

УДК 539.163:582.475.4:631.45:502.05:614.876

## ВЕРИФИКАЦИЯ МИГРАЦИОННО-ДОЗИМЕТРИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ФОРМИРОВАНИЯ РАДИАЦИОННОЙ ОБСТАНОВКИ В СОСНОВЫХ НАСАЖДЕНИЯХ В ПЕРВЫЙ ГОД ПОСЛЕ АВАРИЙНЫХ ВЫПАДЕНИЙ

© 2022 г. А. Н. Переволоцкий<sup>1</sup>, Т. В. Переволоцкая<sup>1</sup>, С. А. Гераськин<sup>1,\*</sup>

<sup>1</sup> Всероссийский научно-исследовательский институт радиологии и агроэкологии, Обнинск, Россия

\*E-mail: stgeraskin@gmail.com

Поступила в редакцию 26.05.2021 г.

После доработки 26.11.2021 г.

Принята к публикации 22.12.2021 г.

Представлены результаты верификации расчетных блоков миграционно-дозиметрической модели, предназначенной для оценки перераспределения радионуклидов между компартаментами системы “поверхность кроны древесных растений – лесная подстилка или моховой покров – поверхностный слой почвы” при поступлении аварийных радиоактивных выпадений в сосновые насаждения и связанных с ним величин мощности дозы внешнего  $\gamma$ -облучения. Установлено удовлетворительное соответствие рассчитанных и эмпирических данных, полученных при проведении радиоэкологического мониторинга (1987–2008 гг.) в сосновых насаждениях, произрастающих в 30-километровой зоне отчуждения Чернобыльской АЭС. Рассчитанная активность  $^{137}\text{Cs}$  в основных компартаментах исследуемой системы хорошо согласуется с результатами полевых исследований в 1987 г. Различия между измеренными и спрогнозированными величинами мощности поглощенной дозы внешнего  $\gamma$ -облучения на высоте 1 м над поверхностью напочвенного покрова составляют не более 10%, что свидетельствует об адекватном описании основных количественных характеристик поля ионизирующего излучения в сосновых насаждениях на основе разработанного дозиметрического блока модели.

**Ключевые слова:** радиоактивность, поверхность кроны древесных растений, поверхностный слой почвы, радионуклиды,  $\beta$ -излучение,  $\gamma$ -излучение, аварийные радиоактивные выпадения, мощность поглощенной дозы, сосновые насаждения, аварийный радиоактивный выброс

DOI: 10.31857/S0869803122020084

Сосновые насаждения являются одним из наиболее сложных природно-растительных комплексов для проведения радиоэкологических и дозиметрических исследований на ранних этапах после радиоактивных выпадений [1–4]. Это связано, прежде всего, с большой удельной биомассой ассимилирующих органов при значительной длительности их жизненного цикла и медленном поверхностном очищении, совместное действие которых определяет эффективное задерживание радионуклидов поверхностью кроны деревьев при выпадениях и, как следствие, формирование объемных источников ионизирующего излучения [5–7]. Значительные дозы внешнего  $\gamma$ -облучения в зоне распространения радиоактивных выбросов при авариях на НПО “Маяк” и Чернобыльской АЭС и высокая радиочувствительность этого вида древесных растений определили образование разнообразных радиационно-индуцируемых повреждений. Тем не менее при достаточно

полном и подробном описании радиобиологических эффектов хвойных насаждений до сих пор остаются малоизученными вопросы проведения расчетных оценок доз облучения не только древесных растений в целом, но и хвойных в частности. При этом следует указать, что практически все исследования по оценке доз облучения древесных растений осуществляли при помощи дозиметрической аппаратуры, зачастую с большой погрешностью измерения [8, 9]. По этой причине возрастает необходимость разработки и совершенствования миграционных и дозиметрических моделей, описывающих динамику формирования радиационной обстановки в сосновых насаждениях на ранних стадиях после аварийных радиоактивных выпадений. Одним из важных этапов их разработки является процесс верификации, позволяющий оценить соответствие расчетных и эмпирических дозовых показателей. При этом следует констатировать недостаточное количество

**Таблица 1.** Радиоэкологические характеристики пробных площадей опытных объектов [14, 16]  
**Table 1.** Radioecological characteristics of test sites of experimental objects

Опытный объект	Расчетная плотность выпадений (1986 г.), МБк/м <sup>2</sup>							Измеренная мощность поглощенной дозы (1987 г.), нГр/с
	<sup>137</sup> Cs	<sup>134</sup> Cs	<sup>144</sup> Ce	<sup>106</sup> Ru	<sup>110m</sup> Ag	<sup>125</sup> Sb	<sup>60</sup> Co	
Мс-1	5.3	2.3	55	13	—	0.67	0.15	9.9
Чм-1	3.8	1.8	24	7.1	—	0.26	—	5.5
Пг-1	2.7	1.3	5.3	2.4	0.08	0.21	—	3.2
Гн-1	0.53	0.23	1.4	1.5	—	—	—	0.75

эмпирических данных о распределении радионуклидов между компонентами соснового биогеоценоза и измеренных доз внешнего излучения на протяжении первого года после аварийных радиоактивных выпадений.

Цель исследования – верификация миграционно-дозиметрической модели формирования радиационной обстановки в сосновых насаждениях.

### МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДИКА

Миграционно-дозиметрическая модель разработана для оценки распределения радионуклидов в системе “поверхность кроны древесных растений – лесная подстилка или моховой покров (в дальнейшем, напочвенный покров) – поверхностный слой почвы” при поступлении аварийных радиоактивных выпадений в сосновые насаждения и связанных с ним величин мощности дозы внешнего  $\gamma$ -облучения. В основу модели положен принцип взаимосвязи между физическими и биологическими процессами, отражающими перенос вещества и энергии в экосистеме соснового леса. На начальном этапе формирование радиационной обстановки, вследствие сильной задерживающей способности по отношению к радиоактивным выпадениям, основное количество радионуклидов и наибольшая энергия ионизирующего излучения сосредоточены в кроне древесных растений. В последующем, по мере процессов очищения крон, происходит перенос радиоактивных веществ на поверхность почвы с соответствующим изменением энергетических характеристик в подкрановом пространстве [10].

Модель включает в себя согласованные миграционный и дозиметрический расчетные блоки. Первый блок позволяет прогнозировать динамику перераспределения радионуклидов между компартментами системы “поверхность кроны древесных растений – напочвенный покров – поверхностный слой почвы” в течение года после аварийных радиоактивных выпадений. Второй блок предназначен для расчета динамики мощности поглощенной дозы по высоте древостоя от внешнего  $\gamma$ -облучения, обусловленной измене-

ниями активности радионуклидов в компартментах системы.

В основу разработки миграционного расчетного блока модели положены следующие положения и допущения.

Вследствие гипотетической аварийной ситуации происходит разовое поступление радионуклидов в окружающую среду в виде аэрозольных частиц с последующим осаждением на земную поверхность, определяемое величиной осаждения радионуклида из состава аварийных радиоактивных выпадений ( $\sigma$ , Бк/м<sup>2</sup>). В соответствии с имеющимися данными радиоэкологических исследований в составе выпадений рассмотрены <sup>137</sup>Cs, <sup>134</sup>Cs, <sup>144</sup>Ce, <sup>106</sup>Ru, <sup>110m</sup>Ag, <sup>125</sup>Sb и <sup>60</sup>Co (табл. 1).

Предполагается, что задерживание радионуклидов, осаждающихся из атмосферы, происходит по всей длине кроны деревьев. При этом основное количество частиц задерживается надземной фитомассой кроны (хвоя и кора веток) [2]. Величина биомассы кроны в течение первого года после выпадений принята неизменной для модальных сосновых насаждений Европейской части Российской Федерации [11].

Величина коэффициента первоначального задерживания радионуклидов ( $K_z$ ) консервативно принята равной величине сомкнутости крон в насаждении [2, 10]. Оставшаяся часть радионуклидов поступает на поверхность напочвенного покрова.

На протяжении года после аварийных выпадений происходит перераспределение радионуклидов внутри кроны дерева, удаление частиц выпадений за счет метеорологических (стряхивание ветром, смывание атмосферными осадками), физических (радиоактивный распад и силы гравитации) и биогенных (опад элементов надземной фитомассы) факторов. Период получищения поверхности кроны принят равным 90 сут [10, 12].

В напочвенном покрове происходит перераспределение радионуклидов и постепенная их миграция в верхние слои минеральной части почвы. Период получищения напочвенного покрова принят 500 сут в течение первого года после аварийных выпадений [13, 14].

В течение первого года после выпадений радионуклиды накапливаются в верхнем слое 0–1 см минеральной части почвы, который в наибольшей степени насыщен органико-минеральными веществами, способствующими сорбции радионуклидов [13, 14].

В течение вегетационного периода, в который произошли аварийные радиоактивные выпадения, корневым поступлением радионуклидов в древесное растение можно пренебречь, что подтверждается низкими значениями коэффициентов перехода радионуклидов для окоренной древесины и хвои текущего года формирования [13, 14].

Математическая модель распределения радионуклидов между компартментами системы “поверхность кроны древесных растений – напочвенный покров – поверхностный слой почвы” в сосновых биогеоценозах представлена системой линейных дифференциальных уравнений I порядка:

$$\begin{cases} \frac{dX_1}{dt} = X_1\lambda_{\text{с1}} \\ \frac{dX_2}{dt} = X_1\lambda_1 - X_2\lambda_{\text{с2}}, \\ \frac{dX_3}{dt} = X_2\lambda_2 - X_3\lambda_p \end{cases} \quad (1)$$

где  $X_1, X_2, X_3$  – активность каждого радионуклида из состава аварийных выпадений на поверхности кроны, в напочвенном покрове, поверхностном слое почвы, приходящихся на 1 м<sup>2</sup> земной поверхности соответственно, Бк/м<sup>2</sup>;  $\lambda_{\text{с1}}$  – эффективная постоянная очищения поверхности кроны от радионуклида, равная сумме постоянной очистки  $\lambda_1$  и радиоактивного распада  $\lambda_p$ , сут<sup>-1</sup>;  $\lambda_{\text{с2}}$  – эффективная постоянная очищения напочвенного покрова от радионуклида, равная сумме постоянной очистки  $\lambda_2$  и радиоактивного распада  $\lambda_p$ , сут<sup>-1</sup>. Постоянные переноса  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$  приняты одинаковыми для всех радионуклидов в составе выпадений.

Частное решение системы линейных уравнений для начальных условий ( $X_1(0) = \sigma K_3$ ,  $X_2(0) = \sigma(1 - K_3)$ ,  $X_3(0) = 0$ ) может быть найдено методом операционного исчисления.

$$\begin{cases} X_1(t) = \sigma K_3 e^{-\lambda_{\text{с1}} t} \\ X_2(t) = -\frac{\sigma K_3 \lambda_1}{\lambda_1 - \lambda_2} e^{-\lambda_{\text{с1}} t} + \frac{\sigma(\lambda_1 - \lambda_2(1 - K_3))}{\lambda_1 - \lambda_2} e^{-\lambda_{\text{с2}} t}, \\ X_3(t) = E e^{-\lambda_{\text{с1}} t} + F e^{-\lambda_{\text{с2}} t} + G e^{-\lambda_p t} \end{cases} \quad (2)$$

где  $X_1(t), X_2(t)$  и  $X_3(t)$  – динамика активности радионуклида на поверхности кроны древесных растений, в напочвенном покрове и поверхностном слое почвы на 1 м<sup>2</sup> земной поверхности, Бк/м<sup>2</sup>;  $E, F, G$  – математические выражения:

$$E = -F - G \quad (3)$$

$$F = \sigma \left[ \frac{(1 - K_3)\lambda_2 - \lambda_1}{\lambda_1 - \lambda_2} \right] \quad (4)$$

$$G = \sigma. \quad (5)$$

В соответствии с формулами (2–6) для каждого радионуклида выполнен расчет динамики активности в компартментах системы в течение года после аварийных выпадений. Величина поступления радионуклида <sup>137</sup>Cs, <sup>134</sup>Cs, <sup>144</sup>Ce, <sup>106</sup>Ru, <sup>110m</sup>Ag, <sup>125</sup>Sb и <sup>60</sup>Co на земную поверхность ( $\sigma$ ) принималась равной расчетной величине плотности загрязнения почвы в 1986 г. в соответствии с табл. 1.

Критерием работоспособности миграционно-расчетного блока миграционно-дозиметрической модели принято соответствие результатов расчета активности радионуклидов в системе “поверхность кроны древесных растений – напочвенный покров – поверхностный слой почвы” данным натурных исследований в 1987 г. в сосновых насаждениях, произрастающих в зоне аварийных выбросов на Чернобыльской АЭС [14].

Дозиметрический расчетный блок представляет собой модифицированный вариант ранее разработанной модели облучения древесных растений [15]. Авторами данной работы предложена формула расчета мощности поглощенной дозы  $\gamma$ -излучения, формируемой от бесконечно протяженных в продольном направлении источников конечной толщины, расположенных за защитой, путем интегрирования дозовой функции ослабления точечного источника излучения. Фактор накопления рассеянного излучения учтен с применением аппроксимирующей функции Тейлора.

Динамика мощности поглощенной дозы на высоте  $h_m$  от поверхности напочвенного покрова от внешнего  $\gamma$ -излучения радионуклида из состава аварийных выпадений в  $j$ -м компартменте системы оценивается по формуле, Гр/с:

$$P_j(t) = 2\pi K_\gamma \rho_a S A_j(t) [E_2^*(z_1) - E_2^*(z_2)] / \mu_a, \quad (6)$$

где  $K_\gamma$  –  $\gamma$ -постоянная радионуклида из состава аварийных выпадений, Гр м<sup>2</sup>/(Бк с);  $S A_j(t)$  – динамика удельной активности в  $j$ -компартементе исследуемой системы, Бк/кг;  $\mu_a$  – линейный коэффициент ослабления  $\gamma$ -излучения в воздухе, м<sup>-1</sup>;  $\rho_a$  – плотность воздуха при стандартных условиях, кг/м<sup>3</sup>;  $E_2^*(z)$  – модифицированная интегрально-показательная функция второго рода или функция Кинга [15];  $z_1$  и  $z_2$  – аргументы модифицированной интегрально-показательной функции, которые вычисляются по формулам в соответствии с табл. 2.

Удельную активность  $S A_1(t)$  находили исходя из величины активности в наземной фитомассе, рассчитанной согласно (2), и условия равномер-

**Таблица 2.** Аргументы модифицированной интегрально-показательной функции  $z_1$  и  $z_2$   
**Table 2.** Parameters of modified integral-exponential function  $z_1$  and  $z_2$

Компартмент системы	Параметры	
	$z_1$	$z_2$
Поверхность кроны древесных растений	$\mu_a [(H - l_1 - h_m) \rho_1] / \rho_a$	$\mu_a [(H - l_1 - h_m) \rho_1 + l_1 \rho_1] / \rho_a$
Напочвенный покров	$\mu_a (h_m \rho_1) / \rho_a$	$\mu_a (h_m \rho_1 + l_2 \rho_2) / \rho_a$
Поверхностный слой почвы	$\mu_a (h_m \rho_1 + l_2 \rho_2) / \rho_a$	$\mu_a (h_m \rho_1 + l_2 \rho_2 + l_3 \rho_3) / \rho_a$

ного распределения радионуклида в однородной воздушно-растительной среде, состоящей из элементов наземной фитомассы крон древесных растений и атмосферного воздуха, заполняющего промежутки между ними:

$$SA_1(t) = \frac{X_1(t)}{l_1 \rho_a + bio_1}, \tag{7}$$

где  $l_1$  – длина кроны древесных растений, м;  $bio_1$  – биомасса кроны древесных растений, кг/м<sup>2</sup>. Эти показатели приняты для модальных насаждений для модальных сосновых насаждений Европейской части Российской Федерации согласно таблиц хода роста и биологической продуктивности [11].

Удельную активность в напочвенном покрове  $SA_2(t)$  и поверхностном слое почвы  $SA_3(t)$  рассчи-

тывали исходя из линейной толщины и плотности соответствующих компартмент по формуле:

$$SA_{2(3)}(t) = \frac{X_{2(3)}(t)}{l_{2(3)} \rho_{2(3)}}, \tag{8}$$

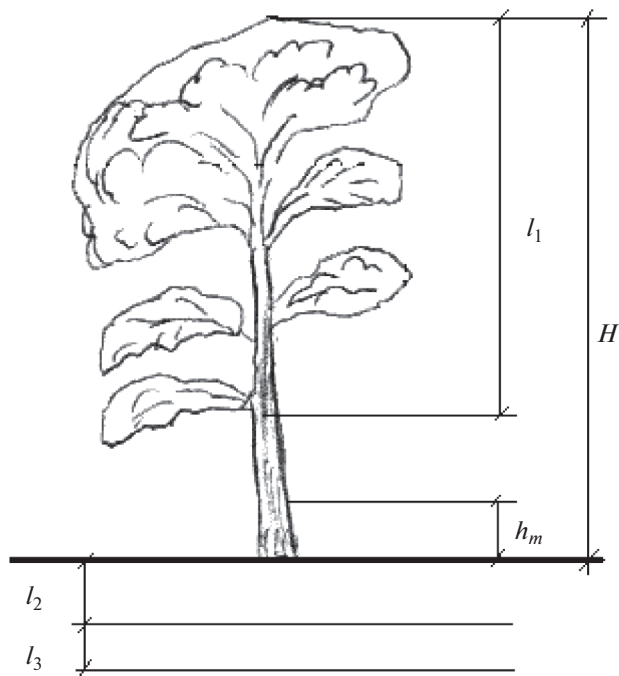
где  $l_{2(3)}$  – линейная толщина напочвенного покрова и поверхностного слоя почвы, м;  $\rho_{2(3)}$  – плотность напочвенного покрова и поверхностного слоя почвы, кг/м<sup>3</sup>. Эти показатели приняты в соответствии с результатами радиоэкологических исследований на опытных объектах [14]. Линейная толщина напочвенного покрова ( $l_2$ ) и поверхностного слоя почвы ( $l_3$ ) приняты равными 0.02 м, плотность напочвенного покрова –  $\rho_2 = 400$  и поверхностного слоя почвы –  $\rho_3 = 1200$  кг/м<sup>3</sup>.

Мощность поглощенной дозы рассчитывается на высоте  $h_m = 1$  м от  $\gamma$ -излучения каждого радионуклида из состава аварийных выпадений, находящегося на поверхности кроны, в напочвенном покрове и поверхностном слое почвы согласно (6) (рис. 1). Соответственно, суммарную мощность поглощенной дозы на высоте  $h_m$  находили как сумму рассчитанных значений мощности дозы по каждому радионуклиду (табл. 3).

На основе результатов моделирования активности каждого радионуклида из состава аварийных выпадений в исследуемых компартментах системы согласно (2–4) выполнен расчет мощности поглощенной дозы внешнего  $\gamma$ -облучения на высоте 1 м над поверхностью напочвенного покрова.

Критерием работоспособности дозиметрического расчетного блока принято соответствие прогнозируемой мощности поглощенной дозы внешнего  $\gamma$ -облучения на высоте 1 м над поверхностью напочвенного покрова по истечению первого года после радиоактивных выпадений инструментально измеренной в исследованных сосновых насаждениях в 1987 г. [14].

В качестве исходных данных использовались результаты радиоэкологических исследований (1987–2008 гг.) сосновых насаждений, произрастающих в 30-километровой зоне отчуждения Чернобыльской АЭС [14, 16].



**Рис. 1.** Схема расположения источников ионизирующего излучения соснового насаждения.

**Fig. 1.** Arrangement of ionizing radiation sources in pine stands.

**Таблица 3.** Активность  $^{137}\text{Cs}$  в компартментах сосновых насаждений (1987 г.)  
**Table 3.**  $^{137}\text{Cs}$  activity in pine stand compartments (1987)

Опытные объекты	Активность на 1 м <sup>2</sup> земной поверхности, МБк/м <sup>2</sup>			Активность, % от общей в биогеоценозе		
	номера компартмента*			номера компартмента*		
	1	2	3	1	2	3
Мс-1	0.22	3.4	1.6	4.5	65	30
Чм-1	0.16	2.4	1.2			
Пг-1	0.11	1.7	0.82			
Гн-1	0.022	0.34	0.16			

Примечание. 1 – поверхность кроны древесных растений; 2 – напочвенный покров; 3 – поверхностный слой почвы.

Опытными объектами послужили чистые культуры сосны обыкновенной (10С) I–II класса возраста, II бонитета, тип лесорастительных условий – А2, тип леса – сосняк мшистый. Подробная лесоводственно-таксационная характеристика опытных объектов приведена в [14]. В каждом из них закладывали постоянные пробные площади с равнинным рельефом и коэффициентом вариации мощности экспозиционной дозы  $\gamma$ -излучения менее 20%. Отбор проб почвы для определения плотности загрязнения радионуклидами проводили методом “конверта” в реперных (постоянных) точках пробоотборником ( $\varnothing$  5 см) на глубину до 15 см. В каждой точке отбора почвы на высоте 1 м над поверхностью напочвенного покрова дозиметром ДРГ-01Т измеряли мощность экспозиционной дозы  $\gamma$ -излучения (мкР/ч), которая была использована для расчета мощности поглощенной дозы, Гр/с.

В 1989 г. был проведен развернутый  $\gamma$ -спектрометрический анализ проб почвы на спектрометре “Ortek” с полупроводниковым детектором. Аппаратурная ошибка измерения не превысила 20%, эффективность регистрации на линии 0.662 кэВ – 0.003, минимально детектируемая активность – 1 Бк.

Плотность загрязнения (МБк/м<sup>2</sup>) радионуклидами почвы пробных площадей по состоянию на 1986 г. определяли расчетным путем, результаты расчетов, а также инструментально измеренная мощность поглощенной дозы (1987 г.) представлены в табл. 1 [14, 16]. В ходе измерения установлено наличие в пробах  $^{144}\text{Ce}$  +  $^{144}\text{Pr}$ ,  $^{106}\text{Ru}$  +  $^{106}\text{Rh}$ ,  $^{134}\text{Cs}$ ,  $^{137}\text{Cs}$  +  $^{137m}\text{Ba}$ , в следовых количествах присутствовали  $^{60}\text{Co}$ ,  $^{110m}\text{Ag}$  и  $^{125}\text{Sb}$ . В дальнейшем в тексте указываются только материнские радионуклиды.

## РЕЗУЛЬТАТЫ

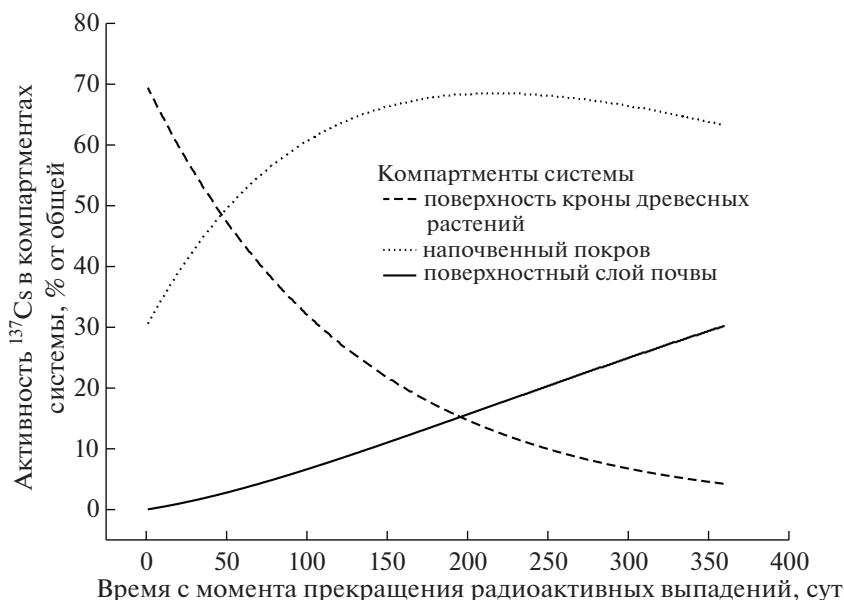
Для верификации миграционного расчетного блока модели использованы экспериментальные данные по активности  $^{137}\text{Cs}$  в фитомассе кроны (хвоя, побеги и ветки с корой) сосновых насажде-

ний в 1987 г. [14]. Выбор этого радионуклида был обусловлен достаточно большим объемом данных по его распределению в исследуемых насаждениях, начиная с первого года после аварийных выпадений.

Непосредственно после прекращения радиоактивных выпадений наибольшая активность радионуклида по всем опытным объектам прогнозируется на поверхности кроны (рис. 2). В последующем, по мере очищения, наиболее загрязненным компартментом системы становится напочвенный покров. На 50-е сутки после прекращения выпадений активность  $^{137}\text{Cs}$  в этом компартменте возрастает до 50% от общей в биогеоценозе, к 220-м суткам достигает 70%, после чего начинается ее постепенное снижение. На этот момент времени на поверхности кроны и поверхностном слое почвы находится одинаковое количество радионуклида – по 15% от общей активности в биогеоценозе.

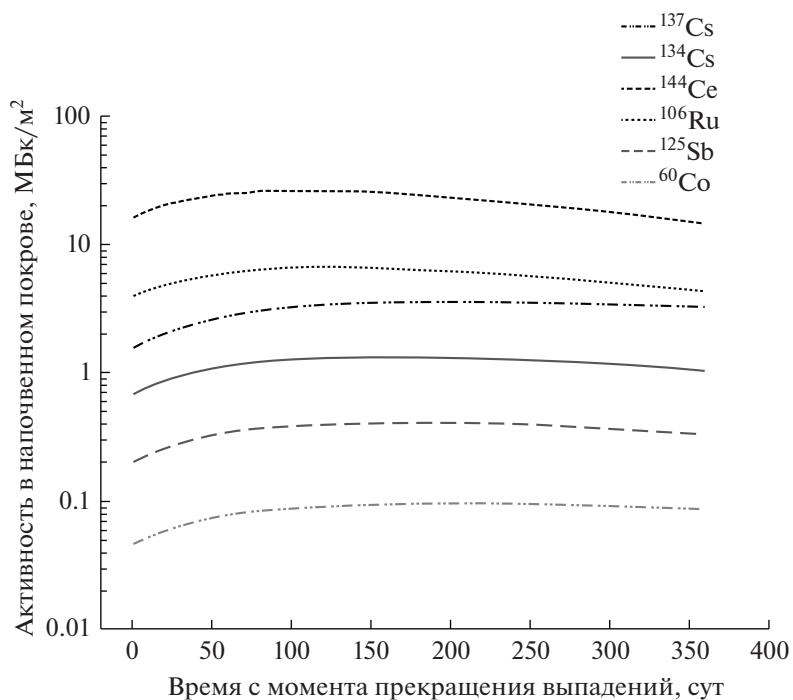
Через год с момента прекращения выпадений расчетная активность  $^{137}\text{Cs}$  составит ~4.5% от общей активности, поступившей в биогеоценоз, в компартменте “поверхность кроны древесных растений”, в напочвенном покрове – около 65%, в поверхностном слое почвы ~30% (рис. 2 и табл. 3).

Расчетная динамика активности радионуклидов в напочвенном покрове в течение первого года после прекращения выпадений на примере наиболее загрязненного опытного объекта Мс-1 представлена на рис. 3. Максимальная величина активности этого компартмента системы прогнозируется по  $^{144}\text{Ce}$  – до 25 МБк/м<sup>2</sup> и  $^{106}\text{Ru}$  – до 7 МБк/м<sup>2</sup>, а наименьшая – характерна для  $^{60}\text{Co}$  (<0.1 МБк/м<sup>2</sup>). При этом максимум активности по  $^{144}\text{Ce}$  и  $^{106}\text{Ru}$  прогнозируется на 100–120-е сутки с момента прекращения выпадений, по  $^{134}\text{Cs}$  и  $^{125}\text{Sb}$  ожидается на 180-е, по  $^{60}\text{Co}$  – на 190-е, а  $^{137}\text{Cs}$  – на 220-е сутки. Через год после прекращения радиоактивных выпадений активность  $^{144}\text{Ce}$  и  $^{106}\text{Ru}$  снизится почти в 2 раза, по  $^{134}\text{Cs}$  и  $^{125}\text{Sb}$  – на 20% от исходной, а по  $^{137}\text{Cs}$  – на 8%.



**Рис. 2.** Расчетная динамика активности <sup>137</sup>Cs в компартаментах сосновых насаждений в течение первого года после аварийных радиоактивных выпадений.

**Fig. 2.** Calculated dynamics of <sup>137</sup>Cs activity in components of pine stands during first year after accidental radioactive fallout.



**Рис. 3.** Расчетная динамика активности радионуклидов в напочвенном покрове в течение первого года после аварийных радиоактивных выпадений (на примере опытного объекта Мс-1).

**Fig. 3.** Calculated dynamics of activity of radionuclides in ground cover during first year after accidental radioactive fallout (on example of experimental object Ms-1).

Рассчитанные активности радионуклидов в компартаментах системы “поверхность кроны древесных растений – напочвенный покров – по-

верхностный слой почвы” по истечении первого года с момента прекращения выпадений использованы в качестве исходных данных для расчета

**Таблица 4.** Рассчитанная и измеренная мощность поглощенной дозы внешнего  $\gamma$ -облучения на высоте 1 м над поверхностью почвы на опытных объектах (1987 г.)**Table 4.** The calculated and measured power of absorbed dose of external  $\gamma$ -radiation at a height of 1 m above soil surface at experimental objectives (1987)

Опытный объект	Радионуклид	Мощность поглощенной дозы, нГр/с <sup>1</sup>						измеренная	Вклад радионуклидов в рассчитанную мощность дозы, %	Вклад в мощность дозы отдельных компартментов, %		
		рассчитанная					суммарная			1	2	3
		от отдельных компартментов				суммарная						
		1	2	3	сумма							
Мс-1	<sup>137</sup> Cs	0.22	2.4	0.75	3.3	9.5	9.9	34.9	6.3	71.5	22.2	
	<sup>134</sup> Cs	0.18	1.9	0.58	2.6			27.6				
	<sup>144</sup> Ce	0.098	1.1	0.36	1.6			16.8				
	<sup>106</sup> Ru	0.095	1.1	0.36	1.5			16.3				
	<sup>125</sup> Sb	0.015	0.17	0.055	0.24			2.5				
	<sup>60</sup> Co	0.012	0.13	0.04	0.18			1.9				
ЧМ-1	<sup>137</sup> Cs	0.14	1.7	0.54	2.4	6.1	5.5	38.5	5.7	71.9	22.4	
	<sup>134</sup> Cs	0.12	1.4	0.44	2.0			31.8				
	<sup>144</sup> Ce	0.044	0.51	0.16	0.7			11.5				
	<sup>106</sup> Ru	0.057	0.7	0.23	0.99			16.1				
	<sup>125</sup> Sb	0.008	0.091	0.031	0.13			2.1				
Пг-1	<sup>137</sup> Cs	0.061	0.98	0.32	1.4	3.1	3.2	44.1	4.5	73.2	22.3	
	<sup>134</sup> Cs	0.052	0.85	0.27	1.2			37.9				
	<sup>144</sup> Ce	0.006	0.092	0.028	0.13			4.0				
	<sup>106</sup> Ru	0.012	0.2	0.067	0.028			9.0				
	<sup>110</sup> Ag	0.003	0.05	0.016	0.069			2.2				
	<sup>125</sup> Sb	0.004	0.061	0.02	0.085			2.8				
Гн-1	<sup>137</sup> Cs	0.013	0.21	0.068	0.29	0.72	0.75	39.7	4.7	72.3	23.0	
	<sup>134</sup> Cs	0.011	0.15	0.05	0.21			29.7				
	<sup>144</sup> Ce	0.002	0.026	0.008	0.036			5.0				
	<sup>106</sup> Ru	0.009	0.13	0.045	0.18			25.6				

Примечание. 1 – поверхность кроны древесных растений; 2 – напочвенный покров; 3 – поверхностный слой почвы.

мощности поглощенной дозы в дозиметрическом блоке модели. Результаты расчетов представлены в табл. 4. Следует отметить хорошую сходимость рассчитанных и измеренных значений мощности поглощенной дозы: для большинства опытных объектов (Мс-1, Пг-1 и Гн-1) различия не превышали 4% и только для объекта ЧМ-1 составили около 11%. Это позволяет говорить об адекватном описании поля ионизирующего излучения в лесном биогеоценозе с помощью миграционно-дозиметрической модели и возможности ее применения для прогноза радиационно-экологической обстановки в первый период после аварийных радиоактивных выпадений в лесных биогеоценозах.

К концу первого года после радиоактивных выпадений более 70% мощности поглощенной дозы внешнего  $\gamma$ -облучения на высоте 1 м над поверхностью почвы формируется за счет излучения радионуклидов, находящихся в напочвенном покрове. Данный источник излучения является наиболее значимым в формировании радиационной обстановки в первый год после радиоактивных выпадений. По мере перемещения радионуклидов в минеральную часть почвы будет возрастать излучение от этого компартмента исследуемой системы, однако на этом этапе формирования радиационной обстановки его вклад не превышает 25%. Излучение радионуклидов, находящихся на поверхности кроны древесных растений, опреде-

ляет не более 6,5% мощности поглощенной дозы на высоте 1 м.

Основная роль в формировании радиационной обстановки на опытных объектах спустя год после аварийных выпадений принадлежала радиоизотопам цезия, при этом на наиболее удаленных от Чернобыльской АЭС опытных объектах вклад  $^{134,137}\text{Cs}$  в суммарную мощность дозы составил 80–82% (Гн-1 и Пг-1), а на ближайшем – 62% (Мс-1). Доля  $^{144}\text{Ce}$  в суммарной мощности дозы снижается по мере удаления от атомной станции с 16% (Мс-1) до 4–5% (Пг-1 и Гн-1), вклад  $^{106}\text{Ru}$  не зависит от расстояния до АЭС.

### ОБСУЖДЕНИЕ

Рассчитанная активность  $^{137}\text{Cs}$  на поверхности кроны древесных растений (4,5% от общей в биогеоценозе) (табл. 3) хорошо согласуется с литературными данными (4–7%) [9, 12–14]. Из приведенного диапазона значений 3/4 активности радионуклида наблюдалось в хвое второго и третьего года жизни, и только десятые доли процента – в хвое текущего года. Это свидетельствует об очень низком уровне корневого поступления  $^{137}\text{Cs}$  в растения и преимущественно поверхностном характере радиоактивного загрязнения лесного биогеоценоза в течение первого года после радиоактивных выпадений.

Активность  $^{137}\text{Cs}$  в напочвенном покрове прогнозируется на уровне ~65% от суммарной в биогеоценозе и около 30% – в поверхностном слое почвы (табл. 3), что сопоставимо с результатами эмпирических исследований в 1987 г. (50–80 и 20–40% соответственно) [13, 14]. Таким образом, принятые периоды полураспада поверхности кроны (90 сут) и напочвенного покрова (500 сут) достаточно адекватно отражают процессы удаления частиц радиоактивных выпадений из соответствующих компартментов системы в первый год после выпадений. При этом прогнозируемое перераспределение радионуклида между компартментами системы в целом соответствует результатам радиоэкологического мониторинга.

Сложный характер динамики активности  $^{137}\text{Cs}$  в напочвенном покрове объясняется одновременно протекающими процессами поступления радионуклида с поверхности кроны и перемещением из напочвенного покрова в поверхностный слой почвы. При этом максимум активности достигается на 220-е сутки с момента прекращения радиоактивных выпадений. При сравнении  $^{144}\text{Ce}$  и  $^{137}\text{Cs}$  прослеживается следующая закономерность: чем меньше период полураспада радионуклида в составе аварийных выпадений, тем быстрее наступит максимум его активности в напочвенном покрове.

Как уже отмечалось ранее, измеренные и прогнозируемые величины мощности поглощенной дозы внешнего  $\gamma$ -облучения на высоте 1 м над поверхностью напочвенного покрова не отличаются более чем на 10%, что свидетельствует об адекватности описания основных количественных характеристик поля ионизирующего излучения в сосновых насаждениях на основе разработанного дозиметрического блока модели.

Вклады отдельных компартментов системы и радионуклидов в величину суммарной мощности дозы отличаются. К концу первого года после радиоактивных выпадений мощность дозы в сосновых насаждениях формируется, главным образом, за счет излучения радионуклидов, находящихся в напочвенном покрове и в поверхностных почвенных слоях. К аналогичным выводам приходят и другие исследователи при наблюдениях за параметрами поля  $\gamma$ -излучения [8, 9].

Вклад  $\gamma$ -излучения радионуклидов, находящихся в напочвенном покрове, в суммарную мощность поглощенной дозы на высоте 1 м составит 71%, что несколько больше (65%) по сравнению с активностью радионуклидов в этом компартменте. Для поверхностного слоя почвы установлена обратная закономерность: при активности радионуклидов в данной компартменте ~30% вклад их  $\gamma$ -излучения в суммарный дозовый показатель составляет ~22%. Данная ситуация может быть связана с относительно низкой плотностью лесных подстилок сосновых лесов по сравнению с поверхностными почвенными слоями [9, 13]. Соответственно для напочвенного покрова имеет место меньшее самопоглощение излучения по сравнению с поверхностным слоем почвы.

Анализ вклада радионуклидов из состава аварийных выпадений свидетельствует о преобладающей роли изотопов цезия в формировании суммарной мощности поглощенной дозы внешнего  $\gamma$ -облучения на высоте 1 м над поверхностью напочвенного покрова по истечении первого года после радиоактивных выпадений. При этом активность  $^{144}\text{Ce}$  в данном компартменте почти в 5 раз выше, чем  $^{137}\text{Cs}$ , при этом вклад первого радионуклида в формирование дозы значительно меньше. Это объясняется более высокой энергией  $\gamma$ -излучения  $^{137}\text{Cs} + ^{137\text{m}}\text{Ba} - 0.594$  МэВ на распад, в то время как энергия излучения  $^{144}\text{Ce} + ^{144}\text{Pr}$  составляет всего 0.044 МэВ на распад. Обратная картина наблюдается для  $^{134}\text{Cs}$  – его активность в напочвенном покрове примерно в 2 раза ниже по сравнению с  $^{137}\text{Cs}$ , однако вклад в суммарную мощность поглощенной дозы сопоставим с последним, что связано с большой энергией  $\gamma$ -излучения  $^{134}\text{Cs} - 1.55$  МэВ на распад. Вклад других радионуклидов, зафиксированных в радиоактивном загрязнении сосновых насаждений, относи-



тельно невелик и исчисляется единицами процентов.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Миграционно-дозиметрическая модель предназначена для оценки перераспределения радионуклидов между компартментами системы “поверхность кроны древесных растений – лесная подстилка или моховой покров – поверхностный слой почвы” при поступлении аварийных радиоактивных выпадений в сосновые насаждения и связанных с ним величин мощности дозы внешнего  $\gamma$ -облучения. Модель включает в себя согласованные миграционный и дозиметрический расчетные блоки. Первый блок основан на системе линейных дифференциальных уравнений первого порядка с постоянными коэффициентами и позволяет прогнозировать динамику перераспределения радионуклидов между компартментами системы. Второй блок базируется на интегрировании дозовой функции точечного источника излучения с учетом фактора накопления рассеянного излучения и предназначен для расчета динамики мощности поглощенной дозы по высоте древостоя от внешнего  $\gamma$ -излучения, обусловленной изменениями активности радионуклидов в компартментах системы.

Проведенная верификация миграционного и дозиметрического блоков модели свидетельствует об удовлетворительном соответствии рассчитанных и эмпирических данных, полученных при проведении радиоэкологического мониторинга (1987–2008 гг.) в сосновых насаждениях, произрастающих в 30-километровой зоне отчуждения Чернобыльской АЭС.

Рассчитанная активность  $^{137}\text{Cs}$  на поверхности кроны древесных растений составила 4,5%, в напочвенном покрове ~65% и в поверхностном слое почвы 30%, что хорошо согласуется с результатами эмпирических исследований в 1987 г. (4–7, 50–80 и 20–40% соответственно).

Различия между измеренными и прогнозируемыми величинами мощности поглощенной дозы внешнего  $\gamma$ -облучения на высоте 1 м над поверхностью напочвенного покрова составляют не более 10%, что свидетельствует об адекватном описании основных количественных характеристик поля ионизирующего излучения в сосновых насаждениях на основе разработанного дозиметрического блока модели.

Миграционно-дозиметрическая модель может быть применена для оценки динамики радиационной-экологической обстановки в сосновых биогеоценозах в течение первого года после аварийных радиоактивных выпадений.

## БЛАГОДАРНОСТИ

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

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Алексахин Р.М., Нарышкин М.А.* Миграция радионуклидов в лесных биогеоценозах. М.: Наука, 1977. 144 с. [*Alexakhin R.M., Naryshkin M.A.* Migratsiya radionuklidov v lesnykh biogeotsenozakh. M.: Nauka, 1977. 144 s. (In Russ.)]
2. Проблемы лесной радиоэкологии: Сб. науч. тр. Ин-т прикл. геофизики АН СССР / Под ред. Р.М. Алексахина. Вып. 38. М.: Гидрометеоздат, 1979. 75 с. [*Problemy lesnoy radioekologii: Sb. nauch. tr. In-t prikl. geofiziki AN SSSR / Pod red. R.M. Alexakhina. Vyp. 38. M.: Gidrometeoizdat, 1979. 75 s. (In Russ.)*]
3. *Фесенко С.В.* Аграрные и лесные экосистемы: радиоэкологические последствия и эффективность защитных мероприятий при радиоактивном загрязнении: Дис. ... д-ра биол. наук: 03.00.01. Обнинск: ВНИИСХР, 1997. 410 с. [*Fesenko S.V.* Agrarnyye i lesnyye ekosistemy: radioekologicheskiye posledstviya i effektivnost zashchitnykh meropriyatiy pri radioaktivnom zagryaznenii: dis. ... d-ra biol. nauk: 03.00.01. Obninsk: VNIISKhR, 1997. 410 s. (In Russ.)]
4. ICRP 2008. Publication 108. Environmental Protection – the Concept and Use of Reference Animals and Plants // Ann. ICRP. 2008. V. 38. № 4–6. 245 p.
5. *Израэль Ю.А., Стукин Е.Д.* Гамма-излучение радиоактивных выпадений. М.: Атомиздат, 1967. 224 с. [*Izrael Yu.A., Stukin E.D.* Gamma-izlucheniye radioaktivnykh vypadeniy. M.: Atomizdat, 1967. 224 s. (In Russ.)]
6. *Коган Р.М., Назаров И.М., Фридман Ш.Д.* Основы гамма-спектрометрии природных сред. М.: Атомиздат, 1976. 368 с. [*Kogan R.M., Nazarov I.M., Fridman Sh.D.* Osnovy gamma-spektrometrii prirodnykh sred. M.: Atomizdat, 1976. 368 s. (In Russ.)]
7. *Алексахин Р.М., Болтнева Л.И., Назаров И.М.* К характеристике гамма-поля радиоактивных выпадений в лесу // Лесоведение. 1972. № 1. С. 35–42. [*Alexakhin R.M., Boltneva L.I., Nazarov I.M.* K kharakteristike gamma-polya radioaktivnykh vypadeniy v lesu // Lesovedeniye. 1972. № 1. S. 35–42. (In Russ.)]
8. *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 s. (In Russ.)]
9. *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 s. (In Russ.)]

10. Тихомиров Ф.А. Действие ионизирующих излучений на экологические системы. М.: Атомиздат, 1972. 176 с. [Tikhomirov F.A. Deystviye ioniziruyushchikh izlucheniye na ekologicheskiye sistemy. M.: Atomizdat, 1972. 176 s. (In Russ.)]
11. 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.
12. 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 avariyeu na ChAES) / Pod red. V.I. Parfenova i B.I. Yakusheva. Minsk: Nauka i tekhnika, 1995. 582 s. (In Russ.)]
13. Щеглов А.И. Биогеохимия техногенных радионуклидов в лесных экосистемах: По материалам 10-летних исследований в зоне влияния аварии на ЧАЭС. М.: Наука, 1999. 268 с. [Shcheglov A.I. Biogeochemistry of technogenic radionuclides in forest ecosystems: By the materials of the 10-year research in the area effected by the Chernobyl nuclear power station disaster. M.: Nauka, 1999. 268 s. (In Russ.)]
14. Переволоцкий А.Н. Распределение <sup>137</sup>Cs и <sup>90</sup>Sr в лесных биогеоценозах. Гомель: РНИУП “Институт радиологии”, 2006. 255 с. [Perevolotskiy A.N. Raspredeleniye <sup>137</sup>Cs i <sup>90</sup>Sr v lesnykh biogeotsenozakh. Gomel: RNIUP “Institut radiologii”, 2006. 255 s. (In Russ.)]
15. 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., Geras'kin S.A. et al. The dose estimation of wood plants in the long-term after the Chernobyl NPP Accident // Radiats. biologiya. Radioekologiya. 2008. T. 48. № 4. S. 443–449. (In Russ.)]
16. Переволоцкий А.Н., Булавик И.М. Динамика дозовых показателей в “ближней” и “дальней” зонах аварийных выпадений // Весці НАН Беларусі. Сер. фіз.-техн. навук. 2004. № 1. С. 108–113. [Perevolotsky A.N., Bulavik I.M. Changes in the exposure dose rate in Belarussian forests occurring in the near and remote zones of the Chernobyl radioactive fallout // Vestsi NAN Belarusi. Ser. fiz.-tekhn. navuk. 2004. № 1.S. 108–113. (In Russ.)]

## Verification of Migration-dosimetric Model of Formation of Radiation Situation in Pine Stands in First Year after Emergency Fallout

A. N. Perevolotsky<sup>a</sup>, T. V. Perevolotskaya<sup>a</sup>, and S. A. Geras'kin<sup>a,#</sup>

<sup>a</sup> Russian Research Institute of Radiology and Agroecology, Obninsk, Russia

<sup>#</sup>E-mail: stgeraskin@gmail.com

Article presents results of verification of calculated blocks of migration-dosimetric model designed to assess redistribution of radionuclides between compartments of system “crown surface of woody plants – forest litter or moss cover – surface layer of soil” at of emergency radioactive fallout intake pine plantations and associated values of external  $\gamma$ -radiation dose rate. It is established that calculated and empirical data obtained during radioecological monitoring (1987–2008) in pine stands growing in 30 km exclusion zone of Chernobyl nuclear power plant agree well. Calculated activity of <sup>137</sup>Cs in components of system under study is in good agreement with results of empirical studies in 1987. Differences between measured and predicted values of absorbed dose rate of external  $\gamma$ -radiation at a height of 1 m above surface of the ground cover are no more than 10%, which indicates an adequate description of main quantitative characteristics of ionizing radiation field in pine plantations based on developed dosimetric block of model.

**Keywords:** radioactivity, crown surface of woody plants, surface layer of soil, radionuclides,  $\beta$ -radiation,  $\gamma$ -radiation, emergency radioactive fallout, absorbed dose rate, pine stands, emergency radioactive release