перестойные на первом и перестойные на втором этапе наблюдений, высокобонитетные и высокополнотные. Черноольшаники снытевый и папоротниковый, согласно критерию полноты (1,0), на протяжении 6 лет характеризовались нормальным ростом и развитием. В осоковом типе леса наряду с естественным отпадом произошел ветровал деревьев ольхи; в итоге полнота древостоя снизилась на 0,1 (табл. 2).

¹Экологические последствия аварии на Чернобыльской АЭС и их преодоление: двадцатилетний опыт: Доклад экспертной группы «Экология» Чернобыльского форума. Вена : МАГАТЭ, 2008. 180 с.

Таблица 1

Местонахождение постоянных пунктов наблюдения и даты исследований

Table 1

Location of permanent monitoring points and dates of research

Шифр ППН	Лесничество	Тип леса	Квартал/ выдел	Площадь ППН, га	Географические координаты		Дата исследований	
					широта (N)	долгота (E)	предыдущая	текущая
Бб-2	Бабчинское	Олч. сн.	1/26	0,25	51°42'31,1"	29°56'07,2"	09.07.2019	06.06.2025
Бб-3	Бабчинское	Олч. пап.	11/12	0,25	51°40'23,7"	29°53'49,9"	10.07.2019	18.06.2025
Нп-5	Новопокровское	Олч. ос.	72/27	0,25	51°41'04,9"	29°54'54,8"	11.07.2019	18.06.2025

Примечание. Здесь и далее: Олч. сн. – черноольшаник снытевый, Олч. пап. – черноольшаник папоротниковый, Олч. ос. – черноольшаник осоковый.

Таблица 2

Изменение таксационных показателей черноольховых древостоев

Table 2

Changes in the taxation indicators of black alder stands

Тип леса / ТЛУ	Год таксации	Состав древостоя	Возраст, лет	Средние		Бонитет	Густота, шт./га	Сумма площадей сечений, м²/га	Полнота	Запас, м³/га
				Н, м	Д, см					
Олч. сн. / D ₃	2019	9Олч1Кл + Д,Г,Ос,Б	73	26,6	31,2	I	604	40,4	1,0	485
	2025	9Олч1Д + Кл,Г,Ос,Б	79	25,9	32,5	I	540	39,0	1,0	467
Олч. пап. / C ₄	2019	10Олч + Б,Лп	68	28,0	32,0	I	504	39,2	1,0	540
	2025	10Олч + Б,Лп	74	28,6	33,0	I	500	41,4	1,0	510
Олч. ос. / C ₅	2019	10Олч + Б	68	24,5	31,8	II	432	34,1	0,9	415
	2025	10Олч + Б	74	24,8	32,3	II	356	28,9	0,8	350

Предмет исследований – текущие изменения накопления ¹³⁷Cs и ⁹⁰Sr частями (фракциями) деревьев ольхи черной (древесина, кора наружная, корни скелетные, ветви мелкие, листья), органами преобладающих видов подроста и подлеска (стволики, корни скелетные, листья) и фитомассой (надземная и подземная) фоновых видов ЖНП в насаждениях ольхи черной.

На ППН, заложенных в 2019 г. в соответствии с ТКП 498-2013², устанавливали таксационные параметры древостоев с использованием методов, описанных в источнике [19] с применением справочника [20], а также провели учет подроста и подлеска согласно ТКП 498-2013 (02080)² и определили преобладающие древесно-кустарниковые виды по типам леса.

В сообществах живого напочвенного покрова выполнили глазомерную оценку обилия травянистых видов растений по шкале Друде [21] и выделили фоновые виды для каждого типа леса.

Радиоэкологические исследования на ППН выполняли в соответствии с ТКП 499-2013³, которые включали замер мощности дозы γ-излучения (МД) дозиметром-радиометром МКС-АТ6130 (Беларусь) на высоте 1 м от поверхности почвы в 9 контрольных точках и отбор сопряженных образцов почвы стандартным пробоотборником диаметром 4 см на глубину 20 см, включая лесную подстилку; отбор проб стволочной древесины с помощью возрастного бурава Мога (Швеция) и проб коры наружной с помощью цилиндрического пробоотборника диаметром 40 мм на высоте 1,3 м у 20–30 растущих деревьев ольхи черной I–III классов роста и развития по Крафту; отбор образцов скелетных корней, тонких ветвей

²ТКП 498-2013 (02080). Радиационный мониторинг лесного фонда. Закладка постоянного пункта наблюдения. Порядок проведения. Утвержден и введен Постановлением Министерства лесного хозяйства Респ. Беларусь от 3 октября 2013 г. № 12. Минск: Минлесхоз, 2013. 28 с.

³ТКП 499-2013 (02080). Радиационный мониторинг лесного фонда. Обследование постоянного пункта наблюдения. Порядок проведения. Утвержден и введен Постановлением Министерства лесного хозяйства Республики Беларусь от 3 октября 2013 г. № 12. Минск: Минлесхоз, 2013. 28 с.

и листьев у деревьев ольхи черной, стволиков, корней и листьев у наиболее распространенных 3 видов подроста и 5 видов подлеска, подземной и надземной частей фитомассы у 10 фоновых видов ЖНП – равномерно по всему ППН.

Наиболее распространенными видами подроста являлись граб обыкновенный (далее по тексту и на графике – граб), клен остролистный (клен), ясень обыкновенный (ясень), подлеска – ива серая (ива), крушина ломкая (крушина), лещина обыкновенная (лещина) свидина кроваво-красная (свидина), смородина черная (смородина). Бинарные названия фоновых видов ЖНП приведены в тексте по ходу анализа.

Полевые исследования и отбор образцов на ППН в пределах этапов выполнены в близкие сезонные сроки со сдвигом в 2025 г. на месяц раньше (табл. 1), что, в связи с сокращением времени активного роста органов и тканей на втором этапе, могло сказаться на снижении количества потребленных растениями радионуклидов [22].

Подготовку образцов для анализа осуществляли в соответствии с ТКП 251-2010⁴. Инструментальное определение A_{γ} ^{137}Cs и ^{90}Sr в пробах почвы и биологических образцах растений выполнено в лаборатории спектрометрии и радиохимии заповедника на гамма-бета-спектрометре МКС-АТ1315 (Беларусь). На их основе рассчитали ПЗ ^{137}Cs и ^{90}Sr в соответствии с ТКП 240-2010⁵ и K_n этих радионуклидов в структурные компоненты основных элементов черноольховых фитоценозов. Текущие изменения загрязнения структурных компонентов деревьев ольхи ^{137}Cs и ^{90}Sr устанавливали путем сравнения их A_{γ} и K_n за 2019 и 2025 гг.

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

Результаты исследования и их обсуждение

Текущее изменение радиационной обстановки. Изменение МД γ -излучения. Во всех типах черноольшаников МД за 6 лет уменьшилась. Ее снижение в условиях полугидроморфной почвы (черноольшаник снытевый) было более медленным (3,4 %/год), чем на гидроморфных почвах (черноольшаники папоротниковый и осоковый) – 6,3 и 5,8 %/год соответственно (табл. 3).

Таблица 3

Характеристика мощности дозы γ -излучения в черноольшаниках

Table 3

Characteristics of the gamma radiation dose rate in black alder plantations

Показатель	Тип леса					
	Олч. сн.		Олч. пап.		Олч. ос.	
Расстояние до ЧАЭС, км	37,2		34,4		35,2	
Годы	2019	2025	2019	2025	2019	2025
Мощность дозы, мкЗв/ч	0,59	0,47	0,42	0,26	0,46	0,30
Темпы изменения мощности дозы, %/год	–3,4		–6,3		–5,8	

Величины МД в лесных экосистемах зависят от уровней содержания γ -излучателей, в настоящее время главным образом ^{137}Cs , в почве и растительности, а их изменения определяются естественным их распадом, заглублением «центра масс» загрязнения, экранированием излучения верхними слоями почвы и лесной подстилкой, поглощением растительностью [5–7]. Снижение МД в исследуемых черноольшаниках обусловлено естественным распадом ^{137}Cs , который для усредненного периода наблюдений (10.07.2019–14.06.2025 гг.) составлял 2,3 % в год, и сильным экранированием γ -излучения на момент замеров в 2025 г. почвенными водами: высокое количество осадков в 2024–2025 гг. обеспечили повышенные для территории ЗО ЧАЭС коэффициенты увлажнения (табл. 4), что привело к высоким подъемам уровней грунтовых вод и длительному затоплению части поверхности почв в черноольшаниках, прежде всего на гидроморфных почвах и особенно в осоковом типе леса.

⁴ТКП 251-2010 (02080). Радиационный контроль. Отбор и подготовка проб лесной продукции. Порядок проведения. Утвержден и введен постановлением Министерства лесного хозяйства Респ. Беларусь от 28 июня 2010 г. № 14. Минск: Минлесхоз, 2010. 26 с.

⁵ТКП 240-2010 (02080). Радиационный контроль. Обследование земель лесного фонда. Порядок проведения. Утвержден и введен постановлением Министерства лесного хозяйства Респ. Беларусь от 22 февраля 2010 г. № 5. Минск: Минлесхоз, 2010. 18 с.

Таблица 4

Показатели тепло- и влагообеспеченности территории зоны отчуждения Чернобыльской АЭС

Table 4

Indicators of heat and moisture availability in the Chernobyl NPP exclusion zone territory

Год, период	Метеорологический показатель		
	средняя температура воздуха, °С	количество осадков, мм	коэффициент увлажнения территории по Иванову
1997–2012 по [23])	7,8	609	1,05
1997–2013	7,8	619	1,07
2014–2025	8,9	570	0,80
2014	8,4	450	0,65
2015	8,7	454	0,54
2016	8,7	722	1,08
2017	8,4	652	1,04
2018	8,7	557	0,70
2019	9,3	377	0,55
2014–2019	8,7	535	0,76
2020	10,0	622	0,91
2021	8,2	519	0,75
2022*	8,4	698	0,87
2023*	9,5	543	0,75
2024*	10,0	620	0,81
I–VI 2025*	6,9	288	0,94
2025*	9,0	630	1,00
2020–2025	9,2	605	0,85

Примечание. * – по данным метеостанции «Брагин».

Текущие изменения загрязнения почвы. Уровни загрязнения почв ^{137}Cs и ^{90}Sr определены в основном природой этих радионуклидов, мозаичностью их выпадения, характеристиками почв и фактором времени, в течение которого запасы радионуклидов снижаются в результате их естественного распада, миграции в нижележащие слои и поглощения растительностью [5–7].

Современные показатели загрязнения 20-сантиметровых почвенно-подстилочных комплексов (почвенных слоев) ^{137}Cs и ^{90}Sr в черноольшаниках ЗО ЧАЭС весьма высокие. Они различаются между типами леса и годами наблюдений (табл. 5).

Таблица 5

Показатели загрязнения почвы ^{137}Cs и ^{90}Sr в черноольшаниках и их изменения

Table 5

Indicators of soil contamination with ^{137}Cs and ^{90}Sr in black alder plantations and their changes

Тип леса / ТЛУ		Олч. сн. / D_3		Олч. пап. / C_4		Олч. ос. / C_5	
Показатели загрязнения почвы		2019	2025	2019	2025	2019	2025
Удельная активность в почве, кБк/кг	^{137}Cs	3,70	2,48	3,13	2,15	4,37	3,56
	^{90}Sr	0,53	0,51	0,78	0,51	2,64	1,07
Плотность загрязнения почвы, кБк/м ²	^{137}Cs	655,8	496,8	357,6	323,9	364,3	432,2
	^{90}Sr	94,5	101,8	88,9	76,4	219,9	130,1
Изменения показателей загрязнения 20-сантиметровом слое почв, %/год							
Удельная активность ^{137}Cs в почве		–5,5		–5,2		–3,1	
Удельная активность ^{90}Sr в почве		–0,6		–5,8		–9,9	
Плотность загрязнения почвы ^{137}Cs		–4,0		–1,6		+3,1	
Плотность загрязнения почвы ^{90}Sr		+1,3		–2,3		–6,8	

За 6 лет A_y ^{137}Cs и ^{90}Sr в почвах всех типов леса снизились. При повышении индекса влажности почвы от влажной до мокрой темпы снижения концентрации ^{137}Cs уменьшились с $-5,5$ до $-3,1$ %/год, а ^{90}Sr , наоборот, возросли с $-0,6$ до $-9,9$ %/год. Снижение ПЗ ^{137}Cs от снытевого типа леса до папоротникового замедлилось, а в черноольшанике осоковом она уже прирастала со скоростью $3,1$ %/год. На такую же величину ежегодно увеличивалась ПЗ ^{90}Sr в черноольшанике снытевом; в папоротниковом и осоковом типах леса она снижалась с ускорением в направлении более влагообеспеченного черноольшаника осокового (табл. 5).

Как видим, текущие изменения показателей загрязнения 20-сантиметровых слоев почв ^{137}Cs и ^{90}Sr в черноольшаниках связаны с индексом влажности почвы, но имеют взаимно противоположную направленность. Это связано с природой поведения этих радионуклидов в средах разного увлажнения [6]. Процесс очищения почв от ^{137}Cs и ^{90}Sr в черноольховых лесах может замедляться или даже менять вектор в противоположную сторону. Заметим, что циклические повышения показателей загрязнения почвы радионуклидами на общем фоне их снижения наблюдались в сосняках [24] и дубравах [25] под влиянием погодных условий и динамики уровней грунтовых вод, определяющих влажность почв и подвижность в них радионуклидов [6; 24; 26; 27].

Основным фактором перераспределения радионуклидов в почвах являются их влагообеспеченность и изменения уровней грунтовых вод [5; 27], определяемые степенью увлажнения территории. По данным научно-исследовательской станции «Масаны» заповедника и метеостанции «Брагин» Белгидромета (табл. 4), за 12 лет локальной засухи (2014–2025 гг.), в сравнении с предыдущим 17-летним периодом (1997–2013 гг.), среднегодовая температура воздуха в ЗО ЧАЭС выросла на $14,1$ %, среднегодовое количество осадков уменьшилось на $7,9$ %. В итоге коэффициент увлажнения территории снизился на $25,2$ %. Дефицит атмосферных осадков и повышенная испаряемость влаги в 2014–2019 гг. обеспечили отсутствие весенних затоплений поверхности почв в черноольшаниках тальными водами и глубокое опускание грунтовых вод. К тому же год съема исходных данных на ППН (2019) был одним из самых теплых и сухих. За следующие 6 лет коэффициент увлажнения территории ЗО ЧАЭС увеличился на $13,3$ %, а 2024 и 2025 гг. были достаточно влажными. Это способствовало восстановлению уровней грунтовых вод, полноценному затоплению почвы весной и в начале лета, особенно в черноольшанике осоковом. Полагаем, что именно эти факторы и повлияли на изменение содержания ^{137}Cs и ^{90}Sr в 20-см почвенно-подстилочном комплексе.

Загрязнение радионуклидами структурных фракций деревьев ольхи ^{137}Cs и ^{90}Sr через 33 и 39 лет после аварии на ЧАЭС оставалось весьма высоким. Их A_y и K_n в тканях и органах данной породы различались по годам, типам леса (ТЛУ) и между собой в пределах каждого этапа наблюдений (табл. 6).

Таблица 6

Загрязнение органов и тканей деревьев ольхи черной ^{137}Cs и ^{90}Sr

Table 6

Contamination of organs and tissues of black alder trees with ^{137}Cs and ^{90}Sr

Тип леса	Олч. сн.		Олч. пап.		Олч. ос.		Олч. сн.		Олч. пап.		Олч. ос.	
Показатели	Удельная активность, кБк/кг						Коэффициент перехода, $n \times 10^{-3}$ м²/кг					
¹³⁷ Cs												
Годы	2019	2025	2019	2025	2019	2025	2019	2025	2019	2025	2019	2025
Древесина	1,75	1,15	1,61	0,90	2,00	1,39	2,7	2,3	4,5	2,8	5,5	3,2
Кора	2,32	1,14	2,60	0,66	2,69	0,99	3,5	2,3	7,3	2,0	7,4	2,3
Ветви	2,69	3,09	3,02	3,59	3,71	3,60	4,1	6,2	8,5	11,1	10,2	8,3
Листья	6,87	6,54	5,86	6,95	8,63	9,67	10,5	13,2	16,4	21,5	23,7	22,4
Корни	7,43	6,54	8,98	8,82	8,13	5,62	11,3	13,2	25,1	27,2	22,3	13,0
⁹⁰ Sr												
Древесина	0,07	0,20	0,19	0,08	0,22	0,29	0,7	2,3	2,1	1,0	1,0	2,3
Кора	1,95	1,72	1,06	1,00	2,57	1,57	20,6	13,2	11,9	13,1	11,7	12,1
Ветви	0,94	0,39	0,30	0,15	1,02	0,51	9,9	2,3	3,4	1,9	4,7	4,0
Листья	0,83	0,80	0,47	0,27	1,62	1,02	8,8	13,2	5,2	3,5	7,4	7,8
Корни	1,11	0,44	0,27	0,57	0,59	0,55	11,8	6,2	3,0	7,5	2,7	4,2

В течение 6 лет параметры загрязнения частей деревьев ольхи черной ^{137}Cs и ^{90}Sr в разных типах леса (ТЛУ) изменялись разными темпами и в разных направлениях (табл. 7). В древесине, коре и корнях данной породы A_y ^{137}Cs снижалась по $5,1$ – $7,3$, $8,5$ – $12,4$ и $0,3$ – $5,1$ %/год соответственно, с вариациями по типам леса. Темпы уменьшения K_n ^{137}Cs в древесине составляли $2,5$ – $7,0$, в коре $5,7$ – $12,1$ %/год. В этих тканях

(фактически в окоренных и неокоренных стволах) скорость снижения обоих показателей, в основном возрастала по мере приближения к ЧАЭС. Изменение концентрации ^{137}Cs в ветвях ($-0,5$ – $+3,1$ %/год) и листьях ($-0,8$ – $+3,1$ %/год) в разных типах леса происходило разновекторно и разными темпами. В то же время в ветвях и корнях скорость приращения $K_{\text{п}}^{137}\text{Cs}$ понижалась от черноольшаника снытевого до папоротникового, а в черноольшанике осоковом наблюдалась отрицательная его динамика.

Таблица 7

Темпы изменения загрязнения органов и тканей деревьев ольхи черной ^{137}Cs и ^{90}Sr , %/год

Table 7

Rates of change in the contamination of organs and tissues of black alder trees with ^{137}Cs and ^{90}Sr , %/year

Показатель	Удельная активность / коэффициент перехода					
Радионуклид	^{137}Cs			^{90}Sr		
Тип леса	Олч. сн.	Олч. пап.	Олч. ос.	Олч. сн.	Олч. пап.	Олч. ос.
Древесина	$-5,7 / -2,5$	$-7,3 / -6,3$	$-5,1 / -7,0$	$+31,0 / +38,1$	$-9,6 / -8,7$	$+5,3 / +21,7$
Кора	$-8,5 / -5,7$	$-12,4 / -12,1$	$-10,5 / -11,5$	$-2,0 / -6,0$	$-0,9 / +1,7$	$-6,5 / +0,6$
Ветви	$+2,5 / +8,5$	$+3,1 / +5,1$	$-0,5 / -3,1$	$-9,8 / -12,8$	$-8,3 / -7,4$	$-8,3 / -2,5$
Листья	$-0,8 / +4,3$	$+3,1 / +5,2$	$+2,0 / -0,9$	$-0,6 / +8,3$	$-7,1 / -5,4$	$-6,2 / +0,9$
Корни	$-2,0 / +2,8$	$-0,3 / +1,4$	$-5,1 / -7,0$	$-10,1 / -7,9$	$+18,5 / +25,0$	$-1,1 / +9,3$

Направления и величины изменений показателей загрязнения органов и тканей ольхи черной ^{90}Sr были более хаотичными и ни по одному из ее компонентов не совпадали с изменениями соответствующих показателей ^{137}Cs .

Понижение $A_y^{137}\text{Cs}$ произошло у 73,3 % органов и тканей ольхи черной (из 15 вариантов в 3 типах леса), $K_{\text{п}}^{137}\text{Cs}$ – у 60,0 %, $A_y^{90}\text{Sr}$ – у 80,0 %, $K_{\text{п}}^{90}\text{Sr}$ – у 46,7 %.

Увеличение $A_y^{137}\text{Cs}$ в листьях и отчасти в ветвях связано с повышенным количеством осадков в 2024 и 2025 гг. после засушливых 2018–2023 гг. (табл. 4), способствовавших повышению влагообеспеченности почв, подвижности радионуклида и поступлению его в органы последних лет формирования.

Ранжированные ряды фракций деревьев ольхи черной по величинам A_y и $K_{\text{п}}^{137}\text{Cs}$ по типам леса и годам исследований в определенной мере схожи, но часто различаются отдельными звеньями (табл. 8). Усредненные распределения относительного загрязнения компонентов ольхи по величинам A_y и $K_{\text{п}}^{137}\text{Cs}$ одинаковы – древесина < кора < ветви < листья < корни. Отметим, что листья являются индикатором загрязнения древесных пород ^{137}Cs [5].

Таблица 8

Ранжированные ряды коэффициентов перехода ^{137}Cs и ^{90}Sr в органы и ткани деревьев ольхи черной

Table 8

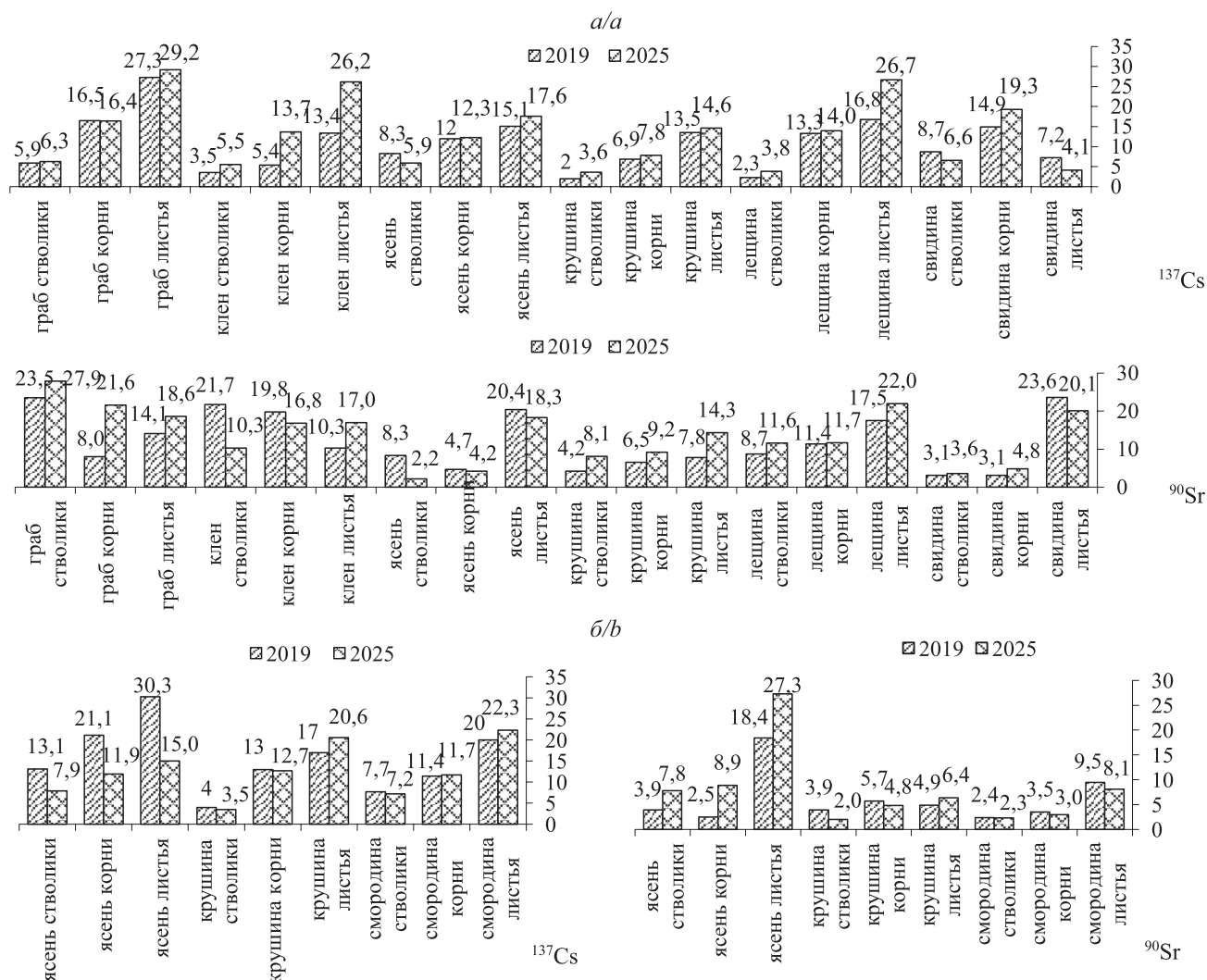
Ranked series of ^{137}Cs and ^{90}Sr transition coefficients in to organs and tissues of black alder trees

Радионуклид		^{137}Cs	^{90}Sr
Удельная активность			
Ольс снытевый	2019	древесина < кора < ветви < листья < корни	древесина < листья < ветви < корни < кора
	2025	древесина $\approx$ кора < ветви < листья $\approx$ корни	древесина < ветви < корни < листья < кора
Ольс папорот- никовый	2019	древесина < кора < ветви < листья < корни	древесина < корни < ветви < листья < кора
	2025	кора < древесина < ветви < листья < корни	древесина < ветви < листья < корни < кора
Ольс осоковый	2019	древесина < кора < ветви < корни < листья	древесина < корни < ветви < листья < кора
	2025	кора < древесина < ветви < корни < листья	древесина < ветви < корни < листья < кора
Коэффициент перехода			
Ольс снытевый	2019	древесина < кора < ветви < листья < корни	древесина < листья < ветви < корни < кора
	2025	древесина $\approx$ кора < ветви < листья $\approx$ корни	древесина = ветви < корни < листья = кора
Ольс папо- ротниковый	2019	древесина < кора < ветви < листья < корни	древесина < ветви < корни < листья < кора
	2025	кора < древесина < ветви < листья < корни	древесина < ветви < листья < корни < кора
Ольс осоковый	2019	древесина < кора < ветви < корни < листья	древесина < корни < ветви < листья < кора
	2025	кора < древесина < ветви < корни < листья	
Усредненный ряд		древесина < кора < ветви < листья < корни	древесина < ветви < корни < листья < кора

Общим для ранжированных распределений фракций деревьев ольхи по величинам A_y и $K_n^{90}\text{Sr}$ является минимальное загрязнение древесины и максимальное – коры. Кора является индикатором уровня загрязнения древесных пород ^{90}Sr [5]. Остальные компоненты в частных рядах встречаются на разных позициях. Усредненные ранжированные ряды фракций ее деревьев по величинам A_y и $K_n^{90}\text{Sr}$ однотипны – древесина < ветви < корни < листья < кора. Полагаем, что полученные усредненные распределения органов и тканей ольхи по уровням их загрязнения ^{137}Cs и ^{90}Sr можно считать референтными для современного этапа последствий Чернобыльской радиационной катастрофы.

Загрязнение радионуклидами органов подроста и подлеска. Подростово-подлесочный ярус играет важную роль в перераспределении радионуклидов в лесных фитоценозах. Подлесок, благодаря поверхностному строению корневых систем, отвлекает на себя часть подвижного запаса ^{137}Cs в почве и в зависимости от условий произрастания и видового состава понижает или увеличивает депонирование радионуклида древесным ярусом [28]. Концентрация ^{137}Cs в растениях подроста и подлеска выше, чем в растениях древостоя⁶, но из-за небольшого запаса фитомассы доля радионуклида, удерживаемая подростово-подлесочным элементом лесного фитоценоза, небольшая [29].

Виды растений подроста и подлеска в черноольшаниках по-разному накапливали ^{137}Cs и ^{90}Sr в 2019 и 2025 гг. Величины их K_n значительно различались между органами одного вида растений и одного органа разных пород. Величины K_n обоих радионуклидов за 6-летний период у разных видов подроста и подлеска изменялись в разных направлениях и разными темпами. В черноольшанике снытевом $K_n^{137}\text{Cs}$ увеличились в 77,8 % исследованных органов всех видов растений анализируемого яруса, $K_n^{90}\text{Sr}$ – в 66,7 % случаев, в черноольшанике папоротниковом чаще снижались $K_n^{137}\text{Cs}$ (66,7 % случаев) и $K_n^{90}\text{Sr}$ (55,6 %). В осоковом типе леса $K_n^{137}\text{Cs}$ понизились у 66,7 % органов, а $K_n^{90}\text{Sr}$ у такого же их количества выросли (рис. 1).



⁶20 лет после чернобыльской катастрофы : последствия в Республике Беларусь и их преодоление: Национальный доклад / под ред. В. Е. Шевчука, В. Л. Гурачевского. Минск : Комитет по проблемам последствий катастрофы на Чернобыльской АЭС при Совете Министров Республики Беларусь. 2006 г. 112 с.

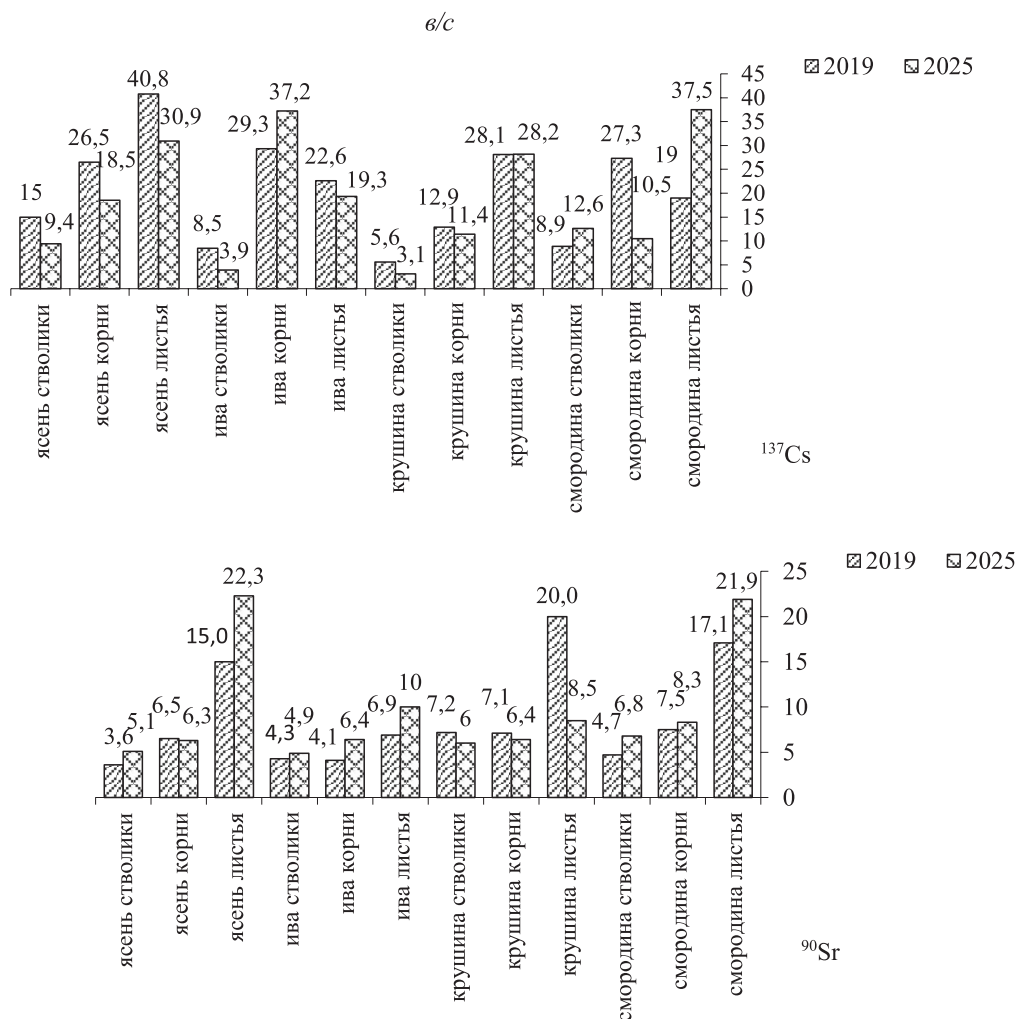


Рис. 1. Коэффициенты перехода ^{137}Cs и ^{90}Sr в органы растений подроста и подлеска в черноольшаниках снытевом (а), папоротниковом (б) и осоковом (в), $n \times 10^{-3} \text{ м}^2/\text{кг}$

Fig. 1. Transition coefficients of ^{137}Cs and ^{90}Sr in to organs of undergrowth and understorey plants in the black alder goutweed (a), fern (b) and sedge (c) type of forests, $n \times 10^{-3} \text{ м}^2 \text{ kg}^{-1}$

В черноольшанике снытевом $K_{tr}^{137}\text{Cs}$ в растения подростово-подлесочного яруса преимущественно повысились, в папоротниковом и осоковом – большей частью понизились. В то же время $K_{tr}^{90}\text{Sr}$ возросли у растений на влажных и мокрых почвах и снизились на сырых. С увеличением индекса гигротопы наблюдался рост $K_{tr}^{137}\text{Cs}$ в стволиках, в меньшей степени в корнях; $K_{tr}^{90}\text{Sr}$ в этих компонентах в данном направлении уменьшались.

Суммарно во всех 3 типах леса $K_{tr}^{137}\text{Cs}$ повысились у 53,8 % органов исследованных видов подроста и подлеска, $K_{tr}^{90}\text{Sr}$ – у 61,5 %.

Для сглаживания индивидуальных различий в изменениях $K_{tr}^{137}\text{Cs}$ и ^{90}Sr в органах разных видов подроста и подлеска рассчитали средние темпы их изменения в подростово-подлесочных ярусах всех типов леса (табл. 9). Анализ показал, что за 6 лет средние $K_{tr}^{137}\text{Cs}$ во всех компонентах растений в черноольшанике снытевом увеличились, в черноольшанике папоротниковом – снизились, а увеличение или уменьшение их темпов происходило в ряду ствол/листья – корни – листья. В черноольшанике осоковом $K_{tr}^{137}\text{Cs}$ уменьшились в стволиках и корнях и незначительно выросли в листьях. $K_{tr}^{90}\text{Sr}$ возрастали во всех органах и типах леса, за исключением ствол/листья в черноольшанике снытевом. Более высокими темпами это происходило в корнях. В стволиках и листьях скорость их роста была близкой.

Для оценки влияния условий произрастания на накопление ^{137}Cs и ^{90}Sr органами отдельных видов подростово-подлесочного яруса в качестве референтных пород использовали встречающиеся по всем исследованным типам леса подрост ясени и подлесок крушины. Ясень обыкновенный произрастает в узком спектре почвенно-гидрологических условий с богатыми почвами, в Полесье – в основном на низинных болотах с хорошей проточностью грунтовых вод, где его эдафический ареал совпадает с большей частью

с ареала ольхи черной [30; 31]. Установлено, что $K_{\Pi}^{137}\text{Cs}$ понижались в большинстве органов подроста ясеня в разных типах леса. При этом их темпы в ряду стволики – корни – листья в черноольшанике папоротниковом снижались, а в осоковом – возрастали. В черноольшанике снытевом изменения включали снижение данного показателя в стволиках и повышение в корнях и листьях с возрастанием темпов роста. В этом ряду в черноольшанике снытевом $K_{\Pi}^{90}\text{Sr}$ снижались, в остальных типах леса – большей частью возрастали (табл. 10).

Таблица 9

Средние темпы изменения коэффициентов перехода ^{137}Cs и ^{90}Sr
в органы растений видов подроста и подлеска по типам леса, %/год

Table 9

Average rates of change of the ^{137}Cs and ^{90}Sr transition coefficients
into organs of plant species of undergrowth and understorey by forest types, %/year

Радионуклид		¹³⁷ Cs			⁹⁰ Sr		
Тип леса / ТЛУ	Количество видов	Орган					
		стволики	корни	листья	стволики	корни	листья
Олч. сн. / D ₃	6	+2,1	+3,5	+4,6	−3,6	+4,7	+3,6
Олч. пап. / C ₄	3	−4,2	−5,6	−5,7	+4,2	+6,8	+4,6
Олч. ос. / C ₅	4	−3,9	−3,2	+0,8	+1,0	+2,5	+1,0

Таблица 10

Темпы изменения коэффициентов перехода ^{137}Cs и ^{90}Sr в органы подроста ясеня и подлеска крушины по типам леса, %/год

Table 10

Rates of change of the ^{137}Cs and ^{90}Sr transition coefficients
into organs of ash undergrowth and buckthorn understorey by forest type, %/year

Радионуклид	Порода	Ясень			Крушина		
	Орган	стволики	корни	листья	стволики	корни	листья
^{137}Cs	Олч. сн.	–4,8	+0,4	+2,8	+13,3	+2,2	+1,4
	Олч. пап.	–6,6	–7,3	–8,4	–2,1	–0,4	+3,5
	Олч. ос.	–6,2	–5,0	–4,0	–7,4	–1,9	+0,1
^{90}Sr	Олч. сн.	–12,2	–1,8	–1,7	+15,5	+6,9	+13,9
	Олч. пап.	+16,7	+42,7	+8,1	–8,1	–2,6	+5,1
	Олч. ос.	+6,9	–0,5	+8,1	–2,8	–1,6	–9,6

Крушине ломкой свойственна высокая экологическая пластичность и широкий эдафический ареал произрастания [32], включая черноольховые типы леса [30; 31]. В частях ее растений в черноольшаниках наблюдается иное поведение радионуклидов, чем у ясеня (табл. 10). В снытевом типе леса $K_{\Pi}^{137}\text{Cs}$ во все органы крушины возрастали, в папоротниковом и осоковом типах леса темпы снижения $K_{\Pi}^{137}\text{Cs}$ сокращались от стволиков до корней и увеличивались в листьях; так же изменялись $K_{\Pi}^{90}\text{Sr}$ в черноольшанике папоротниковом. Иные распределения $K_{\Pi}^{90}\text{Sr}$ наблюдались в остальных типах леса. В ряду повышения индекса влажности почвы темпы уменьшения $K_{\Pi}^{137}\text{Cs}$ снижались во всех органах.

В целом у растений подроста и подлеска наиболее высокими K_{Π} радионуклидов характеризуются листья, за ними, в порядке снижения, следуют корни и стволики. Наблюдаются и иные распределения. Выявлено 6 вариантов ранжированных рядов органов растений данного яруса по $K_{\Pi}^{137}\text{Cs}$ и ^{90}Sr . Наиболее распространенным для обоих радионуклидов является ряд стволики < корни < листья, включающий 76,9 % частных распределений $K_{\Pi}^{137}\text{Cs}$ у разных видов в разных типах леса и в разные сроки наблюдения, и 80,8 % – $K_{\Pi}^{90}\text{Sr}$ (табл. 11).

Таблица 11

Ранжированные ряды коэффициентов перехода ^{137}Cs и ^{90}Sr в органы растений подроста и подлеска

Table 11

Ranked series of ^{137}Cs and ^{90}Sr transition coefficients into organs of plant species of undergrowth and understory

К _п ¹³⁷ Cs		К _п ⁹⁰ Sr	
Черноольшаник снытевый			
ряд	порода – год наблюдения	ряд	порода – год наблюдения
стволики < корни < листья	граб, клен, ясень, крушина, лещина – 2019, 2025	стволики < корни < листья	крушина, лещина, свидина – 2019, 2025; клен – 2025; ясень – 2019, 2025
листья < стволики < корни	свидина – 2019, 2025	корни < листья < стволики	граб – 2019
–	–	листья < корни < стволики	клен – 2019; граб – 2025
Черноольшаник папоротниковый			
стволики < корни < листья	ясень, крушина, смородина – 2019, 2025	стволики < корни < листья	смородина – 2019, 2025; ясень, крушина – 2025
–	–	корни < стволики < листья	ясень – 2019
–	–	стволики < листья < корни	крушина – 2019
Черноольшаник осоковый			
стволики < корни < листья	ясень, крушина – 2019, 2025	стволики < корни < листья	ясень, ива, крушина, смородина – 2019, 2025
стволики < листья < корни	ива – 2019, 2025; смородина – 2019	–	–
корни < стволики < листья	смородина – 2025	–	–

Ранжирование видов растений подроста и подлеска по величинам $K_{\text{п}} \text{ } ^{137}\text{Cs}$ и ^{90}Sr в их органы показало весьма неоднородную картину с множеством индивидуальных распределений по типам леса и годам наблюдений (табл. 12). Полное совпадение относительного распределения древесно-кустарниковых пород подростово-подлесочного яруса в 2019 и в 2025 гг. имеют ряды $K_{\text{п}} \text{ } ^{137}\text{Cs}$ в стволики и $K_{\text{п}} \text{ } ^{90}\text{Sr}$ в листья в черноольшанике папоротниковом, а также $K_{\text{п}} \text{ } ^{90}\text{Sr}$ в листья в черноольшанике осоковом, почти полное – $K_{\text{п}} \text{ } ^{90}\text{Sr}$ в корни черноольшаников снытевого и папоротникового в сравняемые годы, полное несовпадение – ряды $K_{\text{п}} \text{ } ^{137}\text{Cs}$ в корни всех типов леса. В остальных рядах по относительным уровням загрязнения радионуклидами органов растений между этапами наблюдений совпадает от одной до четырех пород.

Живой напочвенный покров (ЖНП). В черноольховых лесах фоновые виды ЖНП характеризуются разными значениями $K_{\text{п}} \text{ } ^{137}\text{Cs}$ и ^{90}Sr в надземную и подземную части растений в зависимости от типа леса и этапа наблюдения (рис. 2). Изменения $K_{\text{п}} \text{ } ^{137}\text{Cs}$ и ^{90}Sr в их фитомассу за 2019–2025 гг. различались направлениями и темпами. В черноольшанике снытевом у большинства травянистых видов растений $K_{\text{п}}$ обоих радионуклидов увеличились в надземной и подземной частях, кроме снижения $K_{\text{п}} \text{ } ^{137}\text{Cs}$ у сныти обыкновенной в обеих частях фитомассы.

В папоротниковом типе леса произошел рост $K_{\text{п}} \text{ } ^{137}\text{Cs}$ в обеих частях фитомассы щитовника шартрского, в надземной фитомассе крапивы длиннолистной, в подземной – герани Роберта и окопника лекарственного (всего 5 позиций) и их снижение во всех частях растений окопника лекарственного, осоки ложносытевой и череды олиственной, а также в подземной фитомассе крапивы длиннолистной и надземной части герани Роберта (7 позиций). В большинстве случаев (8 позиций) $K_{\text{п}} \text{ } ^{90}\text{Sr}$ повысились (в подземной фитомассе герани Роберта, в надземной фитомассе осоки ложносытевой, череды олиственной и щитовника шартрского, в обеих частях крапивы длиннолистной и окопника лекарственного). В 4 случаях (в подземных частях осоки ложносытевой, череды олиственной, щитовника шартрского, в надземной у герани Роберта) произошло снижение данного показателя.

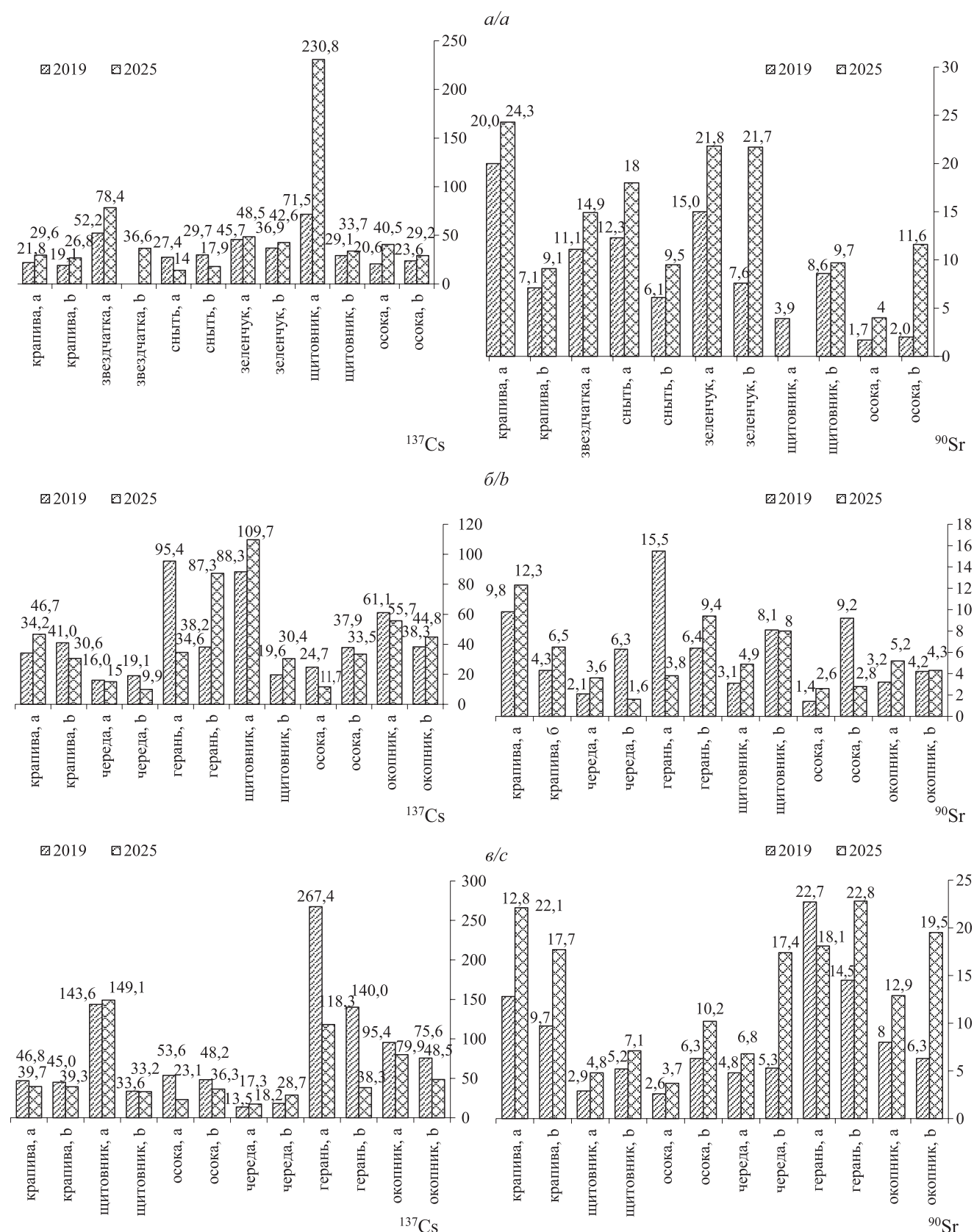


Рис. 2. Коэффициенты перехода ^{137}Cs и ^{90}Sr в фитомассу фоновых видов живого напочвенного покрова черной ольшаников снытевого (а), папоротникового (б), осокового (в), (а – надземная, б – подземная части), $n \times 10^{-3} \text{ м}^2/\text{кг}$

Fig. 2. The transition coefficients of ^{137}Cs and ^{90}Sr to the phytomass of background species of living ground cover in the black alder goutweed (a), fern (b) and sedge (c) type of forests, (a – aboveground, b – underground parts), $n \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{kg}^{-1}$

Таблица 12

Ранжированные ряды видов подроста и подлеска по коэффициентам перехода ^{137}Cs и ^{90}Sr в их органы

Table 12

Ranked series of undergrowth and understory species by the transition coefficients of ^{137}Cs and ^{90}Sr into their organs

Орган	Тип леса		
	черноольшаник снытевый	черноольшаник папоротниковый	черноольшаник осоковый
$K_{\text{п}}^{137}\text{Cs}$			
Стволики*	крушина < лещина < клен < граб < ясень < свидина	крушина < смородина < ясень	крушина < ива < смородина < ясень
Стволики**	крушина < лещина < клен < ясень < граб < свидина	крушина < смородина < ясень	крушина < ива < ясень < смородина
Корни*	клен < крушина < ясень < лещина < свидина < граб	смородина < крушина < ясень	крушина < ясень < смородина < ива
Корни**	крушина < ясень < клен < лещина < граб < свидина	смородина < ясень < крушина	смородина < крушина < ясень < ива
Листья*	свидина < клен < крушина < ясень < лещина < граб	крушина < смородина < ясень	смородина < ива < крушина < ясень
Листья**	свидина < крушина < ясень < клен < лещина < граб	крушина < ясень < смородина	ива < крушина < ясень < смородина
$K_{\text{п}}^{90}\text{Sr}$			
Стволики*	свидина < крушина < ясень < лещина < клен < граб	смородина < ясень = крушина	ясень < ива < смородина < крушина
Стволики**	ясень < свидина < крушина < клен < лещина < граб	крушина < смородина < ясень	ясень < ива < крушина < смородина
Корни*	свидина < ясень < крушина < граб < лещина < клен	ясень < смородина < крушина	ива < ясень < крушина < смородина
Корни**	ясень < свидина < крушина < лещина < клен < граб	смородина < крушина < ясень	ясень < ива = крушина < смородина
Листья*	крушина < клен < граб < лещина < ясень < свидина	крушина < смородина < ясень	ива < ясень < смородина < крушина
Листья**	крушина < клен < ясень < граб < свидина < лещина	крушина < смородина < ясень	крушина < ива < смородина < ясень

Примечание. * – в 2019 г., ** – в 2025 г.

В черноольшанике осоковом $K_{\text{п}}^{137}\text{Cs}$ выросли в надземной фитомассе щитовника шартрского и обеих частях череды олиствленной (3 позиции) и понизились в обеих частях герани Роберта, крапивы длиннолистной, окопника лекарственного, осоки ложносытевой (8 позиций); в подземной части щитовника шартрского данный показатель не изменился. $K_{\text{п}}^{90}\text{Sr}$ увеличились почти по 11 позициям, за исключением его понижения в надземной части герани Роберта. В итоге за 6 лет $K_{\text{п}}^{137}\text{Cs}$ выросли у 48,6 % исследованных частей растений ЖНП в фитоценозах ольхи черной, $K_{\text{п}}^{90}\text{Sr}$ – у 85,7 % частей.

Относительное накопление радионуклидов разными видами растений ЖНП различается между частями фитомассы, типами леса и годами исследований (табл. 13).

Таблица 13

Ранжированные ряды коэффициентов перехода ^{137}Cs и ^{90}Sr в части фитомассы видов живого напочвенного покрова

Table 13

Ranked series of ^{137}Cs and ^{90}Sr transition coefficients in parts of the phytomass of living ground cover species

Тип леса	Год	$K_{\pi}^{137}\text{Cs}$	$K_{\pi}^{90}\text{Sr}$
		надземная фитомасса	
Олч. сн.	2019	щитовник < звездчатка < зеленчук < сныть < крапива < осока	крапива < зеленчук < сныть < звездчатка < щитовник < осока
	2025	щитовник < звездчатка < зеленчук < осока < крапива < сныть	крапива < зеленчук < сныть < звездчатка < осока
Олч. пап.	2019	герань < щитовник < окопник < крапива < осока < череда	герань < крапива < окопник < щитовник < череда < осока
	2025	щитовник < герань < окопник < крапива < череда < осока	крапива < окопник < щитовник < герань < череда < осока
Олч. ос.	2019	герань < щитовник < окопник < осока < крапива < череда	герань < крапива < окопник < череда < щитовник < осока
	2025	щитовник < герань < окопник < крапива < осока < череда	крапива < герань < окопник < череда < щитовник < осока
подземная фитомасса			
Олч. сн.	2019	зеленчук < сныть < щитовник < осока < крапива	щитовник < зеленчук < крапива < сныть < осока
	2025	зеленчук < звездчатка < щитовник < осока < крапива < сныть	зеленчук < осока < щитовник < сныть < крапива
Олч. пап.	2019	крапива < окопник < герань < осока < щитовник < череда	осока < щитовник < герань < череда < крапива < окопник
	2025	герань < окопник < осока < крапива < щитовник < череда	герань < щитовник < крапива < окопник < осока < череда
Олч. ос.	2019	герань < окопник < осока < крапива < щитовник < череда	герань < крапива < окопник = осока < череда < щитовник
	2025	окопник < крапива < герань < осока < щитовник < череда	герань < окопник < крапива < череда < осока < щитовник

Для ольсов папоротникового и осокового усредненный ранжированный ряд по величинам $K_{\pi}^{137}\text{Cs}$ в надземные части растений имеет вид «щитовник шартрский < герань Роберта < окопник лекарственный < крапива длиннолистная < осока ложносытевая < череда олиственная», в подземные – «окопник лекарственный < герань Роберта < крапива длиннолистная < осока ложносытевая < щитовник шартрский < череда олиственная», $K_{\pi}^{90}\text{Sr}$ в надземные части – «крапива длиннолистная < герань Роберта < окопник лекарственный < щитовник шартрский < череда олиственная < осока ложносытевая», в подземные – «герань Роберта < крапива длиннолистная < окопник лекарственный < осока ложносытевая < щитовник шартрский < череда олиственная».

В целом в черноольшаниках наблюдался приблизительный паритет увеличения (49,4 %) и уменьшения (50,6 %) $K_{\pi}^{137}\text{Cs}$ в частях всех исследованных растений, в то время как $K_{\pi}^{90}\text{Sr}$ увеличились в 69,7 % органов, тканей и частей их фитомассы и уменьшились в 30,3 % случаев (табл. 14).

Таблица 14

**Направления изменений коэффициентов перехода ^{137}Cs и ^{90}Sr
в частях растений по элементам черноольховых фитоценозов, %**

Table 14

Directions of ^{137}Cs and ^{90}Sr transition coefficients changes in the parts of plants by elements of black alder phytocenoses, %

Элемент фитоценоза	Количество частей растений, шт.	$K_{\text{п}}^{137}\text{Cs}$		$K_{\text{п}}^{90}\text{Sr}$	
		увеличились	уменьшились	увеличились	уменьшились
Древостой	15	40,0	60,0	53,3	46,7
Подрост, подлесок	39	53,8	46,2	61,5	38,5
Живой напочвенный покров	35	48,6	51,4	85,7	14,3
Все элементы	89	49,4	50,6	69,7	30,3

В ряду типов леса черноольшаник снытевый – черноольшаник папоротниковый – черноольшаник осоковый с повышением индекса гигротопы наблюдается сокращение количества частей растений с увеличившимися $K_{\text{п}}^{137}\text{Cs}$ и их возрастание с уменьшившимися значениями. Аналогичные изменения $K_{\text{п}}^{90}\text{Sr}$ отмечены в ряду черноольшаник осоковый – черноольшаник снытевый – черноольшаник папоротниковый (табл. 15).

Таблица 15

Направления изменений коэффициентов перехода ^{137}Cs и ^{90}Sr в частях растений по типам леса, %

Table 15

Directions of ^{137}Cs and ^{90}Sr transition coefficients changes in the parts of plants by forest type, %

Тип леса	Количество компонентов, шт.	$K_{\text{п}}^{137}\text{Cs}$		$K_{\text{п}}^{90}\text{Sr}$	
		увеличились	уменьшились	увеличились	уменьшились
Олч. сн.	34	76,5	23,5	73,5	26,5
Олч. пап.	26	42,3	57,7	53,8	46,2
Олч. ос.	29	24,1	75,9	79,3	20,7

Основными факторами, обеспечивающими разные уровни перехода радионуклидов в органы и ткани растений всех элементов черноольховых фитоценозов являются особенности индивидуального депонирования ^{137}Cs и ^{90}Sr каждым органом каждого вида растений, разная степень увлажнения почв по типам леса, флуктуирующая под влиянием сезонных и годовых изменений погодных условий [5; 6; 23; 33; 34].

Заключение

На современном этапе последствий ядерной катастрофы на Чернобыльской АЭС на фоне более чем двукратного снижения запасов ^{137}Cs и ^{90}Sr в природных экосистемах уровни загрязнения почв, а также органов, тканей и частей фитомассы основных элементов фитоценозов ольхи черной в ЗО ЧАЭС остаются высокими.

За 6 лет (2019–2025 гг.) текущая радиационная обстановка в черноольшаниках смягчилась по большинству параметров: уменьшились МД, A_y ^{137}Cs и ^{90}Sr в почве, ПЗ ^{137}Cs , кроме черноольшаника осокового, и ПЗ ^{90}Sr , кроме черноольшаника снытевого. В отдельных типах леса увеличились ПЗ ^{137}Cs и ^{90}Sr . Изменения показателей текущего загрязнения почв обусловлены особенностями гидрологического режима почв и поведением в них радионуклидов под влиянием погодно-климатических факторов.

Краткосрочные изменения показателей загрязнения ^{137}Cs и ^{90}Sr органов и тканей деревьев ольхи черной, органов растений подроста, подлеска и частей фитомассы растений ЖНП в черноольшаниках были разновекторными и разновеликими. Разные темпы и направленность накопления радионуклидов видами растений разных элементов черноольховых фитоценозов обусловлены эдафическими и погодно-климатическими условиями, поведением радионуклидов в почвах разного увлажнения и спецификой депонирования ^{137}Cs и ^{90}Sr разными частями растений.

В частях всех растений трех типов леса $K_n^{137}Cs$ между периодами наблюдений увеличились в 49,4 % случаев, уменьшились – у 50,6 %, $K_n^{90}Sr$ – у 69,7 % и 30,3 % соответственно. В органах и тканях деревьев ольхи и в частях фитомассы растений ЖНП $K_n^{137}Cs$ преимущественно уменьшались, в органах подроста и подлеска – возрастали; $K_n^{90}Sr$ увеличивались в частях растений всех элементов черноольховых фитоценозов.

Установлены усредненные ранжированные ряды $K_n^{137}Cs$ во фракции деревьев ольхи черной (древесина < кора < ветви < листья < корни) и $K_n^{90}Sr$ – (древесина < ветви < корни < листья < кора), а также наиболее распространенные ряды $K_n^{137}Cs$ и ^{90}Sr в органы подроста и подлеска (стволики < корни < листья). Эти ряды являются референтными для современного этапа последствий Чернобыльской радиационной катастрофы.

Библиографические ссылки

1. 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.
2. Юркевич ИД, Гельтман ВС, Ловчий НФ. *Типы и ассоциации черноольховых лесов (По исследованиям в БССР)*. Минск: Наука и техника; 1968. 376 с.
3. Иванов АФ. *Биология древесных растений*. Минск: Наука и техника; 1975. 264 с.
4. *Лесоустроительный проект государственного природоохранного научно-исследовательского учреждения «Полесский государственный радиационно-экологический заповедник» Министерства по чрезвычайным ситуациям Республики Беларусь на 2021–2030 гг. Пояснительная записка*. Минск: [б. и.]; 2020. 292 с.
5. Щеглов АИ. *Биогеохимия техногенных радионуклидов в лесных экосистемах: по материалам 10-летних исследований в зоне влияния аварии на ЧАЭС*. Москва: Наука; 2000. 268 с.
6. Переволоцкий АН. *Распределение ^{137}Cs и ^{90}Sr в лесных биогеоценозах*. Гомель: Институт радиологии; 2006. 255 с.
7. 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, Пикулик ММ, Сидор АИ, Силин АЕ, Степанчик ВВ, Тарасенко ВП, Труховец ВВ, Усеня 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.
8. Булавик ИМ, Переволоцкий АН, Гайдуль АЗ. Влияние различных факторов на накопление ^{137}Cs древесными растениями. *10 лет Полесскому государственному радиационно-экологическому заповеднику*. 1998;59–70.
9. Переволоцкий АН, Булавик ИМ, Переволоцкая ТВ, Паскребко ЛА, Андруш СН, Бондаю ЮИ, Марченко ЮД, Матусов ГД, Чудинов АН. Влияние типов условий местопроизрастания на уровень накопления ^{137}Cs в древесине основных лесообразующих пород Полесского государственного радиационно-экологического заповедника. *20 лет после чернобыльской катастрофы*. 2006;105–111.
10. Булко НИ, Шабалева МА, Толкачева НВ, Козлов АК, Машков ИА. Особенности аномального поступления ^{137}Cs в основные лесообразующие породы на территории западного следа аварии на ЧАЭС. *Проблемы лесоведения и лесоводства*. 2010;70:422–434.
11. Бондарь ЮИ, Матусов ГД, Булавик ИМ, Рошин ВЕ. Особенности перехода ^{137}Cs и ^{90}Sr в древесину и кору сосновых и лиственных насаждений в северной и южной частях заповедника. *Экосистемы и радиация: аспекты существования и развития*. 2013;156–164.
12. Воронцовская АН, Матусов ГД. Накопление радионуклидов структурными компонентами лесных фитоценозов. *Экосистемы и радиация: аспекты существования и развития*. 2013;164–171.
13. Углынец АВ, Гарбарук ДК, Шумак СВ. Накопление ^{137}Cs и ^{90}Sr компонентами древостоя в черноольшаниках зоны отчуждения Чернобыльской АЭС. *Проблемы лесоведения и лесоводства*. 2020;80:246–256.
14. Гарбарук ДК, Углынец АВ, Воронцовская АН. Загрязнение ^{137}Cs древесины ольхи черной в заповедной зоне Полесского государственного радиационно-экологического заповедника Беларуси. 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; 2021:56–58.
15. Гарбарук ДК, Углынец АВ. Загрязнение древесины и коры ^{137}Cs в высоковозрастных насаждениях ольхи черной в ближней зоне Чернобыльской атомной электростанции. *Журнал Белорусского государственного университета. Экология*. 2022;2:48–58. <https://doi.org/10.46646/2521-683X/2022-2-48-58>
16. Углынец АВ, Гарбарук ДК, Воронцовская АН. Загрязнение ^{90}Sr древесины и коры ольхи черной в белорусском секторе зоны отчуждения Чернобыльской АЭС на этапе отдаленных последствий аварии. *Проблемы лесоведения и лесоводства*. 2022;82:278–289.
17. Гарбарук ДК, Углынец АВ. Накопление ^{137}Cs и ^{90}Sr компонентами фоновых видов подроста и подлеска в черноольшаниках зоны отчуждения Чернобыльской АЭС. *Известия Гомельского государственного университета имени Ф. Скорины. Естественные науки*. 2020;3(120):29–35.
18. Углынец АВ, Гарбарук ДК. Загрязнение ^{137}Cs и ^{90}Sr доминантных видов живого напочвенного покрова в черноольшаниках зоны отчуждения Чернобыльской АЭС. *Известия Гомельского государственного университета имени Ф. Скорины. Естественные науки*. 2020;6(123):85–91.
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. Сорокина ГА, Пахарькова НВ, Шашкова ТЛ, Субботин МА. *Учебная полевая практика по геоботанике*. Красноярск: СФУ; 2012. 30 с.
22. Щеглов АИ, Цветнова ОБ. Основные закономерности сезонной и многолетней динамик накопления ^{137}Cs и ^{90}Sr в древесине. *Радиационная биология. Радиоэкология*. 2004;44(1):113–117.
23. Марченко ЮД. Погодно-климатические условия в ближней зоне Чернобыльской АЭС. *Экосистемы и радиация: аспекты существования и развития*. 2013:32–45.

24. Булко НИ, Шабалева МА, Митин НВ, Толкачева НВ, Козлов АК. Особенности длительных процессов миграции чернобыльского ^{137}Cs в автоморфных и гидроморфных почвах сосновых фитоценозов в дальней зоне аварии на ЧАЭС. *Проблемы лесоведения и лесоводства*. 2015;75:391–404.
25. Гарбарук ДК, Воронежская АН, Шумак СВ, Турчин ЛМ, Углынец АВ. Краткосрочные изменения загрязнения ^{137}Cs и ^{90}Sr элементов биогеоценозов высоковозрастных дубрав в зоне эвакуации (отчуждения) Чернобыльской АЭС. *Журнал Белорусского государственного университета. Экология*. 2026;2:51–66. <https://doi.org/10.46646/2521-683X/2026-2-51-66>
26. Булко НИ, Толкачева НВ, Потапенко АМ, Козлов АК, Машков ИА, Митин НВ, Шабалева МА, Серенкова ВА, Бутковец 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.
27. 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.
28. Ипатьев ВА, Булко НИ, Митин НВ, Шабалева МА, Диденко ЛГ. *Радиоэкологический феномен лесных экосистем*. Гомель: ИЛ НАН Беларуси; 2004. 310 с.
29. Булко НИ. Особенности накопления ^{137}Cs ярусами березового насаждения в условиях различной обводненности гидроморфных почв. *Проблемы лесоведения и лесоводства*. 2006;66:73–82.
30. Юркевич ИД, Адерихо ВС. *Типы и ассоциации ясеневых лесов (По исследованиям в БССР)*. Минск: Наука и техника; 1973. 255 с.
31. Юркевич ИД, Ловчий НФ, Гельтман ВС. *Леса Белорусского Полесья (геоботанические исследования)*. Минск: Наука и техника; 1977. 288 с.
32. Атрохин ВГ, Калущкий КК, Тюриков ФТ. *Древесные породы СССР*. Москва: Лесная промышленность; 1982. 264 с.
33. 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.
34. Углынец АВ, Шумак СВ, Гарбарук ДК. Запас надземной фитомассы нижних ярусов лесной растительности в черноольшанике папоротниковом на юго-востоке Полесья. *Журнал Белорусского государственного университета. Экология*. 2025;1:24–36. <https://doi.org/10.46646/2521-683X/2025-1-24-36>

References

1. Garbaruk DK, Uglyanets AV, Shumak SV. *Potentsial'nyi vklad komponentov chernool'khovykh nasazhdenii zapovednoi zony PGREZ v biomassu lesnykh goryuchikh materialov i sodержание 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 PSRR]. *Botanika (issledovaniya)*. 2021;50:123–139. Russian.
2. Yurkevich ID, Gel'tman VS, Lovchii NF. *Tipy i assotsiatsii chernool'khovykh lesov (Po issledovaniyam v BSSR)* [Types and associations of black alder forests (Based on studies in BSSR)]. Minsk: Nauka i tekhnika; 1968. 376 p. Russian.
3. Ivanov AF. *Biologiya drevesnykh rasteniy* [Biology of woody plants]. Minsk: Nauka i tekhnika; 1975. 264 p. Russian.
4. *Lesoustroitel'nyi proekt gosudarstvennogo prirodookhrannogo nauchno-issledovatel'skogo uchrezhdeniya «Polesskii gosudarstvennyi radiatsionno-ekologicheskii zapovednik» Ministerstva po chrezvychaynym situatsiyam Respubliki Belarus' na 2021–2030 gg. Poyasnitel'naya zapiska* [Forest management project of the State Environmental Research Institution «Polesie State Radiation and Ecological Reserve» of the Ministry of Emergency Situations of the Republic of Belarus for 2021–2030. Explanatory note]. Minsk: [publisher unknown]; 2020. 292 p. Russian.
5. 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 effected by the Chernobyl accident]. Moscow: Nauka; 2000. 268 p. Russian.
6. 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.
7. Ipat'ev VA, Baginskii VF, Bulavik IM, Dvornik AM, Volchkov 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.
8. Bulavik IM, Perevolotskii AN, Gaidul' AZ. *Vliyanie razlichnykh faktorov na nakoplenie ^{137}Cs drevesnymi rasteniyami* [Influence of various factors on ^{137}Cs accumulation by woody plants]. *10 let Polesskomu gosudarstvennomu radiatsionno-ekologicheskomu zapovedniku*. 1998;59–70. Russian.
9. Perevolotskii AN, Bulavik IM, Perevolotskaya TV, Paskrobko LA, Andrush SN, Bondar' Yul, Marchenko YuD, Matusov GD, Chudinov AN. *Vliyanie tipov uslovii mestoproizrastaniya na uroven' nakopleniya ^{137}Cs v drevesine osnovnykh lesoobrazuyushchikh porod Polesskogo gosudarstvennogo radiatsionno-ekologicheskogo zapovednika* [The influence of types of growing conditions on the level of ^{137}Cs accumulation in the wood of the main forest-forming species of the Polesie State Radiation and Ecological Reserve]. *20 let posle chernobyl'skoy katastrofy*. 2006;105–111. Russian.
10. Bulko NI, Shabaleva MA, Tolкачева NV, Kozlov AK, Mashkov IA. *Osobennosti anomal'nogo postupleniya ^{137}Cs v osnovnye lesoobrazuyushchie породы на территории западного следа аварии на ЧАЭС* [The peculiarities of the anomalous uptake of ^{137}Cs into major forest-forming species occurring in the area affected by the western trace of the Chernobyl accident]. *Problemy lesovedeniya i lesovodstva*. 2010;70:422–434. Russian.
11. Bondar' Yul, Matusov GD, Bulavik IM, Roshchin VE. *Osobennosti perekhoda ^{137}Cs i ^{90}Sr v drevesinu i koru sosnovykh i listvennykh nasazhdenii v severnoi i yuzhnoi chastyakh zapovednika* [Features of the transition of ^{137}Cs and ^{90}Sr into wood and bark of pine and broadleaved forests in the northern and southern parts of the reserve]. *Ekosistemy i radiatsiya: aspekty sushchestvovaniya i razvitiya*. 2013;156–164. Russian.

12. Voronetskaya AN, Matusov GD. *Nakoplenie radionuklidov strukturnymi komponentami lesnykh fitotsenozov* [Accumulation of radionuclides by structural components of forest phytocenoses]. *Ekosistemy i radiatsiya: aspekty sushchestvovaniya i razvitiya*. 2013;164–171. Russian.
- Uglyanets AV, Garbaruk DK, Shumak SV. *Nakoplenie ^{137}Cs i ^{90}Sr komponentami drevostoya v chernool'shanikakh zony otchuzhdeniya Chernobyl'skoi AES* [^{137}Cs and ^{90}Sr accumulation of stand components in black alder forests of the Chernobyl NPP exclusion zone]. *Problemy lesovedeniya i lesovodstva*. 2020;80:246–256. Russian.
- Garbaruk DK, Uglyanets AV, Voronetskaya AN. *Zagryaznenie ^{137}Cs drevesiny ol'khi chernoi v zapovednoi zone Poles'skogo gosudarstvennogo radiatsionno-ekologicheskogo zapovednika Belarusi* [^{137}Cs contamination of black alder wood in the protected area of Polesye State Radiation-Ecological reserve of Beldrus]. In: *Radioekologicheskie posledstviya radiatsionnykh avarii – k 35-oi godovshchine avarii na ChAES* [Radioecological consequences of radiation accident: to the 35th anniversary of the Chernobyl accident]. Obninsk: FGBNU VNIIRAE; 2021:56–58. Russian.
15. Garbaruk DK, Uglyanets AV. Wood and bark ^{137}Cs contamination in black alder stands in the near zone of the Chernobyl Nuclear Power Plant. *Journal of Belarusian State University. Ecology*. 2022;2:48–58. Russian. <https://doi.org/10.46646/2521-683X/2022-2-48-58>
16. Uglyanets AV, Garbaruk DK, Voronetskaya AN. *Zagryaznenie ^{90}Sr drevesiny i kory ol'khi chernoi v belorusskom sektore zony otchuzhdeniya Chernobyl'skoi AES na etape oddalennykh posledstviy avarii* [^{90}Sr contamination of black alder wood and bark in the belarusian sector of the Chernobyl NPP exclusion zone at the stage of remote consequences of the accident]. *Problemy lesovedeniya i lesovodstva*. 2022;82:278–289. Russian.
- Garbaruk DK, Uglyanets AV. The accumulation of ^{137}Cs and ^{90}Sr by components of background species of undergrowth and undergrowth in the black alder of the exclusion zone of the Chernobyl nuclear power plant. *Proceeding of Francisk Scorina Gomel State University. Natural sciences*. 2020;3(120):29–35. Russian.
18. Uglyanets AV, Shumak SV, Garbaruk DK. Contamination by ^{137}Cs and ^{90}Sr of the dominant species of the living ground cover in the black alder forests of the exclusion zone of the Chernobyl NPP. *Proceeding of Francisk Scorina Gomel State University. Natural sciences*. 2020;6(123):85–91. 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. *Tsaksatsionno-lesoustroitel'nyy spravochnik* [Taxation and forest inventory guide]. Minsk: Lesnoye i okhotnich'ye khozyaystvo; 2019. 335 p. Russian.
21. Sorokina GA, Pakhar'kova NV, Shashkova TL, Subbotin MA. *Uchebnaya polevaya praktika po geobotanike* [Educational field practice in geobotany]. Krasnoyarsk: SFU; 2012. 30 p. Russian.
22. Shcheglov AI, Tsvetnova OB. *Osnovnye zakonomernosti sezonnoi i mnogoletnei dinamiki nakopleniya ^{137}Cs i ^{90}Sr v drevesine* [Basic features of seasonal and multiyear dynamics of ^{137}Cs and ^{90}Sr in wood]. *Radiatsionnaya biologiya. Radioekologiya*. 2004;44(1):113–117. Russian.
23. 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.
24. Bulko NI, Shabaleva MA, Mitin NV, Tolkacheva NV, Kozlov AK. *Osobennosti dlitel'nykh protsessov migratsii chernobyl'skogo ^{137}Cs v avtomorfnykh i gidromorfnykh pochvakh osnovnykh fitotsenozov v dal'nei zone avarii na ChAES* [Features of long processes migration of chernobyl ^{137}Cs in automorphic and hydromorphic soils of pine phytocenoses in the distant zone accident to the NPP]. *Problemy lesovedeniya i lesovodstva*. 2015;75:391–404. Russian.
25. Garbaruk DK, Voronetskaya AN, Shumak SV, Turchin LM, Uglyanets AV. Short-term contamination changes of ^{137}Cs and ^{90}Sr in ecosystems elements of high-age oak forests in the Chernobyl nuclear power plant exclusion zone. *Journal of Belarusian State University. Ecology*. 2026;2:51–66. Russian. <https://doi.org/10.46646/2521-683X/2026-2-51-66>.
26. 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, sostoyaniye, produktivnost' i ustoychivost'* [Forest ecosystems: current challenges, status, productivity and sustainability]. Gomel': Institut lesa NAN Belarusi; 2020:314–319. Russian.
27. 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.
28. 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.
29. Bulko NI. *Osobennosti nakopleniya ^{137}Cs yarusami berezovogo nasazhdeniya v usloviyakh razlichnoi obvodnennosti gidromorfnykh poch* [Features of ^{137}Cs accumulation by birch forest layers under conditions of varying water content of hydromorphic soils]. *Problemy lesovedeniya i lesovodstva*. 2006;66:73–82. Russian.
- Yurkevich ID, Aderikho VS. *Tipy i assotsiatsii yasenevykh lesov (Po issledovaniyam v BSSR)* [Types and associations of ash forests (Based on studies in BSSR)]. Minsk: Nauka i tekhnika; 1973. 255 p. Russian.
31. Yurkevich ID, Lovchii NF, Gel'tman VS. *Lesy Belorusskogo Poles'ya (geobotanicheskie issledovaniya)* [Forests of Belarusian Polesie (geobotanical studies)]. Minsk: Nauka i tekhnika; 1977. 288 p. Russian.
32. Atrokhin VG, Kalutskii KK, Tyurikov FT. *Drevesnye porody SSSR* [Wood species of the USSR]. Moscow: Lesnaya promyshlennost'; 1982. 264 p. Russian.
33. Parfenov VI, Yakushev BI, Martinovich BS, Zabolotnyi AI, Dmitrieva SA, Kabashnikova GI, Kaurov IA, Moiseenko IF, Rakhteenko 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. *Radioaktivnoe zagryaznenie 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.
34. Uglyanets AV, Shumak SV, Garbaruk DK. Aboveground phytomass stock of the lower tiers of forest vegetation in black alder fern forest type in the south-east of Polesie. *Journal of Belarusian State University. Ecology*. 2025;1:24–36. Russian. <https://doi.org/10.46646/2521-683X/2025-1-24-36>.