

УДК 539.16.04:630*164.4(630*176.322.6)

ОЦЕНКА ЗАГРЯЗНЕНИЯ ДРЕВЕСИНЫ И КОРЫ ДУБА ^{137}Cs В ЗОНЕ ОТЧУЖДЕНИЯ ЧЕРНОБЫЛЬСКОЙ АТОМНОЙ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ

А. В. УГЛЯНЕЦ¹⁾, Д. К. ГАРБАРУК¹⁾

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

Приведены результаты изучения радиоактивного загрязнения ^{137}Cs стволов дуба черешчатого (*Quercus robur* L.) в высоковозрастных дубравах на наиболее загрязненной части территории Полесского государственного радиационно-экологического заповедника, расположенного в зоне эвакуации (отчуждения) Чернобыльской атомной электростанции. Установлены особенности современного поверхностного загрязнения почвы ^{137}Cs в лесных насаждениях дуба, выявлены обуславливающие их факторы: удаление объектов исследования от места выброса и условия осадения радиоактивных выпадений, а также вертикальное перераспределение радионуклида в почве за прошедшее после аварии время. Плотность загрязнения почв ^{137}Cs различается по типам леса дубрав. Определены современные показатели накопления ^{137}Cs в древесине, коре и неокоренных стволах дуба, их изменения по типам леса, связь с плотностью загрязнения почвы и расстоянием до места катастрофы. Установлено 2–3-кратное превышение загрязнения коры дуба ^{137}Cs в сравнении с древесиной, которое обусловлено их морфо-физиологическими особенностями. За последние 25 лет существенно изменились пропорции относительных вкладов древесины и коры в удельную активность ^{137}Cs ствола дуба. По причине замедления поступления радионуклида в кору, ее вклад в удельную активность ^{137}Cs в стволе значительно снизился. Показано распределение радионуклида в древесине дуба по классам роста и развития деревьев (по Крафту) и валежнике. Установлено, что средние значения удельной активности ^{137}Cs в сухостое и валежнике на 25–28 % ниже, чем в древесине живых деревьев. Подтверждена тенденция снижения концентрации радионуклида в древесине от периферии к центру ствола. По состоянию на 2021 г. при санитарном нормативе Республики Беларусь по содержанию ^{137}Cs в 1480 Бк/кг заготовка окоренной древесины дуба была допустима в 84 % обследованных древостоев, неокоренная – 72 %. Нормативу 740 Бк/кг соответствовала окоренная и неокоренная древесина в 32 % насаждений дуба.

Ключевые слова: Чернобыльская атомная электростанция; зона отчуждения; дуб черешчатый (*Quercus robur* L.); древесина; кора; ^{137}Cs ; удельная активность; коэффициент перехода.

ASSESSMENT OF OAK WOOD AND BARK CONTAMINATION BY ^{137}Cs IN THE EXCLUSION ZONE OF THE CHERNOBYL NUCLEAR POWER PLANT

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

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

The results of studying the ^{137}Cs contamination of English oak (*Quercus robur* L.) trunks in high-aged oak forests in the most radioactive polluted part of the Polesye State Radiation-Ecological Reserve territory located in the evacuation

Образец цитирования:

Углынец АВ, Гарбарук ДК. Оценка загрязнения древесины и коры дуба ^{137}Cs в зоне отчуждения Чернобыльской атомной электростанции. *Журнал Белорусского государственного университета. Экология*. 2022;4:33–45.
<https://doi.org/10.46646/2521-683X/2022-4-33-45>

For citation:

Uglyanets AV, Garbaruk DK. Assessment of oak wood and bark contamination by ^{137}Cs in the exclusion zone of the Chernobyl nuclear power plant. *Journal of the Belarusian State University. Ecology*. 2022;4:33–45. Russian.
<https://doi.org/10.46646/2521-683X/2022-4-33-45>

Авторы:

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

Authors:

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

(exclusion) zone of the Chernobyl nuclear power plant are presented. The features of modern surface contamination soil by ^{137}Cs in oak forest stands have been established, the factors that caused them have been identified: removal of research objects from the release site and conditions for deposition of radioactive fallout, as well as vertical redistribution of radionuclide in the soil over the time since the accident. The density of ^{137}Cs soil contamination varies by types of oak forest. The current indicators of ^{137}Cs accumulation in wood, bark and oak trunks, their changes by forest types, the relationship with the density of soil pollution and the distance to the disaster site are determined. A 2–3-fold excess of ^{137}Cs oak bark contamination was found in comparison with wood, which is due to their morpho-physiological characteristics. Over the past 25 years, the wood and bark proportions of the relative contributions to the specific activity of ^{137}Cs of the oak trunks have changed significantly. The decrease in the contribution of the bark to the specific activity of ^{137}Cs in the trunk is due to a slowdown in the entry of radionuclide into it. The ^{137}Cs distribution in oak wood by classes of growth and development of trees by Craft is shown. It was found that the average values of the radionuclide specific activity in standing and lying deadwood are 25–28 % lower than in the wood of living trees. The tendency of decreasing of ^{137}Cs concentration in oak wood from the periphery to the center of the trunk has been confirmed. As of 2021, according to the sanitary standard of the Republic of Belarus for the content of ^{137}Cs 1480 Bq kg⁻¹, harvesting of oak wood could be allowed in 84 % of the surveyed stands, oak trunks with bark – in 72 %. The standard of 740 Bq kg⁻¹ corresponded to oak wood in bark and without bark in 32 % of forest stands.

Keywords: Chernobyl Nuclear Power Plant; exclusion zone; oak (*Quercus robur* L.); wood; bark; ^{137}Cs ; specific activity; transition coefficient.

Введение

Преодоление последствий катастрофы на Чернобыльской АЭС (ЧАЭС) является целью реабилитации радиоактивно загрязненных территорий и вовлечение в хозяйственный оборот находящихся на них природных ресурсов, включая древесные. В зоне отчуждения (ЗО) ЧАЭС, в белорусском секторе, где расположен Полесский государственный радиационно-экологический заповедник (заповедник), радиационная обстановка очень напряженная [1; 2]. На части его территории площадью 149 тыс. га (68,7 % от общей площади заповедника) с уровнями плотности загрязнения почвы (ПЗ) ^{137}Cs выше 40 Ки/км² (1480 кБк/м²) заготовка древесины не осуществлялась с момента аварии. За 35 лет леса накопили значительные объемы древесины. Часть их, достигнув климаксовой стадии, начала деградировать.

Мозаичность выпадения радиоактивных веществ обеспечила значительные различия в загрязнении территории ЗО ЧАЭС [1]. С момента их осадения протекают процессы накопления и перераспределения радионуклидов между элементами биогеоценозов, а также очищения от них структурных частей деревьев. Из расчета 30-летнего эффективного периода полуснижения ^{137}Cs в древесине лиственных пород [3; 4] его активность в древесине дуба к настоящему времени должна сократиться более чем наполовину. В 2000-х гг. на участках заповедника с ПЗ ^{137}Cs 15–40 Ки/км² удельная активность (A_y) ^{137}Cs в ней составляла в среднем 855 Бк/кг, а ее очищение до нормативного уровня в 740 Бк/кг прогнозировалось к 2039 г. [5]. По более поздним данным [6], расчетное время снижения A_y ^{137}Cs в окоренной древесине дуба до этого уровня при ПЗ ^{137}Cs 6,6–17,5 Ки/км² определено 2021–2040 гг.

Дубравы в заповеднике, согласно материалам лесоустроительного проекта на 2021–2030 гг., занимают 7863 га (5,6 % лесопокрытой площади) с запасом древесины 1,26 млн м³. На территории, ограниченной изолинией ПЗ ^{137}Cs выше 40 Ки/км², находится 62,6 % площади дубовой формации и 60,3 % запаса ее древесины. При этом на спелые, перестойные и приспевающие насаждения приходится 23,3 % площади дубрав и 32,9 % (0,25 млн м³) их запаса.

В восточной части Белорусского Полесья дубравы подвержены деградации [7], которая в заповеднике усиливается высоким возрастом древостоев и отсутствием лесоводственных уходов [8]. В итоге теряется ценная древесина. Актуальным вопросом является возможность ее заготовки.

Из основных лесообразующих пород ЗО ЧАЭС накопление ^{137}Cs стволами деревьев дуба и их структурными частями (древесиной и корой) наименее изучено. Установлено [9; 10], что содержание радионуклида в них выше, чем у сосны и ели, но ниже, чем у осины, березы, ольхи черной. Древесина дуба, как правило, менее интенсивно аккумулирует ^{137}Cs в сравнении с древесиной других пород [11–13]. Но на влажных почвах по показателям загрязнения она превосходит сосну и мелколиственные породы [14]. В разных типах лесорастительных условий (ТЛУ) по величине коэффициента перехода (K_n) ^{137}Cs в древесину дуб может располагаться в любой части ранжированных рядов [12]. Его кора накапливает ^{137}Cs намного интенсивнее древесины [4; 6; 14; 15]. Приведенный анализ указывает на актуальность оценки содержания ^{137}Cs в древесине и коре дуба на территории с высокой ПЗ этим радионуклидом на современном этапе последствий радиационной катастрофы.

Цель исследования – оценить современные уровни загрязнения ^{137}Cs древесины, коры и неокоренных стволов дуба на части территории ЗО ЧАЭС с высокими уровнями загрязнения им почв и факторы, влияющие на его поступление.

Материалы и методы исследования

Объекты исследований – древесина и внешняя часть коры, или корки (далее – кора) дуба черешчатого (*Quercus robur* L.) в высоковозрастных насаждениях наиболее распространенных типов дубрав на территории 30 ЧАЭС с ПЗ ^{137}Cs свыше 40 Ки/км².

Для исследований выбрали по два типа леса в экологических группах условно плакорных и пойменных дубовых лесов [16]. Согласно материалам лесоустройства, на указанной выше территории среди плакорных преобладают дубравы кисличные – 1089 га, что составляет 48,0 % от типа леса по заповеднику и 22,1 % на территории с ПЗ ^{137}Cs свыше 40 Ки/км², и снытевые (740 га, 87,3 и 15,0 %). В экологической группе пойменных дубрав наиболее распространены насаждения приустьевно-пойменного (836 га, 98,1 и 17,0 %) и злаково-пойменного (515 га, 61,0 и 10,5 %) типов леса. Суммарно на них приходится 61,2 % от площади дубрав заповедника и 64,6 % площади территории с высокой ПЗ ^{137}Cs , что говорит о репрезентативности типологической выборки.

Для каждого из перечисленных выше типов леса в разных частях 30 выбрали в природе с уточнением типа леса и ТЛУ [17] по 5–8 насаждений возрастом старше 60 лет с преобладанием дуба в составе древостоев. В 2021 г. в них заложили 25 временных пробных площадей (ВПП) в соответствии с ТКП 498-2013 (02080) «Радиационный мониторинг лесного фонда. Закладка постоянного пункта наблюдения. Порядок проведения». Таксацию древостоев и расчет таксационных показателей на ВПП выполняли в соответствии с требованиями «Справочника таксатора» (Мирошников и др., 1980) с использованием «Таксационно-лесоустроительного справочника» (Кузьменков и др., 2019). Основные таксационные показатели верхних ярусов древостоев приведены в табл. 1.

Таблица 1

Таксационная характеристика древостоев дуба

Table 1

Taxational characteristics of oak stands

Временные пробные площади	Состав древостоя	Возраст, лет	Средние		Класс бонитета	Густота, шт./га		Сумма площадей сечений, м ² /га		Запас, м ³ /га	
			высота, м	диаметр, см		дуба	всево	дуба	всево	дуба	всево
Дубрава кисличная (Д ₂)											
3	10Д+Б	80	20,8	36,6	II	158	165	16,6	17,3	166	172
2	9Д1С+Б, Олч	100	22,5	50,7	III	94	124	18,5	20,4	195	213
1	10Д	110	22,1	39,1	III	204	204	24,5	24,5	256	256
4	9Д1Б+Ос	110	22,1	42,0	III	130	165	18,0	19,9	188	208
7	8Д1Олч1Б	115	24,3	58,9	III	56	220	15,3	21,4	175	225
5	10Д+Б, Ос	120	22,8	31,6	III	284	300	22,2	23,7	238	255
6	9Д1Ос+Кл	130	24,1	32,8	III	268	296	22,7	24,5	256	278
8	10Д+С	130	27,4	50,4	II	168	172	33,5	33,7	421	423
Дубрава снытевая (Д ₃)											
13	8Д2Кл	60	21,0	29,0	I	228	440	15,1	21,2	150	199
12	7Д1Олч1Кл1Ос	85	20,8	45,9	III	60	128	9,9	14,1	97	133
11	9Д1Олч+Б, Ос, Кл	100	22,7	54,9	III	66	353	15,6	18,3	167	191
10	9Д1Олч+С	110	20,8	46,2	III	79	131	13,3	16,1	132	155
15	5Д4Г1Ос+Кл, Олч	110	23,4	45,5	II	60	548	9,8	27,3	107	236
9	8Д2Кл+Олч	115	23,3	37,1	III	68	96	13,8	17,0	151	180
14	9Д1Олч+Лп, Ос, Кл	130	22,8	41,5	III	89	168	12,1	16,0	129	147
Дубрава злаково-пойменная (С _{2п} , С _{3п})											
20	7Д2Олч1Ос+Б	60	17,5	21,8	II	416	636	15,5	23,9	132	202
25	7Д3Б+Ос	70	19,2	23,5	II	378	630	16,3	26,1	152	227
23	8Д1Б1Ос+Олч	70	17,6	31,9	III	278	428	22,2	27,1	171	213
24	7Д3Олч+Ос	95	24,5	35,1	II	151	334	14,6	22,4	168	242
22	10Д+Ос	130	25,8	36,9	III	180	188	19,2	19,8	228	232

Временные пробные площади	Состав древостоя	Возраст, лет	Средние		Класс бонитета	Густота, шт./га		Сумма площадей сечений, м ² /га		Запас, м ³ /га	
			высота, м	диаметр, см		дуба	всего	дуба	всего	дуба	всего
			дуба								
Дубрава прируслово-пойменная (А _{2п} , В _{2п} , В _{3п})											
16	9Д1С	65	9,1	29,6	V	347	363	20,3	21,6	150	162
19	10Д+Гч, Гш	70	11,6	28,6	IV	200	227	15,0	15,4	122	125
18	9Д1Гч	70	14,5	32,5	IV	220	223	18,2	19,0	142	152
17	9Д1Гч+Б, Гш	75	14,5	30,9	IV	152	157	11,4	12,1	112	121
20	9Д1Гч+Б	80	13,9	34,7	IV	176	232	16,6	19,0	130	153

На ВПП со второй декады августа по первую декаду сентября 2021 г. произвели отбор образцов почвы (в 12 точках), древесины и вторичной коры дуба в соответствии с ТКП 499-2013 (02080) «Радиационный мониторинг лесного фонда. Обследование постоянного пункта наблюдения. Порядок проведения». Древесину отбирали на высоте 1,3 м возрастным буравом Мога (Швеция) у 50–60 деревьев I–III классов роста и развития (по Крафту) строго радиально до центра. Таким же способом на 10 ВПП отобрали по 20–30 образцов древесины у деревьев I–V классов роста и развития (по Крафту). На 11 ВПП разных типов леса керны древесины делили на три равные части – центральную, среднюю и периферийную. Отбор проб в древесине валежника (без коры) производили с лежащих деревьев путем пропила ствола переносной цепной пилой до центра на расстоянии 1,3 м от корневых лап в соответствии с ТКП 239-2010 (02080) «Радиационный контроль. Обследование лесосек. Порядок проведения». Величины загрязнения древесины ¹³⁷Cs в образцах, отобранных возрастным буравом и цепной бензиномоторной пилой, хорошо согласуются [18].

Подготовку образцов для анализа осуществляли в соответствии с ТКП 251-2010 (02080) «Радиационный контроль. Отбор и подготовка проб лесной продукции. Порядок проведения». Определение А_y ¹³⁷Cs в пробах почвы, древесины и коры дуба выполнено инструментально в лаборатории спектрометрии и радиохимии заповедника (аттестат аккредитации № ВУ/112 2.2203 от 30.01.2002 г.) на гамма-бета-спектрометре МКС-АТ1315 производства НПУП «Атомтех» (Минск, Беларусь).

Плотность загрязнения почвы ¹³⁷Cs рассчитывали в соответствии с ТКП 240-2010 (02080) «Радиационный контроль. Обследование земель лесного фонда. Порядок проведения».

Загрязнение ¹³⁷Cs неокоренных стволов дуба рассчитывали путем произведения средних удельных вкладов древесины (85,4 %) и коры (14,6 %) в общую их массу [12] на А_y ¹³⁷Cs в этих структурных частях деревьев на каждой ВПП и последующего их суммирования. Затем определяли средние арифметические значения А_y ¹³⁷Cs в древесине, коре и стволах дуба для всей совокупности насаждений (абсолютный вклад) и долю А_y ¹³⁷Cs в древесине и коре для среднего ствола данной породы в процентах (относительный вклад).

Оценку соответствия содержания ¹³⁷Cs в древесине, коре и неокоренных стволах дуба гигиеническому нормативу ГН 2.6.1.10-1-01-2001 «Республиканские допустимые уровни содержания цезия-137 в древесине, продукции из древесины и древесных материалов и прочей пищевой продукции лесного хозяйства (РДУ/ЛХ-2001)» производили для вероятной ошибки второго рода не более 5 %. Для этого для каждой ВПП определяли расчетную А_y ¹³⁷Cs в древесине и коре путем суммирования значений содержания ¹³⁷Cs в них с погрешностями их измерений. Для неокоренных стволов рассчитывали взвешенные погрешности древесины и коры с учетом удельного вклада древесины и коры в массу стволов и суммировали их с рассчитанной А_y ¹³⁷Cs в них.

Обработку материалов производили при помощи стандартных пакетов прикладных программ *Microsoft Excel 2010* и *Statistica 6.1*. Оценку достоверности различий (*t*) для двух сравниваемых малых выборок (*n* < 20) определяли по формуле:

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

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

Результаты исследования и их обсуждение

Общеизвестно [4; 11; 12; 14; 15], что важнейшим фактором накопления радионуклидов древесными растениями является уровень поверхностного загрязнения ими почвы. В связи с высокой пространственной

неоднородностью радиоактивных выпадений в ЗО ЧАЭС [1; 4; 12; 15] частные определения ПЗ ^{137}Cs в исследованных насаждениях дуба варьируют в пределах математического порядка (184–1872 кБк/м²). Средняя арифметическая (средняя) ее величина (522 ± 86 кБк/м²) при выходящем за пределы выборки доверительном интервале (171–1996 кБк/м²) характеризуется высоким коэффициентом вариации (82,8 %) и на 22,2 % превышает среднее срединное значение, или медиану (427 кБк/м²).

Размах колебаний ПЗ ^{137}Cs в большинстве типов леса, за исключением дубравы злаково-пойменной, относительно узкий (рис. 1).

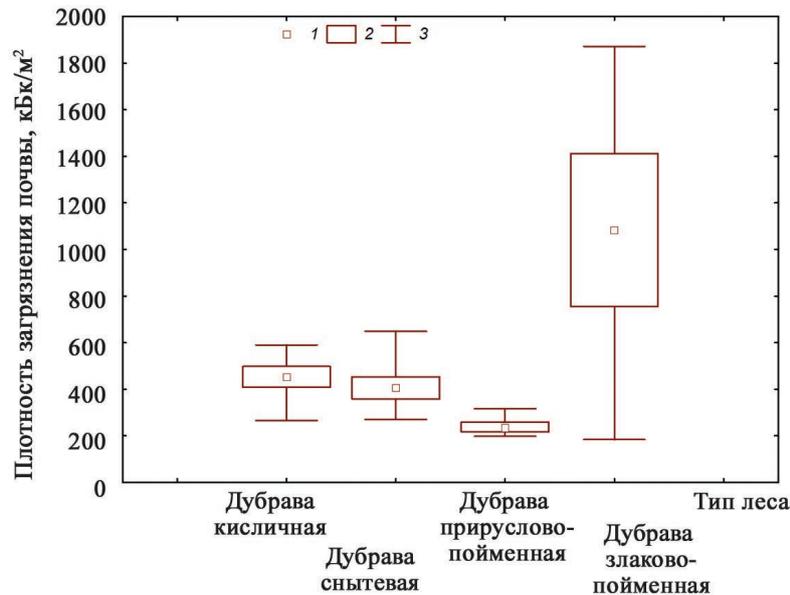


Рис. 1. Плотность загрязнения почвы ^{137}Cs , кБк/м²: 1 – среднее, 2 – среднее ± стандартная ошибка, 3 – минимум – максимум

Fig. 1. Soil contamination density ^{137}Cs , kBq m⁻²: 1 – average, 2 – average ± standard error, 3 – minimum – maximum

В ряду типов леса: дубрава прируслово-пойменная – дубрава снытевая – дубрава кисличная – дубрава злаково-пойменная увеличиваются средние (237 – 406 – 453 – 1084 кБк/м²) и медианные (222 – 383 – 491 – 1421 кБк/м²) значения ПЗ ^{137}Cs . Различия в загрязнении почв обусловлены рядом факторов. Важнейшим из них в ближней зоне является расстояние объектов исследований до места выброса радиоактивных веществ, определяющее количество, состав и форму выпадения радионуклидов [12; 15].

Совокупности переменных величин ПЗ ^{137}Cs (критерий $\chi^2 = 10,04$, вероятность ошибки $p = 0,002$) и рассчитанных по GPS-координатам расстояний между ВПП и ЧАЭС ($\chi^2 = 4,32$, $p = 0,013$) не представляют нормальное распределение. Между средними значениями этих показателей установлена обратная средняя высоко значимая по Чеддоку ($p < 0,001$) корреляционная связь (r -Спирмена = $-0,59$). Ее наличие обеспечено снижением интенсивности выпадений ^{137}Cs с удалением от места катастрофы [1; 4; 12], а невысокая сила связи – их территориальной мозаичностью.

Наибольшая ПЗ ^{137}Cs наблюдается в приближенных к ЧАЭС дубравах злаково-пойменных (в среднем на $26,6 \pm 6,8$ км) в сравнении с более удаленными от нее дубравами кисличными ($40,2 \pm 2,5$ км), снытевыми ($39,9 \pm 2,2$ км) и прируслово-пойменными ($39,3 \pm 1,7$ км). В насаждениях равноудаленных (в среднем) от места аварии типов леса различия в загрязнении почв радионуклидами определены условиями их осадения из атмосферы, геоморфологией поверхности, микрорельефом, типом биогеоценоза, составом древесного яруса [12; 14; 15; 19] и особенностями ландшафта, обусловившими как мозаичность выпадения, так и первичное и вторичное перераспределение радиоактивных веществ. Поэтому в редких низкорослых дубравах прируслово-пойменных, приуроченных к повышенным элементам рельефа на открытых и полуоткрытых участках поймы, в основном вблизи р. Припять и ее стариц, ПЗ ^{137}Cs на 95 % уровне значимости достоверно ниже в сравнении с высокоствольными дубравами кисличными ($t_{\text{факт.}} = 3,366 > t_{\text{табл.}} = 2,201$) и снытевыми ($t_{\text{факт.}} = 2,593 > t_{\text{табл.}} = 2,228$), локализованными в лесных массивах.

Основываясь на возрастании интенсивности миграции ^{137}Cs от свежих гигротопов к влажным и от богатых трофотопов к бедным [12], полагаем, что перераспределение радионуклида по вертикальному профилю почвы с опусканием некоторого его количества глубже 20 см ускорили снижение ПЗ ^{137}Cs в произрастающих на аллювиальных почвах легкого гранулометрического состава дубравах прируслово-пойменных и обеспечили некоторую (недостоверную) разницу между средними значениями данного показателя в дубравах кисличных и снытевых.

Частные величины $A_y^{137}\text{Cs}$ в древесине и в коре дуба сильно варьируют в пределах формации. Доверительные интервалы на 95 % уровне значимости находятся в пределах выборок. Средние значения $A_y^{137}\text{Cs}$ в древесине и коре дуба всех исследованных насаждений выше медианных на 37,1 и 59,1 % (табл. 2).

Таблица 2

Статистические показатели удельной активности ^{137}Cs в древесине и коре дуба, Бк/кг

Table 2

Statistical indicators of the specific activity of ^{137}Cs in oak wood and bark, Bq kg⁻¹

Статистический показатель	Дубрава кисличная	Дубрава снытевая	Дубрава прируслово-пойменная	Дубрава злаково-пойменная	Все дубравы
Древесина					
<i>n</i>	8	7	5	5	25
<i>Min – max</i>	404–1205	382–1038	208–621	698–3645	208–3645
<i>Ci</i>	635–1044	415–854	140–634	709–3626	618–1296
<i>M ± m</i>	839±86	634±90	387±89	2167±525	957±164
σ	245	237	199	1175	822
<i>Cv</i>	29,2	37,4	51,6	54,2	85,9
<i>Me</i>	838	653	263	2025	698
Кора					
<i>Min – max</i>	1372–4968	883–2398	338–1067	974–8806	338–8806
<i>Ci</i>	1414–3414	980–1953	242–1031	1610–9335	1484–3327
<i>M ± m</i>	2414±423	1467±199	637±142	5472±1391	2405±446
σ	1196	526	318	3111	2232
<i>Cv</i>	49,5	35,9	49,9	56,8	92,8
<i>Me</i>	2318	1511	539	6323	1511

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

Выборки $A_y^{137}\text{Cs}$ в древесине и коре дуба по типам леса, кроме дубравы злаково-пойменной, не имеют сильного разброса. Соотношение их максимальных и минимальных значений в дубравах кисличных, снытевых и прируслово-пойменных сравнительно небольшое – 2,7–3,0 раза в древесине и 2,7–3,6 раза в коре. В дубраве злаково-пойменной они составляют 17,5 и 26,0 раз соответственно.

В пойменных дубравах доверительные интервалы $A_y^{137}\text{Cs}$ как в древесине, так и в коре выходят за пределы выборок экспериментальных данных. В них медианные значения $A_y^{137}\text{Cs}$ в древесине дуба на 7,0 и 47,1 % ниже средних. В коре разница между этими значениями составляет +18,2 и –15,6 % соответственно. В плакорных дубравах средние срединные и средние арифметические значения $A_y^{137}\text{Cs}$ в данных структурных компонентах ствола близки между собой.

Средние и медианные значения $A_y^{137}\text{Cs}$ в древесине и коре дуба увеличиваются в типологическом ряду дубрава прируслово-пойменная < дубрава снытевая < дубрава кисличная < дубрава злаково-пойменная, то есть синхронно с повышением загрязнения радионуклидом почв. При этом достоверные различия средних величин данного показателя на 95 % уровне значимости наблюдаются между большинством типов леса в обоих структурных частях ствола (табл. 3). Учитывая прямую зависимость содержания ^{137}Cs в древесине и коре древесных пород от ПЗ ^{137}Cs [12; 14; 15], недостоверность различий средних величин $A_y^{137}\text{Cs}$ между отдельными типами дубрав обусловлена близкими уровнями ПЗ ^{137}Cs в них.

Таблица 3

Достоверность различий удельной активности ^{137}Cs в древесине (числитель) и коре (знаменатель) дуба между типами леса

Table 3

Reliability of differences in specific activity ^{137}Cs in oak wood (numerator) and bark (denominator) between forest types

Тип леса	Дубрава кисличная	Дубрава снытевая	Дубрава прируслово-пойменная
Дубрава снытевая	1,528 / 1,804	–	–
Дубрава прируслово-пойменная	3,193* / 2,991*	1,735 / 2,868*	–
Дубрава злаково-пойменная	2,843* / 2,300*	3,065* / 3,049*	2,987* / 3,092*

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

Установлены высоко значимые ($p < 0,001$) тесные корреляционные связи между ПЗ ^{137}Cs и A_y ^{137}Cs в древесине (r -Спирмена = 0,78) и коре (0,81) дуба. Использование данного коэффициента корреляции определено ненормальным распределением совокупности переменных величин A_y ^{137}Cs в древесине ($\chi^2 = 6,93$, $p = 0,008$), коре ($\chi^2 = 4,89$, $p = 0,029$) и ПЗ ^{137}Cs . Прослеживается отрицательная слабая значимая ($p < 0,05$) связь A_y ^{137}Cs в древесине дуба (r -Спирмена = $-0,41$), и слабая незначимая ($p > 0,05$) – в коре ($r = -0,35$) с расстоянием до ЧАЭС.

Между A_y ^{137}Cs в древесине и коре дуба наблюдается высоко значимая ($p < 0,001$) очень высокая корреляция (r -Спирмена = 0,92). Высокий коэффициент корреляции между ними ($r = 0,932 \pm 0,048$) приводится в работе [12].

Коэффициенты перехода ^{137}Cs в древесину дуба в целом по формации характеризуются небольшим размахом колебаний, укладываясь в относительно узкий диапазон значений ($(0,8-3,8) \times 10^{-3} \text{ м}^2/\text{кг}$). Доверительный интервал находится в границах выборки. Средняя их величина незначительно (на 11,8 %) превышает медиану. В дубравах кисличных, снытевых и прируслово-пойменных средние значения K_n ^{137}Cs в древесину близки между собой ($(1,6-2,5) \times 10^{-3} \text{ м}^2/\text{кг}$) и в 1,3–1,6 раза ниже данного показателя в дубраве злаково-пойменной (табл. 4).

Таблица 4

Статистические показатели коэффициентов перехода ^{137}Cs в древесину и кору дуба, $\text{н} \times 10^{-3} \text{ м}^2/\text{кг}$

Table 4

Statistical indicators of ^{137}Cs transition coefficients in oak wood and bark, $\text{н} \times 10^{-3} \text{ м}^2 \text{ кг}^{-1}$

Статистический показатель	Дубрава кисличная	Дубрава снытевая	Дубрава прируслово-пойменная	Дубрава злаково-пойменная	Все дубравы
<i>n</i>	8	7	5	5	25
Древесина					
<i>Min – max</i>	1,4–2,5	1,1–2,1	0,8–3,0	1,4–3,8	0,8–3,8
<i>Ci</i>	1,6–2,2	1,3–1,8	0,5–2,9	1,2–3,8	1,6–2,2
<i>M ± m</i>	1,9 ± 0,14	1,6 ± 0,12	1,7 ± 0,43	2,5 ± 0,48	1,9 ± 0,15
σ	0,4	0,3	1,0	1,1	0,7
<i>Cv</i>	20,7	20,6	57,9	42,1	39,1
<i>Me</i>	2,0	1,5	1,3	2,0	1,7
Кора					
<i>Min – max</i>	3,0–9,2	2,0–4,2	1,1–4,3	4,4–8,9	1,1–9,2
<i>M ± m</i>	5,3 ± 0,67	3,7 ± 0,29	2,8 ± 0,64	5,6 ± 0,83	4,4 ± 0,37
<i>Ci</i>	3,7–6,9	2,9–4,4	1,0–4,6	3,3–7,9	3,6–5,2
σ	1,9	0,8	1,4	1,8	1,8
<i>Cv</i>	35,5	21,1	51,5	32,8	41,8
<i>Me</i>	5,2	4,0	2,7	4,9	4,2

В плакорных насаждениях дуба средние значения K_n ^{137}Cs в древесину близки к срединным; в пойменных, где доверительные интервалы несколько выходят за нижние границы выборок экспериментальных данных, они на 25–31 % выше медиан. Существенно различаются между собой коэффициенты вариации средних величин между экологическими группами дубрав.

Частные K_n ^{137}Cs в кору дуба и размах их колебаний по типам леса и в целом по формации выше соответствующих значений K_n ^{137}Cs в древесину (табл. 4). Соотношение максимальных и минимальных величин этого показателя по типам леса невысокое (2,0–3,9 раза), по формации оно возрастает до 8,4 раза.

Диапазон колебания средних значений K_n ^{137}Cs в кору дуба по типам леса составляет $(2,8-5,6) \times 10^{-3} \text{ м}^2/\text{кг}$ при вариабельности 21,1–51,5 %. В большинстве типов доверительные интервалы выходят за границы выборок. Медианные значения располагаются в более узких пределах ($(2,7-5,2) \times 10^{-3} \text{ м}^2/\text{кг}$). Отклонение их от средних арифметических составляет от $-14,3$ до $+8,1$ %. Повышенные значения обоих средних величин характерны для дубрав кисличных и злаково-пойменных.

Превышения средних и срединных значений содержания ^{137}Cs в коре дуба в сравнении с древесиной по типам леса составляют 1,6–2,9 и 2,0–3,1 раза, по формации – 2,5 и 2,2 раза. Близки к ним и соотношения K_n ^{137}Cs в части ствола – 1,6–2,8 и 2,1–2,7 раз по типам леса и 2,3 и 2,5 раз для формации.

Полагаем, что более высокие показатели загрязнения коры дуба в сравнении с древесиной обусловлены морфо-физиологическими особенностями сравниваемых компонентов. В наружной коре депонированный ^{137}Cs почти неподвижен. В то же время в древесине протекают динамичные процессы перераспределения его запасов по всему стволу [4; 12; 15; 20], а текущее содержание подвержено сезонным изменениям и годовым флуктуациям в зависимости от почвенных (главным образом от ее влажности) и метеорологических (осадки) условий [4; 9; 12; 15; 20].

В неокоренных стволах дуба размах колебаний A_y ^{137}Cs по насаждениям достигает 18,9 раза, абсолютного вклада коры в общую A_y ^{137}Cs ствола – 26,2, древесины – 17,5 раза. Средняя для дубрав величина A_y ^{137}Cs в стволах (доверительный интервал находится в границах анализируемой выборки) составляет 1168 ± 204 Бк/кг при абсолютном вкладе древесины 817 ± 140 Бк/кг, коры – 351 ± 65 Бк/кг. Эти показатели характеризуются высокой вариабельностью (табл. 5).

Таблица 5

Статистические показатели вклада удельной активности древесины и коры в загрязнение ^{137}Cs стволов дуба ($n = 25$)

Table 5

Statistical indicators of the contribution of wood and bark specific activity in ^{137}Cs oak trunks contamination ($n = 25$)

Статистический показатель	Неокоренный ствол	Абсолютный вклад, Бк/кг		Относительный вклад, %	
		древесины	коры	древесины	коры
<i>Min-max</i>	233–4399	178–3113	49–1286	58,7–82,1	17,9–41,3
<i>M±m</i>	1168 ± 204	817 ± 140	351 ± 65	$71,5 \pm 1,2$	$28,5 \pm 1,27$
<i>Ci</i>	747–1589	527–1107	217–486	69,1–73,9	26,1–30,9
σ	1020	702	326	5,8	5,8
<i>Cv</i>	87,3	85,9	92,8	8,2	20,5

Относительный вклад древесины в общую активность ^{137}Cs в деловой части неокоренного ствола дуба во второй половине 1990-х гг. составлял 33,5 %, коры – 66,5, в вершинной – 27,3 и 72,7 % соответственно [12]. К 2021 г. эта пропорция кардинально изменилась. Доля среднего вклада древесины в A_y ^{137}Cs неокоренного ствола этой породы выросла до 71,5 %, коры – снизилась до 28,5 % при существенном колебании данных показателей, прежде всего коры, по насаждениям (табл. 5). Полагаем, что изменение вклада каждого из этих компонентов в общее загрязнение стволов ^{137}Cs произошло в результате более резкого замедления поступления радионуклида в кору со временем в сравнении с древесиной. Так, во второй половине 1990-х гг. средний K_n ^{137}Cs в древесину дуба составлял $(2,44 \pm 0,15) \times 10^{-3}$ м²/кг, в кору – $(8,42 \pm 0,61) \times 10^{-3}$ м²/кг [12]. К 2021 г. они уменьшились в 1,28 и 1,91 раза соответственно (табл. 4). Разница в темпах снижения перехода ^{137}Cs в сравниваемые компоненты ствола составила 1,5 раза.

Установлены значимая ($p < 0,05$) обратная слабая корреляционная связь (r -Спирмена = –0,44) между A_y ^{137}Cs в неокоренных стволах дуба с расстоянием до ЧАЭС и высокозначимая ($p < 0,001$) высокая ($r = 0,80$) – с ПЗ ^{137}Cs : выборки сравниваемых величин, включая A_y ^{137}Cs в неокоренных стволах дуба ($\chi^2 = 6,46$, $p = 0,011$), характеризуются ненормальным распределением.

В работах [4; 12; 14; 15; 21] указывается на неоднозначные связи показателей накопления ^{137}Cs в древесине, преимущественно сосны, с возрастом древостоев и на влияние на этот процесс их густоты. Установлено, что нормальное распределение имеют совокупности всех таксационных показателей господствующих ярусов древостоев дуба, кроме класса бонитета (табл. 6), а также K_n ^{137}Cs в древесину ($\chi^2 = 0,87$, $p = 0,351$) и кору ($\chi^2 = 2,16$, $p = 0,141$), ненормальное – совокупности переменных величин A_y ^{137}Cs в древесине, коре и неокоренных стволах дуба (приведены выше).

Выявлены корреляционные связи (r -Спирмена) разной значимости и силы между A_y ^{137}Cs в древесине, коре и неокоренных стволах дуба, с одной стороны, а с другой – средней высотой, классом бонитета, запасом древесины дуба, общей суммой площадей сечения и общим запасом древостоев (табл. 6). Коэффициенты перехода ^{137}Cs в кору имеют преимущественно средние значимые и высоко значимые корреляции Пирсона с показателями абсолютной полноты и запаса дуба, а также верхних ярусов древостоев в целом. Отметим слабые значимые корреляции K_n ^{137}Cs в кору со средней высотой и возрастом древостоев. Связи K_n ^{137}Cs в древесину с таксационными характеристиками дубрав не выражены. Значимых корреляций загрязнения структурных компонентов стволов дуба ^{137}Cs со средним диаметром и густотой древостоев не установлено. Анализ показывает, что ^{137}Cs интенсивнее накапливается в древесине и коре деревьев дуба в более быстрорастущих и продуктивных насаждениях.

Таблица 6

Проверка на нормальность распределения и коэффициенты корреляции (Спирмена, Пирсона) таксационных показателей древостоев с показателями загрязнения ¹³⁷Cs компонентом стволов дуба (n = 25)

Table 6

Checking for the normality of the distribution of taxation indicators of forest stands and their correlation coefficients (Spearman, Pearson) with indicators of ¹³⁷Cs contamination of components of oak trunks (n = 25)

Показатель	Возраст, лет	Средние		Класс бонитета	Число стволов, шт./га		Сумма площадей сечений, м ² /га		Запас, м ³ /га		
		высота, м	диаметр, см				дуба	общая	дуба	общий	
	дуба						общее	дуба	общая	дуба	общий
Проверка на нормальность распределения											
χ^2	3,63	1,19	2,59	13,80	0,75	2,42	2,29	1,08	3,33	1,52	
<i>P</i>	0,057	0,275	0,108	0,000	0,386	0,120	0,130	0,299	0,068	0,217	
Удельная активность ¹³⁷ Cs, Бк/кг											
<i>r</i> -Спирмена	в древесине	0,32	0,52	-0,10	0,42	0,27	0,22	0,28	0,57	0,52	0,68
	в коре	0,36	0,60	-0,03	0,40	0,22	0,20	0,24	0,55	0,52	0,73
	в стволах	0,33	0,54	-0,10	0,61	0,26	0,24	0,26	0,58	0,50	0,71
Коэффициенты перехода ¹³⁷ Cs, n×10 ⁻³ м ² /кг											
<i>r</i> -Пирсона	в древесине	0,09	0,04	-0,08	-0,02	0,22	0,10	0,39	0,37	0,28	0,24
	в коре	0,45	0,52	0,13	0,36	0,10	-0,02	0,63	0,58	0,71	0,70
<i>P</i> _{0,05} = 0,40; <i>P</i> _{0,01} = 0,50; <i>P</i> _{0,001} = 0,62											

Распределение A_y ¹³⁷Cs в древесине деревьев дуба различных классов роста и развития (по Крафту) и валежнике (рис. 2) существенно различается по отдельным насаждениям при определенном сходстве между некоторыми из них (ВПП 4, 14 и 22).

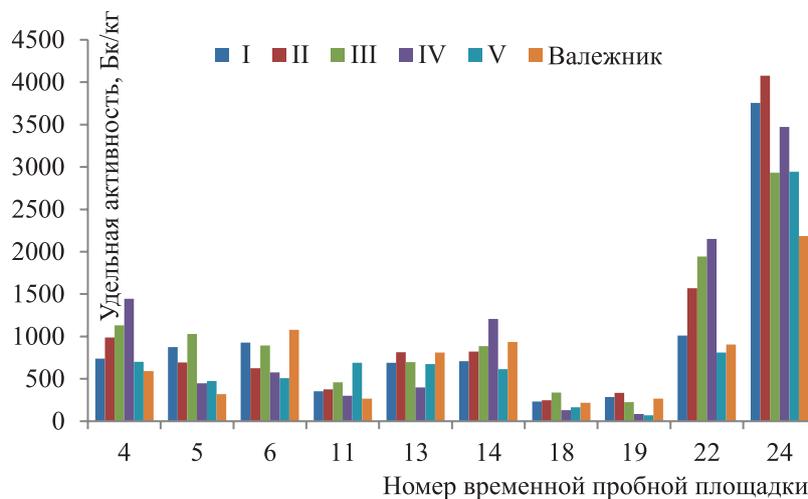


Рис. 2. Величины удельной активности ¹³⁷Cs в древесине дуба по классам роста и развития деревьев (I–V) и валежнике по насаждениям

Fig. 2. The values of the specific activity of ¹³⁷Cs in oak wood by classes of growth and development of trees (I–V) and dead wood by stands

В целом для дубовой формации (табл. 7) размах крайних значений A_y ¹³⁷Cs в древесине деревьев разных классов роста и развития превышает математический порядок. Отношения $A_y \text{ max}/A_y \text{ min}$ у деревьев I–III классов Крафта (13,1–16,4) в несколько раз ниже в сравнении с деревьями IV и V классов (40,0 и 42,7).

В валежнике оно минимально (10,0). Высокая изменчивость индивидуальных величин по насаждениям обеспечила высокие значения ошибок и коэффициентов вариации средних $A_y^{137}\text{Cs}$ в древесине всех классов роста и развития в валежнике, доверительные интервалы которых, за единичным несущественным отклонением, не выходят за границы выборок.

Таблица 7

Статистические показатели удельной активности ^{137}Cs в древесине дуба по классам роста и развития деревьев и валежнике ($n = 10$), Бк/кг

Table 7

Statistical indicators of the specific activity of ^{137}Cs in oak wood by classes of growth and development of trees and dead wood ($n = 10$), Bk kg⁻¹

Статистический показатель	Классы роста и развития деревьев					Валежник
	I класс	II класс	III класс	IV класс	V класс	
<i>Min – max</i>	234–3756	249–4075	224–2934	86–3473	69–2943	219–2185
<i>Ci</i>	228–1687	249–1861	466–1641	246–1798	192–1338	332–1184
<i>M ± m</i>	958 ± 323	1055 ± 357	1053 ± 260	1022 ± 343	765 ± 253	758 ± 188
σ	1020	1128	821	1086	801	595
<i>Cv</i>	106,5	107,0	78,0	106,2	104,7	78,6

Древесина живых деревьев (I–IV классы Крафта) имеет близкие средние значения $A_y^{137}\text{Cs}$ при несущественно (на 6,3–9,2 %) пониженной величине данного показателя в прегосподствующих деревьях I класса роста и развития. В сухостое она ниже на 25,1–27,4 %, в валежнике – на 25,8–28,1 %, что, вероятно, обусловлено отсутствием корневого поступления радионуклида в мертвые деревья.

Древесина лесообразующих пород по радиальному профилю ствола загрязнена ^{137}Cs неравномерно. Общим для большинства видов является максимальное содержание радионуклида во внешнем годовичном кольце, которое с разной интенсивностью снижается по направлению к центру. У ядровых пород, к которым относится дуб, $A_y^{137}\text{Cs}$ в заболонной части древесины значительно выше, чем в ядровой [15]. У дуба в пределах заболони содержание радионуклида в древесине резко падает от крайнего годовичного кольца до ядра, в котором его концентрация постепенно уменьшается и ближе к сердцевине переходит в плато [4]. Согласно работе [12], в радиальном направлении ствола дуба загрязнение древесины ^{137}Cs резко снижается в немногочисленных периферических годовичных слоях, затем на большей части ствола наблюдается плато $A_y^{137}\text{Cs}$ с небольшими колебаниями в отдельных кольцах, уменьшаясь почти в 5 раз к сердцевине.

В исследованных дубравах для каждого типа леса и для формации в целом характерна общая тенденция снижения $A_y^{137}\text{Cs}$ в древесине дуба от периферии до средней и центральной частей ствола (рис. 3).

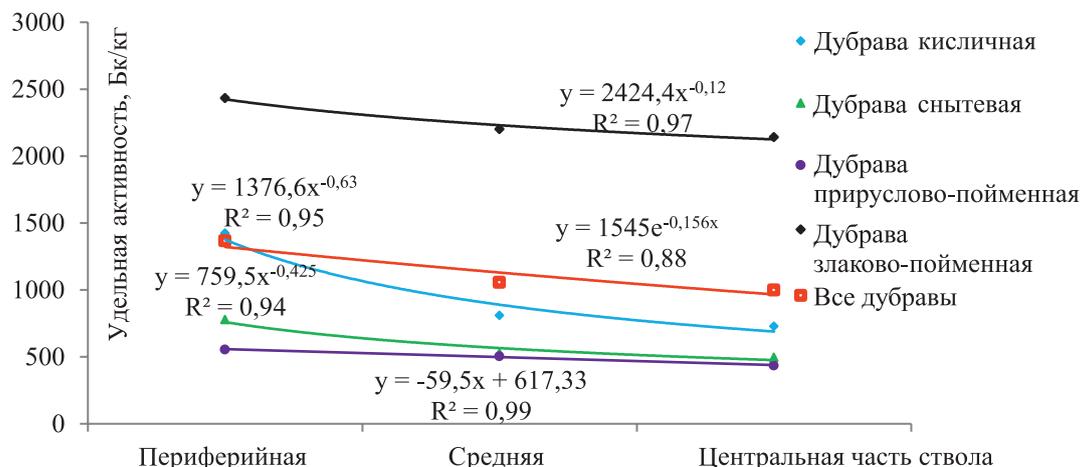


Рис. 3. Изменение удельной активности ^{137}Cs в древесине дуба по радиальному профилю ствола

Fig. 3. Change in the specific activity of ^{137}Cs in oak wood along the radial profile of the trunk

Заготовка древесной продукции на радиоактивно загрязненных землях регламентируется 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)». На территории с высокой ПЗ ^{137}Cs окоренная древесина дуба по содержанию этого радионуклида соответствует нормативу 1480 Бк/кг в 84 % обследованных насаждений, неокоренная – в 72 %, а нормативу 740 Бк/кг – окоренная и неокоренная древесина в 32 % древостоев. Загрязнение этим радионуклидом коры как технологического сырья оказалось ниже нормируемого уровня в 36 % насаждений, а также прочей непищевой продукции лесного хозяйства – в 52 % (табл. 8).

Таблица 8

Доля насаждений дуба, соответствующих санитарным нормам Республики Беларусь по содержанию ^{137}Cs в древесине и коре, %

Table 8

The proportion of oak stands that accord the sanitary standards of the Republic of Belarus by ^{137}Cs content in wood and bark, %

Тип леса	Древесина				Кора	
	окоренная		неокоренная		технологическое сырье	прочая непищевая продукция
Норматив, Бк/кг	1480	740	1480	740	1480	1850
Дубрава прируслово-пойменная	100,0	80,0	100,0	80,0	100,0	100,0
Дубрава снытевая	100,0	42,8	85,7	42,8	42,8	57,1
Дубрава кисличная	100,0	12,5	75,0	12,5	0,0	37,5
Дубрава злаково-пойменная	20,0	0,0	20,0	0,0	20,0	20,0
Все дубравы	84,0	32,0	72,0	32,0	36,0	52,0

В типологическом аспекте наиболее «чистые» древесина и кора дуба находятся в дубравах прируслово-пойменных, наиболее «грязные» – злаково-пойменных. Нормативу 1480 Бк/кг соответствует окоренная древесина во всех исследованных насаждениях большинства типов леса, кроме дубравы злаково-пойменной, где уровню содержания ^{137}Cs соответствует только каждое пятое насаждение. Доля древостоев, в которых окоренная древесина этой породы соответствует нормативу 740 Бк/кг, а неокоренная – нормативам 1480 Бк/кг и 740 Бк/кг снижается в типологическом ряду дубрава прируслово-пойменная – дубрава снытевая – дубрава кисличная – дубрава злаково-пойменная. Количество насаждений с допустимыми уровнями содержания ^{137}Cs в коре дуба снижается от прируслово-пойменных и снытевых дубрав до злаково-пойменных и кисличных.

Заключение

В дубравах ЗО ЧАЭС (Полесский заповедник) поверхностное загрязнение почвы ^{137}Cs изменяется в широком диапазоне значений (184–1872 кБк/м², или 5,0–50,6 Ки/км²), что связано с разным удалением насаждений от ЧАЭС, условиями осадения и территориальной мозаичностью радиоактивных выпадений, а также особенностями последующего их перераспределения. Просматривается тенденция повышения ПЗ ^{137}Cs в ряду дубрава прируслово-пойменная < дубрава снытевая < дубрава кисличная < дубрава злаково-пойменная.

Индивидуальные значения A_y ^{137}Cs в древесине (208–3645 Бк/кг), коре (338–8806 Бк/кг) и неокоренных стволах (233–4399 Бк/кг) дуба характеризуются большими размахами колебаний по насаждениям, имеют тесные корреляции с уровнями поверхностного загрязнения почвы данным радионуклидом и слабые – с расстоянием до ЧАЭС. Средние их значения в типологическом ряду распределяются аналогично ПЗ ^{137}Cs при достоверных различиях между большинством типов леса. Пропорции относительных вкладов древесины и коры в A_y ^{137}Cs ствола этой породы за 25 лет кардинально изменились.

Диапазон частных K_n ^{137}Cs в древесину дуба относительно узкий ((0,8–3,8)×10⁻³ м²/кг), в кору – значительно шире ((1,1–9,2)×10⁻³ м²/кг). Средние K_n ^{137}Cs в древесину в дубравах кисличных, снытевых и прируслово-пойменных близки; средние K_n ^{137}Cs в кору увеличиваются синхронно с ПЗ ^{137}Cs .

Интенсивность накопления ^{137}Cs в древесине, коре и стволах дуба в определенной мере связана с продуктивностью древостоев. Распределение A_y ^{137}Cs в древесине деревьев дуба по классам роста и развития в насаждениях не выражено. Средние ее величины в деревьях I–IV классов близки, в сухостое и валежнике они на 25–28 % ниже. Подтверждена общая тенденция снижения A_y ^{137}Cs в древесине дуба от периферии к сердцевине.

На территории ЗО ЧАЭС с высокой ПЗ ^{137}Cs окоренная древесина дуба в 84 %, неокоренная – в 72 % насаждений по содержанию данного радионуклида соответствует гигиеническому нормативу Республики Беларусь РДУ/ЛХ-2001 на лесоматериалы круглые прочие 1480 Бк/кг, в третьей их части – нормативу 740 Бк/кг. В половине дубрав возможна заготовка коры, в качестве прочей непищевой продукции лесного хозяйства и в третьей их части – в качестве технологического сырья. Удельный вес насаждений дуба, пригодных для заготовки древесинной продукции, различается по типам леса.

Следует учитывать, что в ЗО ЧАЭС выпало более 70 % ^{90}Sr и более 97 % трансурановых элементов, выброшенных при аварии [2], по которым лесная продукция в Беларуси не нормируется. Поэтому представляется целесообразным разработать и принять допустимых уровней радиоактивного загрязнения древесины по содержанию в ней ^{90}Sr , ^{241}Am , изотопов плутония и, прежде всего, в дровяной древесине.

Библиографические ссылки

1. 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. 140 с.
2. 35 лет после Чернобыльской катастрофы: итоги и перспективы преодоления ее последствий. В: *Национальный доклад Республики Беларусь*. Минск: ИВЦ Минфина; 2020. 152 с.
3. Дворник АМ, Жученко ТА. Динамика древесных ресурсов в загрязненных радионуклидами районах Беларуси и прогнозная оценка накопления радионуклидов древесным ярусом. *Чернобыль: Экология и здоровье*. 1998;1(5):5–9.
4. 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. 454 с.
5. Багинский ВФ, Кудин МВ. Прогноз лесопользования в Полесском государственном радиационно-экологическом заповеднике в связи с динамикой радиоэкологической обстановки. *Проблемы лесоведения и лесоводства*. 2010;70:403–414.
6. Углынец АВ, Гарбарук ДК. Накопление ^{137}Cs и ^{90}Sr компонентами древостоя, подроста и подлеска в дубравах зоны отчуждения Чернобыльской АЭС. *Проблемы лесоведения и лесоводства*. 2019;79:236–247.
7. Лазарева МС, Климович ЛК, Климов АВ. Особенности формирования дубравы кисличной. *Известия Гомельского государственного университета им. Ф. Скорины. Естественные науки*. 2020;6(123):50–55.
8. Углынец АВ, Гарбарук ДК, Шумак СВ. Динамика и продуктивность дубрав в условиях отсутствия хозяйственной деятельности на юго-востоке Белорусского Полесья. *Труды БГТУ. Серия 1, Лесное хозяйство, природопользование и перераб. возобновляемых ресурсов*. 2022;2(258):55–66. DOI: 10.52065/2519-402X-2022-258-2-55-66.
9. Булавик ИМ, Переволоцкий АН, Гайдунь АЗ. Влияние различных факторов на накопление ^{137}Cs древесными растениями. В: *10 лет Полесскому государственному радиационно-экологическому заповеднику*. Минск: Н. Б. Киреев; 1998. с. 59–70.
10. 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.
11. Парфёнов ВИ, Якушев БИ, Мартинович БС, и др. *Радиоактивное загрязнение растительности Беларуси*. Минск: Навука і тэхніка; 1995. 578 с.
12. Переволоцкий АН. *Распределение ^{137}Cs и ^{90}Sr в лесных биогеоценозах*. Гомель: Институт радиологии; 2006. 255 с.
13. Булко НИ, Шабалева МА, Толкачева НВ, и др. Особенности аномального поступления ^{137}Cs в основные лесобразующие породы на территории западного следа аварии на ЧАЭС. *Проблемы лесоведения и лесоводства*. 2010;70:422–434.
14. Краснов ВП, Орлов АА, Бузун ВА и др. *Прикладна радіоекологія лісу*. Житомир: Полісся; 2007. 680 с.
15. Щеглов АИ. Биогеохимия техногенных радионуклидов в лесных экосистемах. В: *По материалам 10-летних исследований в зоне влияния аварии на ЧАЭС*. Москва: Наука; 2000. 268 с.
16. Юркевич ИД, Ловчий НФ, Гельтман ВС. *Леса Белорусского Полесья (геоботанические исследования)*. Минск: Наука и техника; 1977. 288 с.
17. Юркевич ИД. *Выделение типов леса при лесоустроительных работах*. Минск: Наука и техника; 1980. 120 с.
18. 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.
19. Гуров ВН, Керцман ВН. Рельеф как фактор возможного перемещения радионуклидов. В: *Геохимические пути миграции искусственных радионуклидов в биосфере*. Пушино: [б. и.]; 1991. с. 17.
20. 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.
21. Барабошкин АВ, Карбанович ЛН, Булко НИ, и др. Факторы, влияющие на загрязнение цезием-137 древесины основных лесобразующих пород. *Проблемы лесоведения и лесоводства*. 2005;63:451–454.

References

1. Izrael' YuA, Bogdevich IM, Averin VS. *Atlas sovremennykh i prognoznykh 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. 140 p. Russian.
2. 35 let posle Chernobyl'skoi katastrofy: itogi i perspektivy preodoleniya ee posledstviy. V: *Natsional'nyi doklad Respubliki Belarus'* [35 years after the Chernobyl disaster: results and prospects of overcoming its consequences]. In: *National Report of the Republic of Belarus*. Minsk: IVTs Minfina; 2020. 152 p. Russian.
 3. Dvornik AM, Zhuchenko TA. *Dinamika drevesnykh resursov v zagryaznennykh radionuklidami raionakh Belarusi i prognoznaya otsenka nakopleniya radionuklidov drevesnym yarusom* [Dynamics of wood resources in radionuclide-contaminated areas of Belarus and forecast assessment of the accumulation of radionuclides by the wood layer]. *Chernobyl': Ekologiya i zdorov'e*. 1998;1(5):5–9. Russian.
 4. 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. 454 p. Russian.
 5. Baginskii VF, Kudin MV. *Prognoz lesopol'zovaniya v Polesskom gosudarstvennom radiatsionno-ekologicheskom zapovednike v svyazi s dinamikoi radioekologicheskoi obstanovki* [Forecast of felling volumes in the Polesye State Radiation and Ecological Nature Reserve in the context of the dynamics of radioecological situation]. *Problemy lesovedeniya i lesovodstva*. 2010;70:403–414. Russian.
 6. Uglyanets AV, Garbaruk DK. *Nakoplenie ¹³⁷Cs i ⁹⁰Sr komponentami drevostoya, podrosta i podleska v dubravakh zony otchuzhdeniya Chernobyl'skoi AES* [¹³⁷Cs and ⁹⁰Sr accumulation of stand, regrowth and undergrowth components in oak forests of the Chernobyl NPP exclusion zone]. *Problemy lesovedeniya i lesovodstva*. 2019;79:236–247. Russian.
 7. Lazareva MS, Klimovich LK, Klimov AV. *Osobennosti formirovaniya dubravy kislichnoi* [Features of the formation of sour oak]. *Izvestiya Gomel'skogo gosudarstvennogo universiteta im. F. Skoriny. Estestvennye nauki*. 2020;6(123):50–55. Russian.
 8. Uglyanets AV, Garbaruk DK, Shumak SV. *Dinamika i produktivnost' dubrav v usloviyakh otsutstviya khozyaistvennoi deyatel'nosti na yugo-vostoke Belorusskogo Poles'ya* [Dynamics and productivity of oak forests in the absence of economic activities in the south-east of the Belarusian Polesye]. *Trudy BGTU. Seriya 1: Lesnoe khozyaistvo, prirodopol'zovanie i pererabotka vozobnovlyaemykh resursov*. 2022;2(258):55–66. DOI: 10.52065/2519-402X-2022-258-2-55–66. Russian.
 9. Bulavik IM, Perevolotskii AN, Gaidul' AZ. *Influence of various factors on the accumulation of ¹³⁷Cs by woody plants*. In: *10 let Polesskomu gosudarstvennomu radiatsionno-ekologicheskomu zapovedniku*. Minsk: NB Kireev; 1998. p. 59–70. Russian.
 10. Uglyanets AV, Garbaruk DK, Shumak SV. *Nakoplenie ¹³⁷Cs i ⁹⁰Sr komponentami drevostoya v chernoal'shanikakh zony otchuzhdeniya Chernobyl'skoi AES* [¹³⁷Cs and ⁹⁰Sr accumulation of stand components in black alder forests of the Chernobyl NPP exclusion zone]. *Problemy lesovedeniya i lesovodstva*. 2020;80:246–256. Russian.
 11. Parfenov VI, Yakushev BI, Martinovich BS, et al. *Radioaktivnoe zagryaznenie rastitel'nosti Belarusi* [Radioactive contamination of vegetation in Belarus]. Minsk: Nauka i tekhnika; 1995. 578 p. Russian.
 12. Perevolotskii AN. *Raspreделение ¹³⁷Cs i ⁹⁰Sr v lesnykh biogeotsenozakh* [Distribution ¹³⁷Cs and ⁹⁰Sr in forest biogeocenoses]. Gomel: Institut radiologii; 2006. 255 p. Russian.
 13. Bulko NI, Shabaleva MA, Tolkacheva NV, et al. *Osobennosti anomal'nogo postupleniya ¹³⁷Cs v osnovnye lesoobrazuyushchie porody na territorii zapadnogo sleda avarii na ChAES* [The peculiarities of the anomalous uptake of ¹³⁷Cs 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.
 14. Krasnov VP, Orlov AA, Buzun VA, et al. *Prikladnaya radioekologiya lesa* [Applied radioecology of the forest]. Zhytomyr: Poles'e; 2007. 680 p. Ukrainian.
 15. Shcheglov AI. *Biogeokhimiya tekhnogennykh radionuklidov v lesnykh ekosistemakh. V: 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]. In: *By the Chernobyl accident*. Moscow: Nauka; 2000. 268 p. Russian.
 16. Yurkevich ID, Lovchii NF, Gel'tman VS. *Les Belorusskogo Poles'ya (geobotanicheskie issledovaniya)* [Forests of the Belarusian Polesie (geobotanical research)]. Minsk: Nauka i tekhnika; 1977. 288 p. Russian.
 17. Yurkevich ID. *Vydelenie tipov lesa pri lesoustroitel'nykh rabotakh* [Identification of forest types in forest managements operations]. Minsk: Nauka i tekhnika; 1980. 120 p. Russian.
 18. Zabrodskii VN, Uglyanets AV, Kalinin VN. *Vliyanie tipa lesa i tipa lesorastitel'nykh uslovii na perekhod ¹³⁷Cs i ⁹⁰Sr v drevesinu sosny v zone otchuzhdeniya ChAES po dannym radiatsionnogo obsledovaniya lesesek* [Influence of forest type of forest conditions on the transfer ¹³⁷Cs and ⁹⁰Sr to pine wood in the Chernobyl NPP exclusion zone according to the results of the radiation examination of cutting areas]. In: *Sovremennyye problemy radiobiologii – 2021* [Contemporary issues of radiobiology – 2021]. Minsk: IVC Minfina; 2021. p. 68–72. Russian.
 19. Gurov VN, Kertsman VN. *Rel'ef kak faktor vozmozhnogo peremeshcheniya radionuklidov* [Relief as a factor of possible movement of radionuclides]. In: *Geokhimicheskie puti migratsii iskusstvennykh radionuklidov v biosfere* [Geochemical migration routes of artificial radionuclides in the biosphere]. Pushchino: [publisher unknown]; 1991. p. 17. Russian.
 20. Fesenko SV, Soukhova NV, Sanzharova NI, et al. *Identification of processes governing long-term accumulation of ¹³⁷Cs by forest trees following the Chernobyl accident*. *Radiation and Environmental Biophysics*. 2001;40:105–113.
 21. Baraboshkin AV, Karbanovich LN, Bulko NI, et al. *Faktory vliyayushchie na zagryaznenie tseziem-137 drevesiny osnovnykh lesoobrazuyushchikh porod* [Factors affecting the contamination of cesium-137 wood of the main forest-forming species]. *Problemy lesovedeniya i lesovodstva*. 2005;63:451–454. Russian.