

УДК 582.475.4:57.084.2:574.2:539.163:539.1.074

ДОЗЫ ОБЛУЧЕНИЯ СОСНОВЫХ НАСАЖДЕНИЙ В БЕЛОРУССКОМ СЕКТОРЕ 30-КИЛОМЕТРОВОЙ ЗОНЫ ВОКРУГ ЧЕРНОБЫЛЬСКОЙ АЭС НА СОВРЕМЕННОМ ЭТАПЕ

© 2023 г. Т. В. Переволоцкая¹, А. Н. Переволоцкий¹, С. А. Гераськин^{1,*}

¹Всероссийский научно-исследовательский институт радиологии и агроэкологии, Обнинск, Россия

*E-mail: stgeraskin@gmail.com

Поступила в редакцию 19.12.2022 г.

После доработки 30.03.2023 г.

Принята к публикации 05.04.2023 г.

Представлены результаты оценки доз внешнего и внутреннего облучения древесного яруса сосновых насаждений, произрастающих на северном следе белорусского сектора 30-километровой зоны вокруг ЧАЭС на современном этапе. В наиболее загрязненных лесных насаждениях суммарная доза внешнего и внутреннего облучения древостоя может достигать 160 мГр/год. Внутреннее облучение формируется β -излучением накопленных надземной фитомассой радионуклидов, его вклад в суммарную дозу может составлять 80%. Внешнее облучение древостоя определяется γ -излучением находящегося в почве ^{137}Cs . Полученные результаты имеют важное значение для последующих исследований формирования радиационно-индуцируемых эффектов и оценки последствий облучения живых организмов.

Ключевые слова: радиоактивность, ЧАЭС, радионуклиды, β -излучение, γ -излучение, аварийные радиоактивные выпадения, поглощенная доза, сосновые насаждения

DOI: 10.31857/S0869803123030116, EDN: XZPJL

Одной из важных задач, возникающих при оценке радиационного воздействия на живые организмы, является расчет доз их внешнего и внутреннего облучения. При этом научный интерес к биоте, как объекту радиационного воздействия, хотя и актуализировался достаточно давно [1–3], но тем не менее нашел свое отражение только в последнее время в виде конкретных расчетных методик [4, 5]. К сожалению, многие вопросы оценки доз внешнего и внутреннего облучения биоты остаются открытыми и требуют своего решения. Прежде всего это касается одного из референтных организмов — сосны, для которой до настоящего времени не разработана методика оценки доз облучения как генеративных органов, так и активно пролиферирующих тканей [4, 5]. Актуальность дозиметрических оценок для этого организма определяется и тем, что после крупных радиационных аварий именно в сосновых насаждениях были обнаружены ярко выраженные радиационно-индуцируемые эффекты, вплоть до гибели деревьев на значительной территории [6–10]. В настоящее время 30-километровая зона вокруг ЧАЭС, являясь своеобразной полевой лабораторией, предоставляет возможность изучения эффектов хронического радиационного воздействия на биоту, при этом важное значение имеет

оценка доз внешнего и внутреннего облучения исследуемых организмов. В предыдущих публикациях, акцентируя внимание на проблеме дозиметрических оценок, мы представили результаты основных этапов разработки миграционно-дозиметрической модели распределения радионуклидов в сосновых насаждениях, ее верификации на основании проведенных наблюдений и ретроспективной оценке доз внешнего β - и γ -облучения в первый год после аварийных выпадений ЧАЭС [11–13]. Полученные результаты позволили определить пути и возможности продолжения исследований в данном направлении. Таким образом, целью настоящего исследования является оценка доз внешнего и внутреннего облучения элементов надземной фитомассы сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) на современном этапе для последующего изучения возможных последствий радиационного воздействия.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДИКА

Объектами исследований были выбраны чистые сосновые насаждения искусственного происхождения II класса возраста II бонитета с полнотой 0,7. Состав насаждений 10С+Б, тип лесорастительных условий — А2, тип леса — сосняк

Таблица 1. Аргументы модифицированной интегрально-показательной функции z_1 и z_2
Table 1. Parameters of modified integral-exponential function z_1 and z_2

Источник излучения	Параметры	
	z_1	z_2
Надземная фитомасса древесных растений (2)	$\mu_a (H - h_m) \rho_f / \rho_a$	$\mu_a h_m \rho_f / \rho_a$
Верхний 20-сантиметровый слой почвы (1)	$\mu_a (h_m \rho_f) / \rho_a$	$\mu_a (h_m \rho_f + l_s \rho_s) / \rho_a$

мшистый. Подрост и подросток отсутствуют, в напочвенном покрове преобладают мхи Шребера (*Pleurozium schreberi* (Brid.) Mitt. до 70%) и дикранум (*Dicranum polysetum* Sw., до 25%). Почва на экспериментальных участках дерново-подзолистая, слабоподзоленная, развивающаяся на рыхлом мелкозернистом песке, подстилаемая рыхлым средне- или мелкозернистым песком.

Географические координаты и радиационная обстановка на экспериментальных участках приведены в табл. 1. Три экспериментальных участка (Гн, Мс и Кл) расположены непосредственно в белорусском секторе 30-километровой зоны и в первые месяцы после аварии на ЧАЭС характеризовались разным составом радиоактивных выпадений [13, 14]. Контрольные участки Кз-1 и Кз-2 находятся в Козелужском лесничестве Хойникского лесхоза и характеризуются минимальным радиоактивным загрязнением. На каждом участке были заложены пробные площади прямоугольной формы (50 × 50 м) с равнинным рельефом, характерным составом древесной растительности и напочвенного покрова для исследуемого типа леса.

Для определения плотности загрязнения почвы выполняли отбор проб почвы с помощью пробоотборника (Ø40 мм) на глубину до 200 мм в пяти точках, из которых готовилась одна смешанная проба.

Для изучения содержания радионуклидов в элементах надземной фитомассы сосны обыкновенной на каждой пробной площади осуществляли отбор проб древесины с 20–25 деревьев с помощью приростного бурава, коры ствола с 5–7 деревьев специальным пробоотборником (Ø40 мм) [14, 15]. Отбор проб хвои текущего и прошлого годов формирования, веток, побегов и шишек осуществляли не менее чем с 10 деревьев с помощью секатора длиной 10 м. В камеральных условиях образцы почвы и растений высушивали до воздушно-сухого состояния, измельчали на лабораторной мельнице и подвергали радиометрическому анализу.

Определение удельной активности радионуклидов ^{137}Cs и ^{241}Am в пробах растений проводили на многоканальном γ -спектрометре Canberra (США) с широкополосным германиевым детектором ВЕ 2020. Относительная эффективность

регистрации составила 9%, разрешение от 0.35 кэВ (для энергии 5.9 кэВ) до 1.9 кэВ (для энергии 1.332 МэВ), минимально детектируемая активность 0.7 Бк. Для определения ^{241}Am выполняли озоление проб растений. Радиохимическое выделение ^{90}Sr в пробах проводили по стандартной методике с радиометрическим окончанием на β -спектрометре “Прогресс” (Россия), минимально детектируемая активность 10 Бк.

Удельную активность ^{238}Pu и $^{239+240}\text{Pu}$ оценивали методом α -спектрометрии на полупроводниковом α -спектрометре “МУЛЬТИРАД-АС” (Россия) с ионно-имплантированным кремниевым детектором с предварительным радиохимическим выделением. Энергетический диапазон для α -частиц составлял 0.5–10 МэВ. Время измерений выбирали в зависимости от активности источника и требуемой точности измерений. В среднем, на измерение одного образца уходило 16–18 ч. Радиохимическое выделение включало в себя полное разложение проб с получением 7.5 моль/л азотнокислого раствора изотопов плутония, экстракционно-хроматографическое выделение изотопов плутония, проведение элюирования, получение спектрометрического источника плутония путем фильтрования осадка с последующим осаждением с фторидом лантана.

Основная относительная погрешность измерений не превышала 20%. Калибровку спектрометров по энергии и эффективности проводили с применением аттестованных калибровочных источников.

Мощность амбиентного эквивалента дозы внешнего γ -излучения измеряли дозиметром МКС-АТ1117М (Россия) с блоком детектирования БДКГ-04. Эффективность регистрации квантов составляла от 0.1 до 0.05 отн. ед. в диапазоне энергии γ -излучения 0.05–3 МэВ. Основная относительная погрешность измерения мощности дозы в диапазоне от 0.1 до 10^6 мкЗв/ч не превышала 20%. Каждое измерение мощности дозы осуществляли до достижения статистической погрешности счета менее 5%. Результаты измерения мощности амбиентного эквивалента дозы пересчитывали в мощность поглощенной дозы внешнего γ -излучения с применением пересчетного коэффициента 1.33 [15, 16]. Из рассчитанного значения мощности поглощенной дозы вычитали

величину естественного радиационного фона 0.058 мкГр/ч, установленную в типе лесорастительных условий А2 [17]. Оценку поглощенной дозы внешнего γ -облучения надземной фитомассы получали путем интегрирования исходя из продолжительности облучения.

Оценка дозы внешнего γ -облучения надземной фитомассы выполнена с применением термолюминесцентных дозиметров TESTO 622, размещенных в кронах деревьев с 22.06.2021 г. по 12.05.2022 г. При оценке дозы учитывали время нахождения дозиметров до момента установки и от момента снятия до проведения измерения дозы в лаборатории при нахождении в условиях внешнего облучения 0.1 ± 0.03 мкГр/ч. Измерения дозы выполняли на автоматизированном комплексе индивидуального дозиметрического контроля АКВДК-302. Полученные величины тканезэквивалентных доз пересчитывали на величину поглощенной дозы с учетом коэффициента 1.33 [15, 16], длительности облучения дозиметра в насаждении и приводили к одинаковой размерности.

Поглощенные дозы внешнего и внутреннего облучения оценивали в воздушно-растительной среде кроны сосновых насаждений экспериментальных участков, а также для генеративных органов (семян, формирующихся в шишках) и хвои прошлого года формирования (на которой в последующем проводили исследования антиоксидантного и фитогормонального статуса растений).

Расчеты мощности дозы внешнего γ -излучения в кронах древесных растений на высоте h_m от поверхности почвы проводили на основе интегрирования дозовой функции точечного источника излучения с учетом фактора накопления рассеянного излучения, аппроксимированного двухэкспоненциальной функцией Тейлора [18]. Предполагали, что распространение излучения происходит от бесконечно протяженных в продольном направлении источников излучения конечной толщины, расположенных за защитой. Рассматривали два источника внешнего γ -излучения, определяющих формирование облучения надземной фитомассы в насаждении на произвольной высоте h_m от поверхности почвы (рис. 1):

– от верхнего 20-сантиметрового слоя почвы плотностью $\rho_s = 1200$ кг/м³ и удельной активностью SA^s . Слой воздушно-растительной среды с плотностью ρ_f между источником и приемником излучения на высоте h_m играл роль защиты;

– от надземной фитомассы древесных растений протяженностью H и удельной активностью однородной воздушно-растительной среды SA^f , состоящей из элементов надземной фитомассы

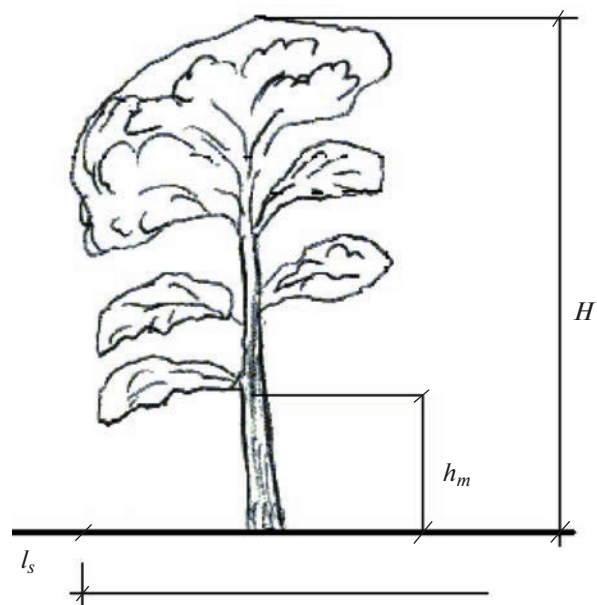


Рис. 1. Основные параметры сосновых насаждений, применяемые в дозиметрической модели.

Fig. 1. The main parameters of pine stands used in the dosimetric model.

сосны обыкновенной и заполняющего промежутки между ними атмосферного воздуха.

Мощность дозы от γ -излучения находящихся в почве радионуклидов рассчитывали по формуле, Гр/с [18]:

$$D_{\gamma}^{\text{ext},s} = 2\pi\Gamma\rho_a SA^s [E_2^*(z_1) - E_2^*(z_2)]/\mu_a, \quad (1)$$

где Γ – γ -постоянная радионуклида, Гр м² Бк⁻¹ с⁻¹; SA^s – удельная активность в почве, Бк/кг; μ_a – линейный коэффициент ослабления γ -излучения в воздухе, м⁻¹ [19]; ρ_a – плотность воздуха при стандартных условиях, кг/м³; $E_2^*(z)$ – модифицированная интегрально-показательная функция второго рода [18]; z_1 и z_2 – параметры модифицированной интегрально-показательной функции (табл. 1).

Мощность дозы от γ -излучения находящихся в элементах фитомассы радионуклидов определяли по формуле, Гр/с [18]:

$$D_{\gamma}^{\text{ext},f} = 2\pi\Gamma\rho_a SA^f \times \left[2 \left(\frac{A}{1 + \alpha_1} + \frac{1 - A}{1 + \alpha_2} \right) - E_2^*[z_1] - E_2^*[z_2] \right] / \mu_a, \quad (2)$$

SA^f – удельная активность в однородной воздушно-растительной среде древостоя (включает хвою всех возрастов, ветки с корой, древесину и кору ствола), Бк/кг [13].

Учитывая сильную проникающую способность γ -квантов, считали, что поглощенная доза

γ -облучения для всех элементов фитомассы кроны эквивалентна формируемой в воздушно-растительной среде на заданной высоте от поверхности почвы и определяется длительностью облучения и мощностью дозы внешнего γ -излучения согласно (1) и (2).

Расчет мощности дозы внешнего β -излучения (Гр/с) в середине кроны сосновых насаждений проводили путем интегрирования дозовой функции точечного источника излучения с единственным спектром [20]:

$$D_{\beta}^{\text{ext,gr}} = 1.6 \times 10^{-13} V A^{\text{gr}} a_{21} n_{\beta} \bar{E}_{\beta} \times [P_1(h_{\text{gr}}) + P_2(h_{\text{gr}}) + P_3(h_{\text{gr}})] / 2\pi, \quad (3)$$

где $V A^{\text{gr}}$ — объемная активность β -излучающего радионуклида в однородной воздушно-растительной среде кроны (включает хвою всех возрастов, ветки с корой, кроновую часть древесины и коры ствола), Бк/см³; a_{21} — пересчетный коэффициент для перехода к воздушно-эквивалентной среде, принимается равным 0.89 [15]; n_{β} — выход на распад β -излучения, отн. ед.; $\bar{E}_{\beta}$ — средняя энергия β -излучения на распад, МэВ; $P_1(h_{\text{gr}})$, $P_2(h_{\text{gr}})$ и $P_3(h_{\text{gr}})$ — слагаемые величины мощности дозы [20, 21]; h_{gr} — половина длины кроны дерева согласно [13].

Предполагали, что поглощенная доза внешнего β -облучения элементов надземной фитомассы древесных растений определяется длительностью облучения и мощностью дозы внешнего β -излучения в середине кроны деревьев с учетом коэффициента ослабления излучения в зависимости от его максимальной энергии и толщины покровных тканей [21]. Консервативно принимали массовую толщину покровной ткани 0.007 г/см² и критической к действию излучения — 0.14 г/см² неизменной на протяжении времени облучения. Для хвои, из-за ее малых размеров, принята поглощенная доза внешнего β -облучения, эквивалентная сформированной в воздушно-растительной среде.

Биометрические характеристики сосновых насаждений приняты согласно таблицам хода роста и биологической продуктивности модальных сосновых насаждений северной Евразии [22].

Поглощенную дозу внутреннего α -облучения находящихся внутри шишек семян и хвои рассчитывали исходя из предположения о распространении частиц в бесконечно протяженной среде по сравнению с величиной их свободного пробега. Величина свободного пробега α -частиц не превышала 4×10^{-5} м и условие распространения излучения в бесконечной среде, в целом, соблюдалось. При расчете поглощенной дозы внутреннего β -облучения применена поправка s_{β} , отражающая изменение дозы в зависимости от разме-

ров облучаемого организма и максимального пробега частиц [23]. Для упрощения расчетов шишки были представлены в виде сферы диаметром 0.02 м, а хвоя — цилиндра с диаметром 0.001 м в поперечном направлении.

Поглощенная доза внутреннего α - и β -облучения для шишек и хвои может быть выражена, Гр/с:

$$D_{\alpha(\beta)}^{\text{in}} = 1.6 \times 10^{-13} S A \bar{E}_{\alpha(\beta)} n_{\alpha(\beta)} k_{\alpha(\beta)} s_{\beta}, \quad (4)$$

где SA — удельная активность радионуклида в шишках или хвое, Бк/кг; $\bar{E}_{\alpha(\beta)}$ — средняя энергия $\alpha(\beta)$ -частиц, МэВ/распад; $n_{\alpha(\beta)}$ — выход на распад соответствующего вида ионизирующего излучения, отн. ед.; $k_{\alpha(\beta)}$ — взвешивающий коэффициент относительной биологической эффективности излучения, отн. ед. Для α -излучения k_{β} принят 10. Поскольку β -излучение в рамках данной дозиметрической модели невозможно разделить на высоко- и низкоэнергетичное, k_{β} принят равным 1 во избежание излишней консервативности в расчете дозы [5]; s_{β} — коэффициент, учитывающий изменение дозы внутреннего облучения в зависимости от размеров облучаемого организма и максимального пробега частиц [23].

Расчеты мощности дозы по внешнему и внутреннему β -облучению выполняли для каждого β -спектра ¹³⁷Cs, ⁹⁰Sr и дочернего ⁹⁰Y (для двух последних предполагали их нахождение в состоянии радиоактивного равновесия в растении) и находили суммарную мощность дозы по каждому радионуклиду. Данные по средней и максимальной энергии, выходе на распад каждого β -спектра принимали согласно [24].

Для оценки дозы внутреннего γ -облучения шишек от инкорпорированных γ -излучающих радионуклидов при практических расчетах применена формула [25]:

$$D_{\gamma}^{\text{in}} = S A \rho g, \quad (5)$$

где ρ — плотность свежих шишек, кг/м³ (принята равной плотности воды); g — средний геометрический фактор, $g = 0.0942$ м [25].

РЕЗУЛЬТАТЫ

Радиационная обстановка и радиоактивное загрязнение фитомассы сосны обыкновенной на экспериментальных участках. Наибольшая плотность загрязнения почвы ¹³⁷Cs наблюдается на экспериментальном участке Кл (~8760 кБк/м²), на этом же участке зафиксирована максимальная доза внешнего γ -излучения 9.5 мкЗв/ч (табл. 2). Участок Мс характеризуется наибольшим уровнем радиоактивного загрязнения ⁹⁰Sr (1760 кБк/м²) и трансурановыми элементами (до 38 кБк/м² по

Таблица 2. Радиационная обстановка на экспериментальных участках в 2022 г.
Table 2. Estimated density of radionuclide fallouts at experimental sites for 2022 [13]

Участок	Географические координаты	Мощность амбиентного эквивалента дозы, мкЗв/ч	Плотность загрязнения почвы, кБк/м ²				
			¹³⁷ Cs	⁹⁰ Sr	²³⁸ Pu	²³⁹⁺²⁴⁰ Pu	²⁴¹ Am
Гн	29°48'25.96" в.д. 51°38'58.09" с.ш.	0.24 ± 0.002	241 ± 13.2	43 ± 5.9	1.4 ± 0.4	1.3 ± 0.5	10 ± 3.5
Мс	30°01'49.30" в.д. 51°30'27.86" с.ш.	2.57 ± 0.06	2870 ± 63	1760 ± 70	13 ± 2.6	33 ± 2.1	38 ± 2.4
Кл	30°13'36.48" в.д. 51°33'16.88" с.ш.	9.47 ± 0.35	8760 ± 228	241 ± 18	3.6 ± 0.9	8.7 ± 1.4	27 ± 2.2
Кз-1	29°53'41.93" в.д. 51°58'45.7" с.ш.	0.097 ± 0.004	30 ± 5.1	8 ± 1.8	0.4 ± 0.1	0.9 ± 0.2	2 ± 0.4
Кз-2	29°53'46.86" в.д. 51°58'41.3" с.ш.	0.095 ± 0.004	32 ± 5.4	11 ± 1.9	0.3 ± 0.1	0.8 ± 0.2	3 ± 0.4

²⁴¹Am). Плотность загрязнения почвы радионуклидами из состава аварийного выброса на контрольных участках Кз-1 и Кз-2 самая низкая, а мощность дозы внешнего γ-облучения практически не отличается от фоновой.

По величине удельной активности ¹³⁷Cs элементы надземной фитомассы сосны обыкновенной на экспериментальных участках образуют следующий ряд (табл. 3): хвоя текущего года формирования > хвоя прошлых лет, сучья с корой, шишки, кора ствола > древесина ствола. Как правило, в хвое текущего года формирования удельная активность ¹³⁷Cs в 4–6 раз больше по сравнению с хвоей прошлых лет и сучьях, а также до 20 раз больше по сравнению с древесиной ствола. Шишки и кора ствола занимают промежуточное положение.

Удельная активность ⁹⁰Sr в элементах фитомассы сопоставима между собой и доминирующий элемент выделить сложно. Наиболее часто на исследованных экспериментальных участках наибольшие концентрации ⁹⁰Sr наблюдались в сучьях, коре ствола и шишках, а минимальные — в хвое текущего года формирования.

Концентрация ²³⁹⁺²⁴⁰Pu в шишках составила тысячные доли Бк/кг на наиболее загрязненных экспериментальных участках Мс и Кл, а удельная активность остальных трансурановых элементов была ниже минимально детектируемой.

Облучение древостоя экспериментальных участков. Поглощенная доза внешнего γ-облучения в надземной фитомассе формируется, в основном, за счет γ-излучения находящегося в почве ¹³⁷Cs (табл. 4). Внешнее γ-излучение накопленного в элементах фитомассы кроны радионуклида не превышает 10%. Вклад всех остальных радионуклидов во внешнее γ-облучение меньше почти на

четыре математических порядка по всей высоте древостоя и им можно пренебречь. На наиболее загрязненном ¹³⁷Cs экспериментальном участке Кл доза облучения по внешнему γ-излучению достигает 57 мГр/год на высоте 1 м и 48 мГр/год в кроне, что хорошо согласуется с результатами измерений на основе термолюминесцентных дозиметров.

Доза внешнего β-облучения в однородной воздушно-растительной среде кроны оценена от ~0.3 мГр/год на контрольных участках Кз-1 и Кз-2 до 20 мГр/год на участке Кл (табл. 5). Такая же доза наиболее вероятна для хвои при принятых допущениях в выполненных расчетах. Для большей части органов и тканей сосны, покрытых малочувствительной покровной тканью, будет происходить ослабление внешнего β-облучения более чем в 2 раза, и доза облучения составит <10 мГр/год на участке Мс и <14 мГр/год — на Кл. На участке Гн доза облучения не превысит 1 мГр/год. Доза внешнего β-облучения в кроне от излучения находящихся в почве радионуклидов не учитывалась, поскольку β-частицы от этого источника излучения генеративных органов практически не достигают.

Доза внутреннего β-облучения находящихся в шишках семян оценивается в диапазоне 100–140 мГр/год на наиболее загрязненных экспериментальных участках Мс и Кл, менее 6 мГр/год на участке Гн (табл. 6). При этом вклад ¹³⁷Cs и ⁹⁰Sr в дозу внутреннего облучения примерно одинаков на участке Кл, что связано с наибольшим содержанием радиоцезия в элементах надземной фитомассы древостоя, хотя энергия β-излучения ⁹⁰Sr и его дочернего ⁹⁰Y больше. На остальных экспериментальных участках доза внутреннего облучения семян формируется, в основном, ⁹⁰Sr.

Таблица 3. Удельная активность радионуклидов в основных компонентах сосновых насаждений экспериментальных участков в 2022 г., Бк/кг на воздушно-сухую массу**Table 3.** Specific activity of radionuclides in the main components of pine stands of experimental plots in 2022, Bk/kg per air-dry mass

Радионуклид	Элемент надземной фитомассы					
	хвоя 1-летняя	хвоя 2-летняя	шишки	сучья	кора ствола	древесина ствола
Гн						
^{137}Cs	18520 ± 1071	2537 ± 278	1355 ± 54	3057 ± 342	2028 ± 341	441 ± 134
^{90}Sr	552 ± 85	597 ± 90	905 ± 137	920 ± 96	663 ± 70	560 ± 23
$^{239+240}\text{Pu}$	—	—	0.0013 ± 0.00052	—	—	—
Мс						
^{137}Cs	83630 ± 2660	21070 ± 730	30340 ± 1180	22520 ± 1030	11690 ± 795	3613 ± 415
^{90}Sr	9059 ± 1360	8647 ± 1298	21700 ± 3260	23145 ± 2134	8940 ± 1345	7073 ± 760
$^{239+240}\text{Pu}$	—	—	0.0041 ± 0.0014	—	—	—
Кл						
^{137}Cs	324500 ± 9000	58950 ± 1970	54030 ± 2100	56070 ± 1850	73040 ± 2440	17320 ± 885
^{90}Sr	4830 ± 730	8995 ± 1350	9820 ± 1477	8178 ± 1228	13270 ± 1994	6649 ± 549
$^{239+240}\text{Pu}$	—	—	0.0024 ± 0.00096	—	—	—
Кз-1						
^{137}Cs	2422 ± 460	495 ± 103	452 ± 20	582 ± 133	406 ± 89	133 ± 42
^{90}Sr	264 ± 40	365 ± 55	299 ± 46	118 ± 18	235 ± 101	151 ± 89
$^{239+240}\text{Pu}$	—	—	<0.001	—	—	—
Кз-2						
^{137}Cs	1674 ± 214	320 ± 48	350 ± 34	443 ± 96	306 ± 89	86 ± 30
^{90}Sr	323 ± 49	376 ± 57	367 ± 56	235 ± 42	274 ± 42	156 ± 16
$^{239+240}\text{Pu}$	—	—	<0.001	—	—	—

В целом суммарная доза облучения в кронах древесных растений определяется содержанием радионуклидов в почве экспериментальных участков, наибольшая доза формируется на участках Кл и Мс — до 160 мГр/год, а минимальная — на контрольных участках Кз-1 и Кз-2 — менее 2.5 мГр/год.

ОБСУЖДЕНИЕ

Полученные в настоящей работе ряды по удельной активности ^{137}Cs и ^{90}Sr в элементах надземной фитомассы сосны обыкновенной сопоставимы с таковыми на начало 2000-х годов, что свидетельствует об установившихся процессах корневого поступления в системе “почва—древесное растение” на отдаленном этапе после аварийных радиоактивных выпадений [14, 26]. Цезий, как типичный щелочной металл с высокой биологической активностью, проявляет сродство биогенному калию, накапливаясь в физиологиче-

ски активных органах и тканях растений [27]. Радиоактивный стронций, как неизотопный аналог кальция, накапливается в составе оксалата этого элемента в клеточных стенках стареющих тканей с низкой физиологической активностью [27]. При этом корневое поступление ^{90}Sr в растение и последующее перераспределение в нем происходит более равномерно, что определяет менее рельефные различия в удельной активности между отдельными органами и тканями сосны обыкновенной. Удельная активность трансурановых элементов в надземной фитомассе, как правило, ниже минимально детектируемой, что определяется как их малой активностью в почве (менее единиц Бк/кг), так и незначительным переходом в системе “почва—растение” [28].

Рассматривая проблему расчетных оценок доз внешнего и внутреннего облучения надземной фитомассы древесных растений, следует отметить сложность объекта исследования и недостаточность экспериментальных данных, в силу чего

Таблица 4. Результаты расчетов дозы внешнего γ -облучения древостоя экспериментальных участков, мГр/год (без учета естественного радиационного фона)**Table 4.** Results of calculations of the dose of external gamma-irradiation of the stand of experimental plots, mGy/year (without taking into account the natural radiation background)

Радионуклид	Источник излучения	Экспериментальные участки				
		Гн	Мс	Кл	Кз-1	Кз-2
Доза, рассчитанная согласно (1) и (2)						
На высоте 1 м						
¹³⁷ Cs	Почва	1.1	15.2	53.4	0.19	0.18
	Наземная фитомасса	0.12	0.78	3.15	0.023	0.017
⁹⁰ Sr	Почва	9.6E-06	4.2E-04	2.5E-04	2.2E-06	2.5E-06
	Наземная фитомасса	7.1E-05	1.1E-03	9.6E-04	2.1E-05	2.4E-05
²³⁸ Pu	Почва	<nE-10	<nE-09	<nE-09	<nE-10	<nE-10
²³⁹⁺²⁴⁰ Pu	Почва	<nE-09	<nE-08	<nE-08	<nE-09	<nE-09
²⁴¹ Am	Почва	2.6E-04	1.5E-03	1.2E-03	8.7E-05	8.7E-05
Сумма	—	1.26	16.0	56.6	0.21	0.19
На высоте отбора генеративных органов (10 м)						
¹³⁷ Cs	Почва	0.94	12.5	44.6	0.16	0.15
	Наземная фитомасса	0.13	0.88	3.5	0.025	0.017
⁹⁰ Sr	Наземная фитомасса	8.4E-05	1.2E-03	1.0E-03	2.3E-05	2.6E-05
²⁴¹ Am	Почва	1.8E-04	8.7E-04	7.0E-04	5.4E-05	5E-05
Сумма	—	1.1	13.4	48.2	0.18	0.16
Доза внешнего облучения, полученная инструментальными методами						
С помощью термолюминесцентной дозиметрии (за вычетом времени нахождения в лаборатории)						
—	Наземная фитомасса и почва	0.89	19.6	57.7	0.15	0.11
На основе измерений с помощью дозиметра						
—	Наземная фитомасса и почва	1.06	16.9	61.1	0.18	0.16

вопросы верификации дозиметрических расчетов остаются открытыми. Выполненные нами расчеты дозы внешнего γ -облучения древостоя согласно (1) и (2) удовлетворительно согласуются с полученными на основе инструментальных измерений. Так, рассчитанная доза внешнего γ -излучения не отличается по сравнению с полученной на основе термолюминесцентных дозиметров и измеренной с помощью МКС-1117М более чем на 40 и на 20% соответственно.

Сравнение результатов расчета доз внешнего γ -облучения древостоя (табл. 4) с выполненными на основе коэффициентов дозового преобразования [4, 5] не вполне корректно, поскольку последние получены для радионуклидов, равномерно распределенных в 10-сантиметровом слое почвы, что не соответствует современным методикам и может привести к недооценке содержания радионуклидов в почве [29]. Исследование возможности применения дозиметрической модели (1) проведено путем сравнения расчетов дозы внеш-

Таблица 5. Результаты расчетов мощности дозы внешнего β -облучения элементов фитомассы в кронах древесных растений экспериментальных участков, мГр/год (без учета естественного радиационного фона)**Table 5.** Results of calculations of the dose rate of external β -irradiation of phytomass elements in the crowns of woody plants of experimental plots, mGy/year (excluding natural background radiation)

Радионуклид	Экспериментальные участки				
	Гн	Мс	Кл	Кз-1	Кз-2
Без учета ослабления покровными тканями					
^{137}Cs	0.51	3.1	11.3	0.10	0.08
^{90}Sr	0.79	12.7	9.4	0.21	0.25
Сумма	1.30	15.8	20.7	0.31	0.33
С учетом коэффициента ослабления >0.55					
^{137}Cs	<0.37	<2.3	<8.3	<0.07	<0.05
^{90}Sr	<0.43	<7.0	<5.2	<0.13	<0.14
Сумма	<0.80	<9.3	<13.5	<0.20	<0.19

Таблица 6. Результаты расчетов дозы внутреннего облучения фитомассы сосны обыкновенной на экспериментальных участках, мГр/год

Table 6. Results of calculations of the dose of internal irradiation of the phytomass of scots pine at experimental sites, mGy/year

Экспериментальные участки	Радионуклид			
	^{137}Cs		^{90}Sr	$^{239+240}\text{Pu}$
	β	γ	(β)	(α)
Семена				
Гн	1.3	0.1	4.5	3.4E–04
Мс	29	2.2	107	1.1E–03
Кл	52	3.9	48	6.2E–04
Кз-1	0.4	0.03	1.5	<2.6E–04
Кз-2	0.3	0.02	1.8	<2.6E–04
Хвоя прошлого года формирования				
Гн	0.6	—	0.3	3.4E–04
Мс	4.9	—	4.0	1.1E–03
Кл	14	—	4.1	6.2E–04
Кз-1	0.1	—	0.2	<2.6E–04
Кз-2	0.1	—	0.2	<2.6E–04

него γ -облучения на ее основе и с применением коэффициентов дозового преобразования для одинакового источника излучения — 10-сантиметрового слоя почвы с равномерно распределенной удельной активностью 1 Бк/кг ^{54}Mn , ^{60}Co , ^{65}Zn , $^{95}\text{Zr} + ^{95}\text{Nb}$, ^{134}Cs , $^{137}\text{Cs} + ^{137\text{m}}\text{Ba}$, $^{144}\text{Ce} + ^{144}\text{Pr}$ в воздушно-растительной среде с плотностью 2.6 кг/м³. Установлено, что рассчитанные обоими методами дозы внешнего облучения не отличаются более чем на 15%, при этом большую гибкость в выполнении расчетов демонстрирует дозиметрическая модель, основанная на интегрировании дозовой функции точечного источника излучения.

Таким образом, согласно (1) и (2), доза внешнего γ -облучения без учета естественного фона составит от 0.2 мГр/год на контрольных участках Кз-1 и Кз-2 и до ~60 мГр/год на экспериментальном участке Кл (табл. 4). При этом основной вклад в формирование (до 90%) принадлежит γ -излучению находящихся в почве радионуклидов. Основным дозообразующим радионуклидом по внешнему γ -излучению остается ^{137}Cs , определяя до 99% дозы γ -облучения. Поглощенная доза от остальных радионуклидов из состава аварийного выброса составляет менее единиц мГр/год и ими можно пренебречь в рассматриваемой радиоэкологической ситуации.

Международные рекомендации в области дозиметрии биологических объектов не рассматри-

вают внешнее β -излучение находящихся в окружающей среде радионуклидов как фактор формирования дозы внешнего облучения [4, 5]. Вместе с тем показано, что в однородной воздушно-растительной среде, плотность которой сопоставима с таковой для воздуха, внешнее β -излучение может сформировать в растениях на порядок большую дозу облучения по сравнению с γ -излучением [6, 9, 10, 21, 30–33]. У сосны обыкновенной это справедливо для верхушечных точек роста и хвои, однако не приведет к внешнему облучению семян, находящихся внутри шишек и защищенных малочувствительными тканями, а также камбия и флоэмы под слоем коры. Кроме того, по мере роста и развития растения происходит изменение толщины покровной и чувствительной к действию излучения ткани, поэтому оценка доз внешнего β -облучения выполнена только в первом приближении. В однородной воздушно-растительной среде кроны доза внешнего β -облучения сопоставима с таковой для γ -облучения, однако уже при минимальной массовой толщине 0.007 г/см² у покровной ткани и 0.14 г/см² у чувствительной ткани доза может уменьшаться в 2 раза (табл. 5). По мере роста и развития растений наиболее вероятно уменьшение дозы внешнего облучения чувствительной ткани.

Оценка дозы внутреннего облучения наиболее точно может быть выполнена для α -излучающих радионуклидов, поскольку пробег α -частиц внутри элементов фитомассы многократно превышает их линейные размеры. Соответственно, результаты расчетов дозы для семян и хвои прошлого года сопоставимы и одинаковы с таковыми, полученными на основе коэффициентов дозового преобразования (табл. 6) [4, 5].

Доза внутреннего β -облучения шишек и хвои находится в прямой зависимости от активности дозообразующих радионуклидов, энергии их излучения и размеров облучаемого элемента фитомассы (табл. 6). Соответственно самые большие дозы облучения сформированы в шишках и семенах на участках Мс и Кл. При этом на участке Кл вклад ^{137}Cs в дозу внутреннего β -облучения семян сопоставим с таковым показателем по ^{90}Sr , а на остальных участках доминирует ^{90}Sr . Внутреннее β -облучение хвои на экспериментальных участках 30-километровой зоны определяет, в основном, ^{137}Cs , а на контрольных — ^{90}Sr (табл. 6). Различия по вкладу ^{137}Cs и ^{90}Sr в дозу внутреннего β -облучения определяются практически полным поглощением энергии β -излучения обоих радионуклидов в шишках, размеры которых больше длины пробега β -частиц. Поперечные размеры хвои примерно в 1,6 раза меньше по сравнению с пробегом β -частиц ^{137}Cs и в 10 раз — ^{90}Y , который находится в равновесии с материнским ^{90}Sr . Соответственно для ^{137}Cs происходит более полное

Таблица 7. Результаты расчетов суммарной поглощенной дозы некоторых элементах фитомассы сосны обыкновенной на экспериментальных участках, мГр/год**Table 7.** Results of calculations of the total absorbed dose of some elements of the phytomass of scots pine in experimental sites, mGy/year

Экспериментальные участки	Внешнее облучение		Внутреннее облучение (по всем видам излучения)	Сумма
	β-	γ-		
Облучение семян				
Гн	0.8	1.1	5.9	7.8
Мс	9	13	138	161
Кл	14	48	104	166
Кз-1	0.2	0.2	1.9	2.3
Кз-2	0.2	0.2	2.1	2.5
Облучение хвои прошлого года формирования				
Гн	1.3	1.1	0.9	3.3
Мс	16	13	9	38
Кл	21	48	18	87
Кз-1	0.3	0.2	0.3	0.8
Кз-2	0.3	0.2	0.2	0.7

поглощение энергии электронного излучения, в то время как для ^{90}Y значительная часть β -частиц покидает хвою, не взаимодействуя с ее веществом. Именно по причине различных размеров исследованных элементов фитомассы при сопоставимых концентрациях радионуклида, дозу внутреннего β -облучения в шишках определяют $^{90}\text{Sr} + ^{90}\text{Y}$, а в хвое — ^{137}Cs .

Таким образом, через 35 лет после аварии на ЧАЭС дозы внешнего и внутреннего облучения древесных растений в 30-километровой зоне вокруг станции продолжают оставаться достаточно высокими, достигая 160 мГр/год в семенах и 90 мГр/год в хвое на наиболее загрязненных участках (табл. 7).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассчитаны дозы внешнего и внутреннего облучения элементов надземной фитомассы сосновых насаждений в белорусском секторе 30-километровой зоны вокруг ЧАЭС на современном этапе. Показана удовлетворительная сходимость расчетных и инструментальных методов определения дозы внешнего γ -излучения в лесных насаждениях, что позволяет применять расчетные методы для решения задач оценки внешнего γ -облучения надземной фитомассы. Установлено, что на наиболее загрязненных экспериментальных участках суммарная доза внешнего и внутреннего облучения древостоя может достигать 160 мГр/год, при этом вклад внутреннего β -облучения — до 80%. Внешнее облучение определяется γ -излучением находящегося в почве ^{137}Cs .

Таким образом, в настоящее время в древесном ярусе сосновых насаждений белорусского сектора 30-километровой зоны вокруг ЧАЭС сохраняются достаточно высокие дозы внешнего и внутреннего облучения. Полученные результаты важны не только с точки зрения радиоэкологии, но и для последующих исследований формирования радиационно-индуцируемых эффектов.

БЛАГОДАРНОСТИ

Статья подготовлена при поддержке гранта РНФ № 21-16-00004.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вопросы радиоэкологии: Сб. статей / Под ред. В.И. Баранова. М.: Атомиздат, 1968. 330 с. [Voprosy radioekologii: Sb. st. / Pod red. V.I. Baranova. M.: Atomizdat, 1968. 330 s. (In Russ.)]
2. Проблемы лесной радиоэкологии: Сб. науч. тр. Ин-т прикл. геофизики АН СССР / Под ред. Р.М. Алексахина. Вып. 38. М.: Гидрометеиздат, 1979. 75 с. [Problemy lesnoy radioekologii: Sb. nauch. tr. In-t prikl. geofiziki AN SSSR / Pod red. R.M. Alexakhin. Vyp. 38. M.: Gidrometeizdat, 1979. 75 s. (In Russ.)]
3. ICRP Publication 91. A framework for assessing the impact of ionizing radiation on non-human species. Ann. ICRP. 2002. 33 (3). 74 p.
4. ICRP Publication 108. Environmental Protection — the Concept and Use of Reference Animals and Plants. Ann. ICRP 38 (4–6), 2008. 245 p.
5. ICRP Publication 136. Dose Coefficients for Non-human Biota Environmentally Exposed to Radiation. Ann. ICRP 46 (2), 2017. 136 p.

6. Криволюцкий Д.А., Тихомиров Ф.А., Федоров Е.А. и др. Действие ионизирующей радиации на биогеоценоз. М.: Наука, 1988. 240 с. [*Krivolutskiy D.A., Tikhomirov F.A., Fedorov E.A. i dr. Deystviye ioniziruyushchey radiatsii na biogeotsenoz. M.: Nauka, 1988. 240 s. (In Russ.)*]
7. Итоги изучения и опыт ликвидации последствий аварийного загрязнения территорий продуктами деления урана / Под ред. А.И. Бурназяна. М.: Энергоатомиздат, 1990. 144 с. [*Itogi izucheniya i opyt likvidatsii posledstviy aviarnogo zagryazneniya territoriy produktami deleniya urana / Pod red. A.I. Burnazyana. M.: Energoatomizdat, 1990. 144 s. (In Russ.)*]
8. Радиоактивное загрязнение территории Беларуси (В связи с аварией на ЧАЭС) / Под ред. В.И. Парфенова и Б.И. Якушева. Минск: Наука и техника, 1995. 582 с. [*Radioaktivnoye zagryazneniye territorii Belarusi (V svyazi s aviariyei na ChAES) / Pod red. V.I. Parfenova i B.I. Yakusheva. Minsk: Nauka i tekhnika, 1995. 582 s. (In Russ.)*]
9. Абатуров Ю.Д., Абатуров А.В., Быков А.В. и др. Влияние ионизирующего излучения на сосновые леса в ближней зоне Чернобыльской АЭС. М.: Наука, 1996. 240 с. [*Abaturov Yu.D., Abaturov A.V., Bykov A.V. i dr. Vliyanie ioniziruyushchego izlucheniya na sosnovyye lesa v blizhney zone Chernobylskoy AES. M.: Nauka, 1996. 240 s. (In Russ.)*]
10. Козубов Г.М., Таскаев А.И. Радиобиологические исследования хвойных в районе Чернобыльской катастрофы (1986–2001 гг.). М.: ИПЦ Дизайн. Информация. Картография, 2002. 272 с. [*Kozubov G.M., Taskayev A.I. Radiobiologicheskiye issledovaniya khvoynnykh v rayone Chernobylskoy katastrofy (1986–2001 gg.). M.: IPTs Dizayn. Informatsiya. Kartografiya, 2002. 272 s. (In Russ.)*]
11. Perevolotskaya T.V., Perevolotsky A.N., Geras'kin S.A. A Software Tool for Estimating the Absorbed Dose Rate in Pine Stands in the Case of Accidental Radioactive Fallout // *Biol. Bull.* 2022. V. 49. № 12. P. 60–68.
12. Perevolotskaya T.V., Perevolotsky A.N., Geras'kin S.A. Retrospective Assessment of the Formation of the Radiation Situation in Pine Plantations in the First Year after the Chernobyl Accident // *Biol. Bull.* 2022. V. 49. № 12. P. 232–243.
13. Perevolotsky A.N., Perevolotskaya T.V., Geras'kin S.A. Verification of a Migration-Dosimetric Model Describing the Formation of the Radiation Situation in Pine Stands in the First Year after Catastrophic Fallout // *Biol. Bull.* 2022. Vol. 49. № 12. P. 163–171.
14. Переволоцкий А.Н. Распределение ^{137}Cs и ^{90}Sr в лесных биогеоценозах. Гомель: РНИУП “Институт радиологии”, 2006. 255 с. [*Perevolotskiy A.N. Raspre-deleniye ^{137}Cs i ^{90}Sr v lesnykh biogeotsenozakh. Gomel: RNIUP “Institut radiologii”, 2006. 255 s. (In Russ.)*]
15. Saito K., Petoussi-Henss N. Ambient dose equivalent conversion coefficients for radionuclides exponentially distributed in the ground // *J. Nucl. Sc. Tech.* 2014. V. 51. № 10. P. 1274–1287.
16. Рамзаев В.П., Барковский А.Н. К вопросу о связи между амбиентным эквивалентом дозы и поглощенной дозой в воздухе в условиях загрязнения окружающей среды радиоактивным цезием // *Радиационная гигиена*. 2015. Т. 8. № 3. С. 6–20. [*Ramzaev V.P., Barkovskiy A.N. K voprosu o svyazi mezhdu ambientnym ekvivalentom dozy i pogloshchennoy dozoy v vozduhe v usloviyakh zagryazneniya okruzhayushchey sredy radioaktivnym tsiyem // Radiac. Gigiena. 2015. T. 8. № 3. S. 6–20. (In Russ.)*]
17. Переволоцкий А.Н., Переволоцкая Т.В. О содержании ^{40}K , ^{226}Ra и ^{232}Th в лесных почвах Республики Беларусь // *Радиационная биология. Радиоэкология*. 2012. Т. 54. № 2. С. 193–200. [*Perevolotskiy A.N., Perevolotskaya T.V. O soderzhanii ^{40}K , ^{226}Ra i ^{232}Th v lesnykh pochvakh Respubliki Belarus' // Radiats. biologiya. Radioekologiya. 2012. T. 54. № 2. S. 193–200. (In Russ.)*]
18. Спиридонов С.И., Фесенко С.В., Гераськин С.А. и др. Оценка доз облучения древесных растений в отдаленный период после аварии на Чернобыльской АЭС // *Радиационная биология. Радиоэкология*. 2008. Т. 48. № 4. С. 443–449. [*Spiridonov S.I., Fesenko S.V., Geraskin S.A. et al. The dose estimation of wood plants in the long-term after the Chernobyl NPP Accident // Radiats. biologiya. Radioekologiya. 2008. V. 48. № 4. S. 443–449. (In Russ.)*]
19. Машкович В.П., Кудрявцева А.В. Защита от ионизирующих излучений: Справочник. М.: Энергоатомиздат, 1995. 496 с. [*Mashkovich V.P., Kudryavtseva A.V. Zashchita ot ioniziruyushchih izluchenij: Spravochnik. M.: Energoatomizdat, 1995. 496 s. (In Russ.)*]
20. Переволоцкий А.Н., Спиринов Е.В., Переволоцкая Т.В., Спиридонов С.И. Модель расчета мощности поглощенной дозы в вертикальном профиле почвы в острую фазу радиоактивных выпадений // *Радиационная биология. Радиоэкология*. 2018. Т. 58. № 4. С. 415–424. [*Perevolotskiy A.N., Spirin E.V., Perevolotskaya T.V., Spiridonov S.I. Model rascheta moshchnosti pogloshchennoy dozy v vertikalnom profile pochvy v ostruyu fazu radioaktivnykh vypadeniy // Radiats. biologiya. Radioekologiya. 2018. T. 58. № 4. S. 415–424. (In Russ.)*]
21. Perevolotskiy A.N., Perevolotskaya T.V. Migration-dosimetric Model of Grassy-Plant Irradiation Formation in Meadow Biogeocenoses under Constant Radioactive Fallout // *Atomic Energy*. 2020. V. 127. № 5. P. 316–323.
22. Shvidenko A.Z., Schepaschenko D.G., Nilsson S. and Buluy Yu.I. Tables and models of growth and productivity of forests of major forest forming species of northern Eurasia (standard and reference materials). M., 2008. 886 p.
23. Spirin E.V., Alexakhin R.M., Panchenko S.V. Evaluation of the Radiological Safety of a Uranium Deposit for Biota // *Atomic Energy*. 2014. V. 115. № 5. P. 211–216.
24. Колобашкин В.М., Рубцов П.М., Алексанкин В.Г., Ружанский П.А. Бета-излучение продуктов деления: Справочник. М.: Атомиздат, 1978. 472 с. [*Kolobashkin V.M., Rubcov P.M., Aleksankin V.G., Ruzhanskij P.A. Beta-izlucheniye produktov deleniya: Spravochnik. M.: Atomizdat, 1978. 472 s. (In Russ.)*]
25. Моисеев А.А., Иванов В.И. Справочник по дозиметрии и радиационной гигиене. М.: Энергоатомиздат, 1990. 252 с. [*Moiseev A.A., Ivanov V.I. Spravochnik po dozimetrii i radiacionnoj gigiene. M.: Energoatomizdat, 1990. 252 s. (In Russ.)*]

26. *Краснов В.П., Орлов А.А.* Прикладная радиоэкология леса. Житомир: Волинь, 2007. 680 с. [*Krasnov V.P., Orlov A.A.* Prikladnaya radioekologiya lesa. Zhitomir: Volyn', 2007. 680 s. (In Russ.)]
27. *Лир Х., Польстер Г., Фидлер Г.-И.* Физиология древесных растений. М.: Лесная пром-ть, 1983. 424 с. [*Lir H., Pol'ster G., Fidler G.-I.* Fiziologiya drevesnykh rastenij. M.: Lesnaya prom-st', 1983. 424 s. (In Russ.)]
28. Quantification of radionuclide transfer in terrestrial and freshwater environments for radiological assessments (IAEA-TECDOC-1616). Vienna, 2009. 680 p.
29. *Переволоцкий А.Н., Переволоцкая Т.В.* Прогнозирование вертикального распределения ^{137}Cs и ^{90}Sr в лесных почвах Республики Беларусь // Радиационная биология. Радиоэкология. 2012. Т. 52. № 6. С. 625–635. [*Perevolocky A.N., Perevolockaya T.V.* Prognozirovanie vertikal'nogo raspredeleniya ^{137}Cs i ^{90}Sr v lesnykh pochvakh Respubliki Belarusi // Radiats. biologiya. Radioekologiya. 2012. V. 52. № 6. P. 625–635. (In Russ.)]
30. *Тихомиров Ф.А., Сидоров В.П.* Радиационные повреждения леса в зоне ЧАЭС // Биологические и радиоэкологические аспекты аварии на ЧАЭС: Мат. I Междунар. конф., 10–18 сентября 1990 г. М., 1990. С. 18. [*Tikhomirov F.A., Sidopov V.P.* Radiatsionnye povpezhdeniya leca v zone ChAEC // Biologicheskie i radioekologicheskie aspekty aviarii na ChAEC: Mat. I Mezhdunar. konf., 10–18 sentyabrya 1990 g. M., 1990. S. 18. (In Russ.)]
31. *Абатуров Ю.Д., Абатуров А.В., Быков А.В. и др.* Влияние ионизирующего излучения на сосновые леса в ближней зоне Чернобыльской АЭС. М.: Наука, 1996. 240 с. [*Abaturov Yu.D., Abaturov A.V., Bykov A.V. i dr.* The effect of ionizing irradiation on the pine forests in the nearest zone of the Chernobyl nuclear power plant. M.: Nauka, 1996. 240 p. (In Russ.)]
32. *Козубов Г.М., Таскаев А.И.* Радиобиологические исследования хвойных в районе Чернобыльской катастрофы (1986–2001 гг.). М.: ИПЦ Дизайн. Информация. Картография, 2002. 272 с. [*Kozubov G.M., Taskayev A.I.* Radiobiology investigations of conifers in region of the Chernobyl disaster (1986–2001.). M.: PPC Design. Information. Cartography, 2002. 272 p. (In Russ.)]
33. *Спирин Е.В.* Современные проблемы экологической дозиметрии // Радиационная биология. Радиоэкология. 2009. Т. 49. № 3. С. 338–345. [*Spirin E.V.* Sovremennye problemy ekologicheskoy dozimetrii // Radiats. biologiya. Radioekologiya. 2009. T. 49. № 3. S. 338–345. (In Russ.)]

Radiation Doses of Pine Stands in the Belarusian Sector of the 30-Kilometer Zone Around the Chernobyl Nuclear Power Plant at the Present Stage

T. V. Perevolotskaya^a, A. N. Perevolotsky^a, and S. A. Geras'kin^{a,*}

^a*Russian Institute of Radiology and Agroecology, Obninsk, Russia*

^{*}*E-mail: stgeraskin@gmail.com*

The article presents the results of assessing the dose of external and internal irradiation of the tree tier of pine stands growing on the northern trace of the Belarusian sector of the 30-kilometer zone around the Chernobyl nuclear power plant at the present stage. It was found that in the most polluted experimental sites, the total dose of external and internal irradiation of the stand can reach 160 mGy/year. It is shown that internal irradiation is formed by beta radiation of radionuclides accumulated by aboveground phytomass, its contribution to the total dose can be 80%. The external irradiation of the stand is determined by the gamma radiation of ^{137}Cs located in the soil. The results obtained are important for understanding the processes of formation of radiation-induced effects and assessing the effects of irradiation of living organisms.

Keywords: radioactivity, Chernobyl nuclear power plant, radionuclides, β -radiation, γ -radiation, accidental radioactive fallout, absorbed dose, pine plantations