
РАДИОЛОГИЯ И РАДИОБИОЛОГИЯ, РАДИАЦИОННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

RADIOLOGY AND RADIOBIOLOGY, RADIATION SAFETY

УДК 539.163(546.36):630*164.4(630*176.321.5)

ЗАГРЯЗНЕНИЕ ДРЕВЕСИНЫ И КОРЫ ^{137}Cs В ВЫСОКОВОЗРАСТНЫХ НАСАЖДЕНИЯХ ОЛЬХИ ЧЕРНОЙ В БЛИЖНЕЙ ЗОНЕ ЧЕРНОБЫЛЬСКОЙ АТОМНОЙ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ

Д. К. ГАРБАРУК¹⁾, А. В. УГЛЯНЕЦ¹⁾

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

Приводятся результаты изучения загрязнения ^{137}Cs древесины и коры ольхи черной в высоковозрастных насаждениях наиболее распространенных типов леса в ближней зоне Чернобыльской атомной электростанции. Определены параметры накопления радионуклида этими тканями по типам леса и в целом по формации. Установлена связь накопления ими ^{137}Cs с индексом почвенного увлажнения. Выявлены особенности распределения радионуклида в древесине деревьев по классам роста и развития по Крафту и по радиальному профилю ствола, а также в валежнике. Установлены корреляционные связи содержания данного радионуклида в древесине и коре с плотностью загрязнения почвы ^{137}Cs и расстоянием до места его выброса. Несмотря на высокие уровни загрязнения местности ^{137}Cs в спелых и перестойных насаждениях ольхи черной белорусскому нормативу РДУ/ЛХ-2001 для заготовки круглых лесоматериалов для строительства стен жилых зданий и топливной древесины соответствует неокоренная древесина в 7,7 % насаждений, для заготовки прочих круглых лесоматериалов – в 26,9 %.

Ключевые слова: ольха черная; древесина; кора; загрязнение радиоактивное; ^{137}Cs ; зона отчуждения; Чернобыльская атомная электростанция.

Образец цитирования:

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>

For citation:

Garbaruk DK, Uglyanets AV. Wood and bark ^{137}Cs contamination in black alder high-age stands in the near zone of the Chernobyl Nuclear Power Plant. *Journal of the Belarusian State University. Ecology*. 2022;2:48–58. Russian.
<https://doi.org/10.46646/2521-683X/2022-2-48-58>

Авторы:

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

Authors:

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

WOOD AND BARK ^{137}Cs CONTAMINATION IN BLACK ALDER HIGH-AGE STANDS IN THE NEAR ZONE OF THE CHERNOBYL NUCLEAR POWER PLANT

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

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

Corresponding author: D. K. Garbaruk (dima.garbaruk.77@mail.ru)

The results of the study of ^{137}Cs contamination of wood and bark of black alder in high-age stands of the most common types of forest in the near zone of the Chernobyl Nuclear Power Plant are presented. The parameters of the accumulation of radionuclide by these tissues by types of forest and in general by formation are determined. The connection of their accumulation of ^{137}Cs with the soil moisture index has been established. The features of the distribution of radionuclide in the wood of trees by classes of growth and development by Craft and by the radial profile of the trunk, as well as in the fallen deadwood, are revealed. Correlations of this radionuclide content in wood and bark with the density of soil contamination ^{137}Cs and the distance to the place of its release have been established. Despite the high levels of contamination of the area, the Belarusian hygienic standard for harvesting round timber for the construction of walls of residential buildings and fuel wood corresponds to black alder wood in 7.7 % of ripe and overripe stands, for harvesting other round timber – in 26,9 %.

Keywords: black alder; wood; bark; radioactive contamination; ^{137}Cs ; exclusion zone; Chernobyl Nuclear Power Plant.

Введение

Формация черноольховых лесов (черноольшаников, ольсов) является третьей по распространенности в зоне отчуждения Чернобыльской АЭС (ЧАЭС), в границах которой расположен Полесский государственный радиационно-экологический заповедник. По материалам лесоустroительного проекта заповедника на 2021–2030 гг. на долю черноольшаников приходится 10,6 % покрытой лесом площади. Общий запас стволовой древесины в них составляет 2991 тыс. м³, или 14,0 % от запаса всех лесов. Спелые и перестойные насаждения данной породы занимают 33,1 % площади формации, приспевающие – 15,9 %.

Почти 95 % насаждений ольхи черной произрастает на почвах полугидроморфного и гидроморфного типов увлажнения [1]. В этих условиях подвижность ^{137}Cs возрастает, что способствует более интенсивному его накоплению растительностью, в том числе и древесиной, в сравнении с автоморфными ландшафтами, и со временем сопутствует постоянному росту коэффициентов перехода (K_n) данного радионуклида в древесные породы [2]. Несмотря на то что K_n ^{137}Cs в древесину черноольшаников на торфяно-болотных почвах достиг максимума в 1990 г. [3], со второй половины 1990-х гг. до 2019 г. прослеживалась тенденция медленного его роста в древесину [4]. По результатам исследований, проведенных, как правило, в небольшом количестве насаждений выявлено повышение K_n ^{137}Cs в древесину ольхи с увеличением влагообеспеченности почв и снижение – при росте их плодородия [4–6].

Неотъемлемой частью древесного ствола является кора, которая в 1,5–5,5 раза интенсивнее, чем древесина, депонирует ^{137}Cs [3–7]. На начало 2000-х гг. при среднем вкладе коры в общую массу неокоренного ствола ольхи черной 10,6 % ее средний долевого вклад в активность ^{137}Cs составлял 47,8 % [6]. Несмотря на то что поступление радионуклида в кору этой породы в последние 20–25 лет стабилизировалось [4], данный компонент ствола следует учитывать при оценке загрязнения планируемых к заготовке неокоренных лесоматериалов и топливной древесины.

Учитывая преобладание черноольшаников в заповедной зоне, выделенной на территории заповедника с поверхностным загрязнением почвы (ПЗ) ^{137}Cs более 40 Ки/км², увеличение K_n ^{137}Cs в растительность в условиях гидроморфных ландшафтов на фоне снижения его содержания в лесных биогеоценозах в связи с естественным распадом, разрозненность данных во времени, полученных на небольших объемах выборок, делают весьма актуальным современную оценку загрязнения этим радионуклидом компонентов стволов ольхи черной. На необходимость уточнения параметров накопления радионуклидов в деревьях, произрастающих на почвах избыточного увлажнения, указывается и в работе [8].

Цель настоящей работы заключается в оценке современного загрязнения ^{137}Cs древесины и коры ольхи черной в приспевающих, спелых и перестойных древостоях ближней зоны ЧАЭС.

Материалы и методы исследования

Объектами исследования являлись древесина и кора приспевающих, спелых и перестойных насаждений ольхи черной, произрастающих в условиях избыточного увлажнения почв в ближней зоне ЧАЭС, которая несколько выходит за границы 30-километрового радиуса вокруг нее. Критерии выбора объектов: тип леса и тип лесорастительных условий (ТЛУ) – по таксационному описанию и в натуре по [9]; возраст не менее 50 лет – по таксационному описанию; отсутствие признаков интенсивной деградации древостоя – по визуальной оценке.

Всего подобрано и исследовано 26 насаждений ольхи черной снытевого (ТЛУ – Д₃), крапивного (Д₄), папоротникового (С₄) и осокового (С₅) типов леса, локализованных в заповедной зоне. В насаждениях заложены временные пробные площадки (ВПП) в соответствии с ТКП 498-2013 (02080) «Радиационный мониторинг лесного фонда. Закладка постоянного пункта наблюдения. Порядок проведения» и с требованиями [10]. Их лесоводственно-таксационная характеристика подробно описана в работе [11]. Это чистые или с небольшой примесью березы, осины, дуба, реже других пород, 50–80-летние древостои Iа–III классов бонитета, средняя полнота которых по типам леса приближается к 1,0, а в ольсе крапивном составляет 1,2. Запасы стволовой древесины в них близки или выше запасов нормальных насаждений. Варьирование таксационных показателей древостоев обусловлено их возрастными различиями, условиями местопроизрастания, в меньшей степени причинами эндогенного характера.

На каждой ВПП производили отбор образцов почвы в 12 контрольных точках, отбор проб древесины и коры в соответствии с ТКП 499-2013 (02080) «Радиационный мониторинг лесного фонда. Обследование постоянного пункта наблюдения. Порядок проведения» и работой [12]. Аналогичным образом отбирали древесину у деревьев I–V классов, по Крафту, отдельно по каждому классу в 9 насаждениях исследуемых типов леса. В этих же насаждениях отбирали пробы древесины валежника (без коры) с лежащих деревьев путем пропила ствола переносной цепной пилой до центра на расстоянии 1,3 м от корневых лап руководствуясь ТКП 239-2010 (02080) «Радиационный контроль. Обследование лесосек. Порядок проведения». На 9 ВПП трех типов леса керны древесины, отобранные у деревьев I–III классов, по Крафту, делили на три равные части – центральную, среднюю и периферийную.

Подготовку проб выполняли в соответствии с ТКП 251-2010 (02080) «Радиационный контроль. Отбор и подготовка проб лесной продукции. Порядок проведения». Удельную активность (A_y) ^{137}Cs в почве, древесине и коре определяли в лаборатории спектрометрии и радиохимии заповедника (аттестат аккредитации № ВУ/112 2.2203 от 30.01.2002 г.) на сцинтилляционном гамма-бета-спектрометре МКС-АТ1315 (Беларусь) в соответствии с МВИ.МН 1181-2011 «Методика выполнения измерений объемной и удельной активности ^{90}Sr , ^{137}Cs и ^{40}K на гамма-бета-спектрометре типа МКС-АТ1315, объемной и удельной активности гамма-излучающих радионуклидов ^{137}Cs и ^{40}K на гамма-спектрометре типа ЕЛ 1309 (МКГ-1309) в пищевых продуктах, питьевой воде, почве, сельскохозяйственном сырье и кормах, продукции лесного хозяйства, других объектах окружающей среды».

Учитывая тесную зависимость содержания ^{137}Cs в компонентах древесных растений от уровня поверхностного загрязнения им почв [2, 3, 6 и др.], при расчетах и анализе показателей загрязнения древесины и коры ольхи черной этим радионуклидом использовался показатель ПЗ ^{137}Cs в насаждениях данной лесной породы.

Черноольховые леса ближней зоны ЧАЭС характеризуются преимущественно высокими уровнями ПЗ ^{137}Cs и высокой пестротой радиоактивных выпадений [13], которая обеспечила широкий разброс значений этого показателя по объектам исследований (174–5617 кБк/м²). По данным измерений, средняя арифметическая (средняя) величина ПЗ ^{137}Cs во всей совокупности исследованных насаждений (условно формации) составляла 1111 ± 292 кБк/м² при очень высоком коэффициенте вариации (134,1 %) и доверительном интервале 509–1713 кБк/м² (здесь и далее по тексту на 95 % уровне значимости). Это в 2,8 раза выше среднего срединного значения (медианы) ПЗ ^{137}Cs (398 кБк/м²).

Средние величины ПЗ ^{137}Cs по типам леса (табл. 1) характеризуются очень высокими коэффициентами вариации и широкими доверительными интервалами, выходящими за рамки выборок, что обусловлено большим разбросом частных значений данного показателя по насаждениям и малыми объемами выборок. Однако эти показатели неточны и не в полной мере характеризуют генеральную совокупность. Более значимы здесь медианные величины, которые по типам черноольховых лесов в 1,4–3,3 раза ниже средних.

Разница между средними величинами ПЗ ^{137}Cs в ольсах снытевом, папоротниковом и осоковом не большая (10–24 %) и недостоверная на 95 %-ном уровне значимости. В ольсе крапивном ПЗ данным радионуклидом почти наполовину меньше из-за малочисленности выборки и случайно низких его величин по насаждениям. Первые три типа леса характеризуются относительной однородностью средних значений ПЗ ^{137}Cs и, представляя экологический ряд повышения гидроморфизма почв (от влажных

до сырых и мокрых), являются модельными. Однако тот факт, что медианные величины ПЗ ^{137}Cs относительно близки между собой в ольсах крапивном, папоротниковом и осоковом (в ольсе снытевом они в 1,5–1,7 раза выше), дает основание использовать все типы леса при сравнительном анализе.

Таблица 1

Характеристика поверхностного загрязнения почв ^{137}Cs , кБк/м²

Table 1

Characteristics of surface soil contamination ^{137}Cs , kBq/m²

Статистический показатель	Ольс снытевый	Ольс крапивный	Ольс папоротниковый	Ольс осоковый
<i>n</i>	7	3	9	7
<i>Min–max</i>	250–3293	333–1033	174–5556	232–5617
<i>M±m</i>	1200 ± 427	596 ± 220	1056 ± 575	1314 ± 732
<i>Cv</i>	94,2	64,0	163,5	147,4
<i>Ci</i>	155–2246	–352–1544	–271–2382	–478–3106
<i>Me</i>	656	421	375	401

Примечание. *n* – количество насаждений, шт., *M* – среднеарифметическое значение, *±m* – стандартная ошибка среднего значения, *Cv* – коэффициент вариации, %, *Ci* – доверительный интервал на 95 % уровне значимости, *Me* – среднее срединное значение, медиана.

Обработка материалов выполнялась при помощи стандартных пакетов прикладных программ *Microsoft Excel*. В камеральных условиях рассчитывали K_n ^{137}Cs из почвы в компоненты ольхи черной как частное от их A_y (Бк/кг) к ПЗ (кБк/м²). Оценку достоверности различий (*t*) для двух сравниваемых малых выборок (*n* < 20) определяли по формуле и сопоставляли полученные величины с табличными значениями *t*-критерия Стьюдента:

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

где σ – стандартное отклонение.

Результаты исследования и их обсуждение

Установлено, что A_y ^{137}Cs в древесине ольхи черной по отдельным насаждениям изменяется в очень широком диапазоне (96–9031 Бк/кг). Ее средняя величина по формации составляет 2160 ± 413 Бк/кг при коэффициенте вариации 97,6 % и в 1,3 раза превышает медиану (1667 Бк/кг). Достаточно широко в пределах формации изменяются и K_n ^{137}Cs в древесину ($(0,1-8,1) \times 10^{-3}$ м²/кг), составляя в среднем $(3,56 \pm 0,51) \times 10^{-3}$ м²/кг при доверительном интервале $(2,52-4,60) \times 10^{-3}$ м²/кг и вариабельности 72,5 %. Среднее медианное значение данного показателя в ольсах $(3,80 \times 10^{-3}$ м²/кг) несущественно выше.

Частные величины A_y и K_n ^{137}Cs в древесине ольхи черной очень широко варьируют в пределах типов леса. Средние значения этих показателей имеют очень высокие коэффициенты вариации, а также очень широкие доверительные интервалы, выходящие за границы выборок в некоторых типах леса (табл. 2), указывающие на неточность средних величин отдельных показателей.

Медианные значения A_y ^{137}Cs в древесине исследуемой породы модельных типов леса ниже среднеарифметических на 9–41 %, в ольсе крапивном – в 2,7 раза. Медианы K_n ^{137}Cs в данный компонент деревьев отклоняются от них разносторонне и менее значимо (–8,9–12,9 %), кроме ольса крапивного (в 2,3 раза меньше).

В модельных типах леса средние и медианные значения A_y и K_n ^{137}Cs в древесине ольхи черной возрастают в ряду типов леса (ольс снытевый < ольс папоротниковый < ольс осоковый) и в ряду ТЛУ ($D_3 < C_4 < C_5$), представляющих ряд повышения индекса влажности эдафотопов. Данная тенденция

отмечалась нами и ранее [4; 14]. На закономерный рост накопления радионуклида с увеличением влагообеспеченности почв от свежих до мокрых гигротопов указывается в работах [3; 5; 6; 15].

Выявлены достоверные различия средних величин A_y ^{137}Cs в древесине исследуемой древесной породы на 95 %-ном уровне значимости между ольсами снытевым, крапивным и осоковым (табл. 3). Отсутствие достоверной разницы данного показателя между ними и ольсом папоротниковым обусловлено, вероятно, чрезвычайно высоким разбросом значений A_y радионуклида по отдельным насаждениям и большой ошибкой среднего значения. По K_n ^{137}Cs в древесину достоверно различаются между собой только ольсы крапивный и осоковый, характеризующиеся минимальной и максимальной величинами анализируемого показателя соответственно.

Таблица 2

Статистические показатели средних величин удельной активности и коэффициентов перехода ^{137}Cs в древесине ольхи черной

Table 2

Statistical indicators of average values of specific activity and transition coefficient ^{137}Cs in black alder wood

Статистический показатель	Ольс снытевый	Ольс крапивный	Ольс папоротниковый	Ольс осоковый
A_y , Бк/кг				
<i>Min–max</i>	583–2485	96–732	568–9031	1728–6947
<i>M±m</i>	1516 ± 281	315 ± 209	2205 ± 876	3535 ± 785
<i>Cv, %</i>	49,1	114,9	119,2	58,7
<i>Ci</i>	828–2204	–584–1213	184–4226	1615–5455
<i>Me</i>	1391	116	1564	2879
K_n , $n \times 10^{-3}$ м ² /кг				
<i>Min–max</i>	0,3–6,3	0,1–1,7	0,4–7,6	1,0–8,1
<i>M±m</i>	2,94 ± 0,97	0,70 ± 0,50	3,72 ± 0,80	5,19 ± 0,89
<i>Cv, %</i>	87,1	124,5	64,2	45,7
<i>Ci</i>	0,57–5,31	–1,47–2,87	1,89–5,56	3,00–7,38
<i>Me</i>	2,70	0,30	4,20	5,50

Таблица 3

Достоверность различий удельной активности (числитель)
и коэффициента перехода (знаменатель) ^{137}Cs в древесину ольхи черной между типами леса

Table 3

Reliability of differences in specific activity (numerator)
and transition coefficient (denominator) ^{137}Cs in black alder wood between forest types

Тип леса	Ольс снытевый	Ольс крапивный	Ольс папоротниковый
Ольс крапивный	2,383* / 1,323	–	–
Ольс папоротниковый	0,629 / 0,587	1,133 / 1,995	–
Ольс осоковый	2,343* / 1,580	2,387* / 2,854*	1,027 / 1,446

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

Анализ наших данных (табл. 2) и других исследований (табл. 4) показал, что $K_n^{137}\text{Cs}$ в древесину ольхи черной на протяжении 25 лет различались по типам леса и ТЛУ и неоднозначно изменялись во времени. В ольсе снытевом (D_3) они увеличились, в крапивном (D_4) – уменьшились, в ольсах папоротниковом (C_4) и осоковом (C_5) – достигли максимальных в начале нынешнего столетия, затем существенно снизились к 2010 г. На протяжении последних 10 лет они остаются относительно стабильными при тенденции небольшого роста.

В пределах каждого класса роста и развития деревьев, по Крафту (класса Крафта), отдельные величины $A_y^{137}\text{Cs}$ в древесине ольхи черной очень широко изменяются по насаждениям (табл. 5). Средние значения данного показателя I–IV классов Крафта близки между собой и только в деревьях III класса их величина несколько повышена. В сухостойных деревьях (V класс Крафта) в сравнении с сырорастищими A_y радионуклид возрастает на 25,4–50,6 %, в валежнике – на 34,8–61,8 %. Доверительные интервалы средних величин находятся в границах выборок, а коэффициенты вариации достаточно однородны и располагаются в узком (79–96 %) диапазоне значений. Медианные величины $A_y^{137}\text{Cs}$ в исследуемом компоненте стволов в большинстве классов Крафта и в валежнике на 22,7–42,0 % ниже средних и изменяются синхронно с ними. В древесине деревьев III класса Крафта медиана $A_y^{137}\text{Cs}$ повышена до уровня средней величины.

Таблица 4

Коэффициенты перехода ^{137}Cs в древесину и кору ольхи черной по данным разных авторов, $n \cdot 10^{-3} \text{ м}^2/\text{кг}$

Table 4

Coefficients of ^{137}Cs transition to wood and bark of black alder according to different authors, $n \cdot 10^{-3} \text{ м}^2/\text{кг}$

Год или период, источник	Тип леса	ТУМ	Древесина	Кора
1987–1995, [2]	–	–	0,5–2,7	9,2–37,3
1994–1997, [5]	–	C_3	1,27	3,85
	–	B_4	2,72	7,98
	–	B_3	1,35	7,55
1987–2005, [6]	–	C_4	$2,39 \pm 0,27$	–
	–	C_5	$1,83 \pm 0,21$	–
	–	D_3	$0,86 \pm 0,09$	–
	–	D_4	$1,92 \pm 0,20$	–
2001–2005, [15]	–	C_3	$2,43 \pm 0,42$	–
	–	C_4	$7,33 \pm 0,37$	–
	–	C_5	$6,86 \pm 0,49$	–
2010, [7]	Ольс папоротниковый	C_4	1,47–1,85	3,50–4,13
	Ольс осоковый	C_5	2,54–2,82	5,45–5,99
2012, [16]	Ольс папоротниковый	C_4	2,84–3,04	3,70–4,66
	Ольс осоковый	C_5	2,81–3,42	4,89–5,50
2019, [4]	Ольс снытевый	D_3	2,7	3,5
	Ольс папоротниковый	C_4	4,5	7,3
	Ольс осоковый	C_5	5,5	7,4

Таблица 5

Статистические показатели средних величин удельной активности ^{137}Cs в древесине ольхи черной по классам роста и развития деревьев, по Крафту, и в валежнике (n=9)

Table 5

Statistical indicators of the average values of the ^{137}Cs specific activity in black alder wood by classes of growth and development of trees by Craft and in dead wood (n=9)

Статистический показатель	Класс роста и развития деревьев, по Крафту					Валежник
	I	II	III	IV	V	
<i>Min–max</i>	68–2776	69–3083	73–3193	63–2902	128–3862	43–5809
<i>M±m</i>	1236 ± 367	1183 ± 350	1387 ± 367	1155 ± 352	1739 ± 480	1869 ± 646
<i>Cv, %</i>	88,9	88,9	79,4	91,4	82,7	103,7
<i>Ci</i>	391–2081	375–1991	540–2233	344–1966	633–2845	380–3358
<i>Me</i>	959	833	1398	829	1359	1523

Установлены корреляционные связи между индексами классов Крафта и средними ($r = 0,64$), а также медианными ($r = 0,45$) величинами A_y ^{137}Cs в древесине деревьев ольхи черной по этим классам, которые из-за высоких ошибок средних величин недостоверны на 95 %-ном уровне значимости. Положительная направленность связей обеспечена более высоким загрязнением древесины сухостойных деревьев.

Возможной причиной повышенной A_y ^{137}Cs в древесине сухостоя ольхи черной является то, что в них с момента усыхания происходит преимущественно радиоактивный распад ^{137}Cs , в то время как в растущих деревьях, помимо этого процесса, со временем снижается корневое поступление радионуклида, его концентрация перераспределяется в пределах деревьев [4; 5; 17], разбавляется по мере увеличения объемов стволов [3; 18], некоторая его часть выносится с опадом. Высокая A_y ^{137}Cs в отпавших деревьях обеспечена, вероятно, более ранним прекращением в них физиологических процессов, после чего уменьшение радионуклида определяется преимущественно естественным распадом.

Распределение средних величин A_y ^{137}Cs в древесине ольхи черной по классам Крафта в разных типах леса неодинаково. Они близки в деревьях большинства классов модельных типов леса. При этом на полугидроморфных почвах (ольс снытевый) содержание радионуклида в деревьях IV класса Крафта значительно ниже. В то же время на гидроморфных почвах (ольсы папоротниковый и осоковый) A_y ^{137}Cs несколько меньше в деревьях II класса, но существенно возрастает в сухостое [14]. Отметим, что в древесине сосны на автоморфных почвах снижение A_y ^{137}Cs в деревьях с I по V класс Крафта связывается с ухудшением условий произрастания для каждого низшего класса и с уменьшением их размеров [3].

Отсутствие закономерности в распределении A_y ^{137}Cs в древесине ольхи черной по классам Крафта может быть объяснено повышенным гидроморфизмом почв и поведением в них радионуклида, физиологическими особенностями породы, то есть видоспецифичностью поступления и перераспределения его в стволе, недостаточным объемом выборки.

По радиальному профилю ствола наиболее высокая A_y ^{137}Cs в древесине сосны и березы наблюдается в крайних годовичных кольцах, затем она резко снижается и несколько возрастает в центре [2; 17]. Ольха черная является безъядровой породой. На радиальное загрязнение ее древесины радионуклидами влияет состоящая из живых клеток радиально-лучевая система тканей ствола [2].

Уровни A_y ^{137}Cs в древесине разных частей радиального профиля ствола ольхи черной в ближней зоне ЧАЭС изменяются в весьма широком диапазоне. Превышение максимальных значений над минимальными составляет от 6,8 до 11,3 раза. Средние величины по всем частям профиля расположены в границах выборок, а коэффициенты их вариации стабильны и относительно невысоки для данного рода исследований. В целом для формации характерно снижение средних и медианных зна-

чений A_y ^{137}Cs в древесине этой породы от периферии ствола к его середине и некоторое повышение в центральной части (табл. 6).

Таблица 6

Статистические показатели средних величин удельной активности ^{137}Cs в древесине ольхи черной по радиальному профилю ствола, Бк/кг ($n=9$)

Table 6

Statistical indicators of the average values of the specific activity ^{137}Cs in black alder wood along the radial profile of the trunk, Bq/kg ($n=9$)

Статистический показатель	Радиальное расположение древесины		
	периферийная	средняя	центральная
<i>Min-max</i>	794–7449	806–5449	639–7209
<i>M±m</i>	3221 ± 896	2713 ± 641	3022 ± 839
<i>Cv, %</i>	83,5	70,8	83,2
<i>Ci</i>	1155–5287	1236–4190	1088–4957
<i>Me</i>	2037	1781	1840

Определенные различия в распределении A_y ^{137}Cs по радиальному профилю ствола ольхи черной наблюдаются в типологическом аспекте. Указанная выше тенденция прослеживается на гидроморфных почвах в черноольшаниках папоротниковом и осоковом. В черноольшанике снытевом (полугидроморфные почвы) средние величины A_y ^{137}Cs в древесине периферийной и средней частей радиального профиля ствола близки, в центральной части содержание радионуклида несущественно снижается [14].

Размах вариации A_y ^{137}Cs в коре ольхи черной по насаждениям составляет 439–15404 Бк/кг. Ее средняя величина по формации (2754 ± 662 Бк/кг) и коэффициент вариации (122,5 %) превышают таковые в древесине на 27,5 и 25,5 % соответственно; доверительный интервал (1624–3884 Бк/кг) находится в границах выборки. Медианное значение A_y ^{137}Cs в коре по формации (1638 Бк/кг) в 1,7 раза ниже среднего.

В диапазоне $(1,0-8,6) \times 10^{-3}$ м²/кг изменяются по насаждениям K_n ^{137}Cs в кору данной породы, составляя в среднем $(3,35 \pm 0,40) \times 10^{-3}$ м²/кг при относительно невысоком коэффициенте вариации (60,7 %). Доверительный интервал (2,67–4,03 м²/кг) расположен в пределах выборки. Медиана K_n ^{137}Cs в кору всего на 17,5 % ниже средней величины.

В целом по формации средняя величина A_y ^{137}Cs в коре на 27,5 % выше, чем в древесине, медианные их значения близки, но переход его в древесину происходит интенсивнее на 6,3 % по средней величине и на 33,3 % по медиане.

В пределах типов леса размах значений A_y ^{137}Cs в коре ольхи черной чрезвычайно высок (табл. 7). В ольсах снытевом, папоротниковом и осоковом средние величины данного показателя близки между собой (2931–3051 Бк/кг) и в среднем в 3,5 раза превышают величину A_y ^{137}Cs в коре ольхи черноольшаника крапивного. Коэффициенты их вариации очень высоки при разнице между отдельными типами леса до 2,2 раза. Но средние величины неверны, так как доверительные интервалы выходят за границы выборок. Медианы A_y ^{137}Cs в коре ольхи черной меньше средних величин в 1,3–2,2 раза. По типам леса они снижаются в ряду ольс снытевый > ольс осоковый > ольс папоротниковый > ольс крапивный.

В модельных типах леса K_n ^{137}Cs в кору ольхи черной варьируют достаточно широко. В ольсах снытевом и осоковом средние величины данного показателя близки. В ольсе папоротниковом она максимальна, в крапивном – минимальна. Коэффициенты их вариации не слишком высоки для радиоэкологических исследований, но доверительные интервалы в двух типах леса выходят за границы выборок. Медианы K_n ^{137}Cs в кору этой породы существенно различаются между типами леса, приуроченными к полугидроморфным и гидроморфным почвам.

На протяжении последних десяти лет K_n ^{137}Cs в кору в ольсе папоротниковом практически не изменились, а в ольсе осоковом – снизились в 1,5–1,7 раза (см. табл. 4, 7).

Сравнение соотношения медианных значений показателей загрязнения компонентов ствола ольхи черной (табл. 7) указывает на более интенсивное накопление ^{137}Cs в древесине ольсов снытевых и крапивных (трофотоп Д) и в коре ольсов папоротниковых и снытевых (трофотоп С).

Таблица 7

Статистические показатели средних величин удельной активности и коэффициентов перехода ^{137}Cs в коре ольхи черной

Table 7

Statistical indicators of average values of specific activity and transition coefficient ^{137}Cs in the bark of black alder

Статистический показатель	Ольс снытевый	Ольс крапивный	Ольс папоротниковый	Ольс осоковый
A_y , Бк/кг				
<i>Min–max</i>	1237–7191	439–1590	663–15404	871–10553
<i>M±m</i>	2931 ± 776	865 ± 364	3016 ± 1564	3051 ± 1292
<i>Cv</i> , %	70,1	72,9	155,5	112,1
<i>Ci</i>	1032–4830	–702–2433	–590–6622	–111–6213
Me	2322	567	1367	1740
A_y ^{137}Cs кора/ A_y ^{137}Cs древесина (Me)	1,67	4,89	0,87	0,60
K_n , $\text{n}\times 10^{-3}$ м ² /кг				
<i>Min–max</i>	1,7–5,7	1,3–1,5	1,0–8,6	1,7–7,4
<i>M±m</i>	3,40 ± 0,58	1,37 ± 0,07	3,92 ± 0,84	3,41 ± 0,75
<i>Cv</i> , %	44,9	8,4	64,3	58,1
<i>Ci</i>	1,99–4,81	1,08–1,65	1,98–5,86	1,58–5,25
Me	3,50	1,30	2,90	2,80
K_n ^{137}Cs кора/ K_n ^{137}Cs древесина (Me)	1,30	4,30	0,69	0,51

Общеизвестные прямые корреляционные связи показателей загрязнения компонентов древесных пород ^{137}Cs с плотностью поверхностного загрязнения им почвы [2, 3, 5, 6, 18, и др.] подтверждены и для ольхи черной. Установлены высокосignимые, по Чеддоку, ($p < 0,001$) коэффициенты корреляции Спирмена ПЗ ^{137}Cs с A_y ^{137}Cs в коре ($r = 0,65$), с K_n ^{137}Cs в кору ($r = -0,64$) и с K_n ^{137}Cs в древесину ($r = -0,62$). Также выявлены корреляции различной силы между расстоянием объектов исследований от места выброса радионуклидов с ПЗ ^{137}Cs ($r = 0,77$; $p < 0,001$), с A_y ^{137}Cs в коре ($r = -0,45$; $p < 0,05$), с K_n ^{137}Cs в кору ($r = 0,60$; $p < 0,01$) и с K_n ^{137}Cs в древесину ($r = 0,70$; $p < 0,001$). Очевидно, что по мере удаления от ЧАЭС снижается поверхностное загрязнение почвы ^{137}Cs и удельная активность радионуклида в коре, но повышаются коэффициенты перехода его в древесину и кору. На пониженные K_n ^{137}Cs в древесину и кору разных пород деревьев, в том числе и ольхи черной, в насаждениях, произрастающих в южной (ближней) зоне радиоактивного загрязнения заповедника в сравнении с северной, расположенной за пределами 30-километрового радиуса от ЧАЭС, указывается в работе [7]. Высокосignимые корреляционные связи наблюдаются между A_y ^{137}Cs в коре и древесине ($r = 0,51$; $p < 0,01$) и между K_n ^{137}Cs в кору и древесину ($r = 0,77$; $p < 0,001$). При этом следует отметить отсутствие зависимостей A_y ^{137}Cs в древесине с ПЗ ^{137}Cs и с расстоянием до ЧАЭС.

На основе средних вкладов древесины и коры в общую массу неокоренного ствола ольхи черной [6] и A_y ^{137}Cs в этих компонентах (табл. 2, 7) рассчитаны средние значения данного показателя радионуклида в неокоренных стволах этой породы на каждой ВПП.

Для сравнения полученных данных с гигиеническим нормативом ГН 2.6.1.10-1-01-2001 «Республиканские допустимые уровни содержания цезия-137 в древесине, продукции из древесины и древесных материалов и прочей непищевой продукции лесного хозяйства (РДУ/ЛХ-2001)» рассчитали A_y ^{137}Cs в дре-

весине, коре и неокоренных стволах ольхи черной путем суммирования A_y ^{137}Cs в каждом насаждении с погрешностями их измерений.

Установлено, что в ближней зоне ЧАЭС нормативу 740 Бк/кг на «Лесоматериалы круглые для строительства стен жилых зданий, топливо древесное» (РДУ/ЛХ-2001) соответствует окоренная древесина в 15,4 % насаждений, неокоренная – в 7,7 %, а нормативу 1480 Бк/кг на «Лесоматериалы круглые прочие, древесное технологическое сырье» – окоренная древесина в 34,6 % насаждений, неокоренная – в 26,9 %.

Заключение

Через 34 года после выброса радиоактивных веществ в ближней зоне ЧАЭС (заповедная зона Полесского заповедника) в условиях высокого и неоднородного загрязнения почв ^{137}Cs (ПЗ до $5,6 \times 10^3$ кБк/м²) в высоковозрастных насаждениях четырех наиболее распространенных типов леса черноольховой формации A_y ^{137}Cs в древесине ольхи черной варьирует в пределах 0,1–9,0 кБк/кг, составляя в среднем 2,16 кБк/кг, K_n ^{137}Cs в нее – $(0,1–8,1) \times 10^{-3}$ ($3,56 \times 10^{-3}$) м²/кг. Загрязнение данного компонента ствола ^{137}Cs возрастает с повышением гидроморфизма почв.

Закономерного распределения A_y ^{137}Cs в древесине ольхи черной по классам роста и развития деревьев, по Крафту, не выявлено. Уровни загрязнения радионуклидом живых деревьев разных классов близки. В сухостойных деревьях и, особенно, в валежнике они значительно повышены.

В поперечном профиле ствола ольхи черной A_y ^{137}Cs в древесине снижается от периферии к середине и повышается в центральной его части. Распределения этого показателя по деревьям разных классов Крафта и по радиальному профилю ствола различаются между черноольшаниками, произрастающими на почвах полугидроморфного и гидроморфного типов увлажнения.

В коре ольхи черной A_y ^{137}Cs в изменяется в диапазоне 0,4–15,4 кБк/кг и составляет в среднем 2,75 кБк/кг, K_n ^{137}Cs в кору – $(1,0–8,6) \times 10^{-3}$ м²/кг при среднем значении $3,35 \times 10^{-3}$ м²/кг. В целом по ольсам A_y ^{137}Cs выше в коре, K_n ^{137}Cs – в древесине. На полугидроморфных почвах кора характеризуется более высокими показателями загрязнения в сравнении с гидроморфными. В древесине ^{137}Cs интенсивнее накапливается в ольсах снытевых и крапивных, в коре – в ольсах папоротниковых и снытевых.

Наблюдаются значимые корреляционные связи показателей загрязнения древесины и коры ольхи черной ^{137}Cs (кроме A_y ^{137}Cs в древесине) с ПЗ ^{137}Cs и расстоянием до ЧАЭС.

В ближней зоне ЧАЭС по состоянию на 2020 г. появилась небольшая доля спелых и перестойных насаждений ольхи черной, в которых радиоактивное загрязнение ее древесины ^{137}Cs соответствует республиканским нормативам РДУ/ЛХ-2001.

Библиографические ссылки

1. Гарбарук ДК, Углынец АВ. Структура черноольховых лесов Полесского государственного радиационно-экологического заповедника. *Особо охраняемые природные территории Беларуси. Исследования*. 2017;12:32–49.
2. Щеглов АИ. Биогеохимия техногенных радионуклидов в лесных экосистемах: по материалам 10-летних исследований в зоне влияния аварии на ЧАЭС. Москва: Наука; 2000.
3. Ипатьев ВА, Багинский ВФ, Булавик ИМ. Лес. Человек. Чернобыль. Лесные экосистемы после аварии на Чернобыльской АЭС: состояние, прогноз, реакция населения, пути реабилитации. Гомель: Речицкая укрупненная типография; 1999.
4. 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.
5. Булавик ИМ, Переволоцкий АН, Гайдуль АЗ. Влияние различных факторов на накопление ^{137}Cs древесными растениями. В: *10 лет Полесскому государственному радиационно-экологическому заповеднику*. Гомель: [б. и.]; 1998. с. 59–70.
6. Переволоцкий АН. Распределение ^{137}Cs и ^{90}Sr в лесных биогеоценозах. Гомель: Институт радиологии; 2006.
7. Бондарь ЮИ, Матусов ГД, Булавик ИМ. Особенности перехода ^{137}Cs и ^{90}Sr в древесину и кору сосновых и лиственных насаждений в северной и южной частях заповедника. В: *Экосистемы и радиация: аспекты существования и развития*. Минск: Институт природоведения НАН Беларуси; 2013. с. 156–164.
8. Ипатьев ВА. О реабилитации мелiorированных техногенно загрязненных лесных экосистем. Минск: Белорусская наука; 2007.
9. Юркевич ИД. Выделение типов леса при лесоустроительных работах. Минск: Наука и техника; 1980.
10. Мирошников ВС, Труль ОА, Ермаков ВЕ. Справочник таксатора. Минск: Ураджай; 1980.
11. Углынец АВ, Гарбарук ДК, Шумак СВ. Продуктивность высоковозрастных насаждений ольхи черной в заповедной зоне Полесского государственного радиационно-экологического заповедника. *Проблемы лесоведения и лесоводства*. 2021;81:83–90.
12. Забродский ВН, Углынец АВ, Калинин ВН. Влияние типа леса и типа лесорастительных условий на переход ^{137}Cs и ^{90}Sr в древесину сосны в зоне отчуждения ЧАЭС по данным радиационного обследования лесосек. В: *Современные проблемы радиобиологии – 2021*. Минск: ИВЦ Минфина; 2021. с. 68–72.
13. Израэль ЮА, Богдевич ИМ, Аверин ВС. 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.
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*. Обнинск: НИИ радиологии и агроэкологии; 2021. с. 56–58.

15. Переволоцкий АН, Булавик ИМ, Переволоцкая ТВ. Влияние типов условий местопроизрастания на уровень накопления ^{137}Cs в древесине основных лесобразующих пород Полесского государственного радиационно-экологического заповедника. В: *20 лет после чернобыльской катастрофы*. Гомель: [б. и.]; 2006. с. 105–111.
16. Воронетская АН, Матусов ГД. Накопление радионуклидов структурными компонентами лесных фитоценозов. В: *Экосистемы и радиация: аспекты существования и развития*. Гомель: [б. и.]; 2013. с. 164–171.
17. Fesenko SV, Soukhova NV, Sanzharova NI, et al. Identification of processes governing long-term accumulation of ^{137}Cs by forest trees following the Chernobyl accident. *Radiation and Environmental Biophysics*. 2001;40:105–113.
18. Гарбарук ДК, Углынец АВ, Кудин МВ. Изменение радиационной обстановки в сосняках мшистых в зоне отчуждения Чернобыльской АЭС. *Радиационная биология. Радиоэкология*. 2021;61(5):524–535. DOI: 10.31857/S0869803121050064.

References

1. Garbaruk DK, Uglyanets AV. The structure of black alder forests in Polesye state radiation-ecological reserve. *Osobo okhranyayemye prirodnye territorii Belarusi. Issledovaniya*. 2017;12:32–49. Russian.
2. 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. Russian.
3. Ipat'ev VA, Baginskii VF, Bulavik IM. *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. Russian.
4. 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.
5. Bulavik IM, Perevolotskii AN, Gaidul' AZ. Influence of various factors on the accumulation of ^{137}Cs by woody plants. In: *10 let Polesskomu gosudarstvennomu radiatsionno-ekologicheskemu zapovedniku*. Gomel: [publisher unknown]; 1998. p. 59–70. Russian.
6. Perevolotskii AN. *Raspreделение ^{137}Cs i ^{90}Sr v lesnykh biogeotsenozakh* [Distribution ^{137}Cs and ^{90}Sr in forest biogeocenoses]. Gomel: Institut radiologii; 2006. Russian.
7. Bondar' YuI, Matusov GD, Bulavik IM. Features of the transition of ^{137}Cs and ^{90}Sr into wood and bark of pine and deciduous plantation in the northern and southern parts of the reserve. In: *Ekosistemy i radiatsiya: aspekty sushchestvovaniya i razvitiya*. Minsk: Institut prirodovedeniya NAN Belarusi; 2013. p. 156–164. Russian.
8. Ipat'ev VA. *O reabilitatsii meliorirovannykh tekhnogenno zagryaznennykh lesnykh ekosistem* [On the rehabilitation of reclaimed technogenically polluted forest ecosystems]. Minsk: Belorusskaya nauka; 2007. Russian.
9. Yurkevich ID. *Vydelenie tipov lesa pri lesoustroitel'nykh rabotakh* [Identification of forest types in forest managements operations]. Minsk: Nauka i tekhnika; 1980. Russian.
10. Miroshnikov VS, Trull' OA, Ermakov VE. *Spravochnik taksatora* [A guide for forest taxator]. Minsk: Uradzhai; 1980. Russian.
11. Uglyanets AV, Garbaruk DK, Shumak SV. *Produktivnost' vysokovozrastnykh nasazhdenii ol'khi chernoi v zapovednoi zone Polesskogo gosudarstvennogo radiatsionno-ekologicheskogo zapovednika* [Productivity of high-age stands of black alder in the protected area of the Polesye Nature Reserve]. *Problemy lesovedeniya i lesovodstva*. 2021;81:83–90. Russian.
12. Zabrodskii VN, Uglyanets AV, Kalinin VN. *Vliyanie tipa lesa i tipa lesorastitel'nykh uslovii na perekhod ^{137}Cs i ^{90}Sr v drevesinu sosny v zone otchuzhdeniya ChAES po dannym radiatsionnogo obsledovaniya lesosek* [Influence of forest type of forest conditions on the transfer ^{137}Cs and ^{90}Sr to pine wood in the Chernobyl NPP exclusion zone according to the results of the radiation examination of cutting areas]. In: *Sovremennye problemy radiobiologii – 2021* [Contemporary issues of radiobiology – 2021]. Minsk: IVC Minfina; 2021. p. 68–72. Russian.
13. Izrael' YuA, Bogdevich IM, Averin VS. *Atlas sovremennykh i prognoznnykh aspektov posledstviy avarii na Chernobyl'skoi AES na postradavshikh territoriyakh Rossii i Belarusi (ASPA Rossiya–Belarus')* [Atlas of recent and predictable aspects of consequences of Chernobyl accident on polluted territories of Russia and Belarus (ARPA Russia–Belarus)]. Moscow: Fond «Infosfera»–NIA–Priroda; Minsk: Belkartografiya; 2009. Russian.
14. Garbaruk DK, Uglyanets AV, Voronetskaya AN. *Zagryaznenie ^{137}Cs drevesiny ol'khi chernoi v zapovednoi zone Polesskogo gosudarstvennogo radiatsionno-ekologicheskogo zapovednika Belarusi* [^{137}Cs contamination of black alder wood in the protected area of Polesye State Radiation-Ecological Reserve of Belarus]. 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: NII radiologii i agroekologii; 2021. p. 56–58. Russian.
15. Perevolotskii AN, Bulavik IM, Perevolotskaya TV. The influence of types of habitat conditions on the level ^{137}Cs accumulation in the wood of the main forest-forming species of the Polesye State Radiation-Ecological Reserve. In: *20 let posle chernobyl'skoi katastrofy*. Gomel: [publisher unknown]; 2006. p. 120–125. Russian.
16. Voronetskaya AN, Matusov GD. Accumulation of radionuclide's by structural components of forest phytocenoses. In: *Ekosistemy i radiatsiya: aspekty sushchestvovaniya i razvitiya*. Gomel: [publisher unknown]; 2013. p. 164–171. Russian.
17. Fesenko SV, Soukhova NV, Sanzharova NI, et al. Identification of processes governing long-term accumulation of ^{137}Cs by forest trees following the Chernobyl accident. *Radiation and Environmental Biophysics*. 2001;40:105–113.
18. Garbaruk DK, Uglyanets AV, Kudin MV. *Izmenenie radiatsionnoi obstanovki v sosnyakakh mshistyykh v zone otchuzhdeniya Chernobyl'skoi AES* [Changes in the radiation situation in the mossy pine forests of the Chernobyl NPP exclusion zone]. *Radiatsionnaya biologiya. Radioekologiya*. 2021;61(5):524–535. DOI: 10.31857/S0869803121050064. Russian.