

## РАДИОЭКОЛОГИЯ

УДК 574.41.5:539.163+621.039.7

# МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОВЕДЕНИЯ $^{137}\text{Cs}$ В ЛЕСНЫХ ЭКОСИСТЕМАХ И ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ЕГО НАКОПЛЕНИЯ В ЛЕСНОЙ ПРОДУКЦИИ

© 2001 г. С. И. Спиридовон<sup>1</sup>, С. В. Фесенко<sup>1\*</sup>; Р. Авила<sup>2</sup>, И. А. Гонтаренко<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Всероссийский НИИ сельскохозяйственной радиологии и агроэкологии, Обнинск

<sup>2</sup> Шведский институт радиационной защиты, Стокгольм

Представлена математическая модель миграции  $^{137}\text{Cs}$  в лесной экосистеме, описывающая поведение этого радионуклида в системе лесная подстилка—почва, древесном и нижнем яруса леса и организме лесных животных. Оценены параметры модели для лесных экосистем различных типов, выполнена проверка адекватности модели с использованием независимых экспериментальных данных. Проведен анализ чувствительности выходных переменных модели к изменению наиболее значимых параметров. Показано, что различия в сезонной и среднегодовой динамике концентрации  $^{137}\text{Cs}$  в мышцах лосей и косуль определяются спецификой рационов питания этих видов животных и изменением содержания  $^{137}\text{Cs}$  в основных компонентах рациона.

*Лесная экосистема, математическое моделирование,  $^{137}\text{Cs}$ , прогнозирование, продукция лесного хозяйства.*

Лесные экосистемы, загрязненные долгоживущими радионуклидами в результате аварии на Чернобыльской АЭС, вносят существенный вклад в формирование уровней облучения населения. Высокие концентрации радионуклидов (особенно  $^{137}\text{Cs}$ ) в лесной продукции, потребляемой местными жителями, приводят к дополнительным дозовым нагрузкам за счет внутреннего облучения. Кроме того, некоторые категории населения (прежде всего работники лесного хозяйства) подвергаются внешнему облучению во время проведения работ на загрязненных радионуклидами лесных территориях. Вклад продуктов леса в формирование поглощенной дозы населения возрастает с течением времени, прошедшего после аварии. В отличие от сельскохозяйственных угодий, на которых в постчернобыльский период интенсивно применялись защитные мероприятия, изменение содержания  $^{137}\text{Cs}$  в компонентах леса происходило только за счет естественных факторов. В этой связи особое значение приобретают проблемы, связанные с прогнозированием уровня содержания  $^{137}\text{Cs}$  в компонентах леса и последующей оценкой дозовых нагрузок на население, проживающее вблизи лесных массивов загрязненных этим радионуклидом. В свою очередь это приводит к необходимости создания математических моделей, позволяющих описать динамику распределения  $^{137}\text{Cs}$  между компонентами лесных экосистем и долгосрочное накопление этого радионуклида в лесной продукции.

В течение последних 40 лет разработан ряд моделей, описывающих поведение радионуклидов в лесных экосистемах [1–6]. Основное внимание при разработке этих моделей уделяли, как правило, процессам миграции радионуклидов в почве и их накоплению в компонентах древесного яруса леса. Модели, пригодные для прогнозирования поступления радионуклидов в лесную продукцию, употребляемую в пищу, характеризуются обобщенным описанием ключевых процессов, к которым относятся прежде всего корневое усвоение радионуклидов растительностью нижних ярусов леса и их накопление в организме лесных животных. В то же время большой объем экспериментальной информации, полученной в постчернобыльский период, позволяет расширить представления о ключевых механизмах, управляемых поведением  $^{137}\text{Cs}$  в компонентах леса, и существенно усовершенствовать модели миграции  $^{137}\text{Cs}$  в лесных экосистемах.

Цель работы, результаты которой представлены в настоящей статье, – идентификация закономерностей поведения  $^{137}\text{Cs}$  в лесной экосистеме и разработка модели миграции этого радионуклида, предназначенной для долгосрочного прогнозирования содержания  $^{137}\text{Cs}$  в компонентах леса и его накопления в основных видах лесной продукции – грибах, ягодах, лесных животных, древесине.

## ОПИСАНИЕ МОДЕЛИ

Концептуальная схема модели представлена на рис. 1. Основные переменные модели представляют собой содержание  $^{137}\text{Cs}$  ( $\text{Бк}/\text{м}^2$ ) в каж-

\* Адресат для корреспонденции: 249020, Обнинск Калужской обл., ВНИИСХРАЭ; тел.: (08439) 6-72-05; факс: (095) 255-22-25; e-mail: riar@obninsk.org.

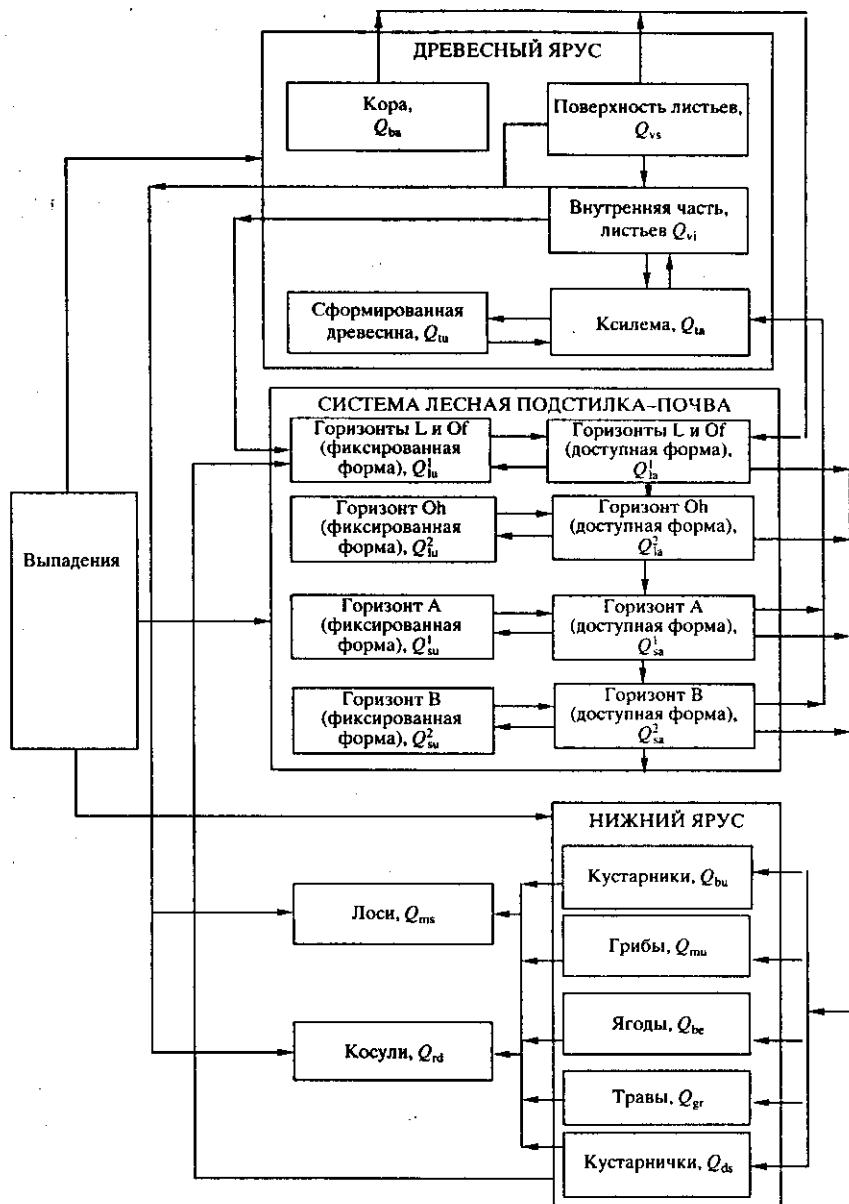


Рис. 1. Концептуальная схема модели миграции  $^{137}\text{Cs}$  в лесных экосистемах.

дом из рассматриваемых компартментов. Переменные  $Q_{ba}$ ,  $Q_{vs}$ ,  $Q_{vi}$ ,  $Q_{ta}$ ,  $Q_{lu}$  характеризуют количество  $^{137}\text{Cs}$  в компонентах древесного яруса (в коре, на поверхности листьев или хвои, внутри листьев, в формирующейся и сформированной древесине). Доступные и недоступные для корневого поглощения фракции  $^{137}\text{Cs}$  в различных горизонтах лесной подстилки и почвы описываются показателями  $Q_{la}^1$ ,  $Q_{la}^2$ ,  $Q_{sa}^1$ ,  $Q_{sa}^2$  и  $Q_{lu}^1$ ,  $Q_{lu}^2$ ,  $Q_{su}^1$ ,  $Q_{su}^2$  соответственно. Переменные  $Q_{bu}$ ,  $Q_{mu}$ ,  $Q_{be}$ ,  $Q_{ds}$ ,  $Q_{gr}$  отражают содержание  $^{137}\text{Cs}$  в растительности нижнего яруса леса (в кустарниках, плодовых телах грибов, ягодах, кустарничковой и травянистой растительности),  $Q_{ms}$  и  $Q_{rd}$  описывают

содержание  $^{137}\text{Cs}$  в мышечной ткани лесных животных (лосей и косуль).

Кроме процессов миграции радионуклидов в лесной экосистеме и их перехода в лесную продукцию, в модели описаны процессы изменения самих компонент экосистемы – сезонная динамика биомассы растительности нижнего яруса леса, а также изменение характеристик древесного яруса в зависимости от возраста древесных растений.

**Поведение  $^{137}\text{Cs}$  в системе лесная подстилка–почва.** Система лесная подстилка–почва – ключевой компонент лесной экосистемы, аккумулирующий по прошествии первого периода после выпадений наибольшее количество радиоактивных веществ, находящихся в объеме лесного ценоза.

Биологическая доступность  $^{137}\text{Cs}$ , сосредоточенного в этом компоненте, определяет интенсивность его поступления в лесную растительность. Система лесная подстилка–почва представлена в модели как совокупность слоев с однородными характеристиками: листовой и ферментативный горизонты подстилки (L и Of), гумусный горизонт подстилки (Oh), органоминеральный (A) и минеральный (B) горизонты почвы.

Каждый почвенный слой представлен в виде двух компартментов: доступный для корневого поглощения растительностью и фиксированный  $^{137}\text{Cs}$ . Распределение  $^{137}\text{Cs}$  между этими компартментами определяется буферной константой, характеризующей потенциальную емкость фиксации  $^{137}\text{Cs}$ . Динамическая система в рамках каждого горизонта стремится к состоянию равновесия, достижению которого препятствуют процессы вертикальной миграции  $^{137}\text{Cs}$ . Перераспределение  $^{137}\text{Cs}$  в системе лесная подстилка–почва зависит также от интенсивности поступления под полог леса свежего опада и формирования новых слоев подстилки. Совокупность указанных процессов описана системой дифференциальных уравнений.

#### Горизонты L и Of:

$$\frac{dQ_{\text{la}}^1}{dt} = k_{\text{vs}}^{11} Q_{\text{vs}} + k_{\text{ba}}^{11} Q_{\text{ba}} + k_{11} \left( \frac{Q_{\text{lu}}^1}{b_{11}} + Q_{\text{la}}^1 \right) - (k_{11}^{12} + \lambda) Q_{\text{la}}^1 - \sum_i R_i^1, \quad (1)$$

$$\frac{dQ_{\text{lu}}^1}{dt} = k_{\text{vi}}^{11} Q_{\text{vi}} + k_{11} \left( Q_{\text{la}}^1 - \frac{Q_{\text{lu}}^1}{b_{11}} \right) - \lambda Q_{\text{lu}}^1 + \sum_i F_i. \quad (2)$$

#### Горизонт Oh:

$$\frac{dQ_{\text{la}}^2}{dt} = k_{12}^{12} Q_{\text{la}}^1 + k_{12} \left( \frac{Q_{\text{lu}}^2}{b_{12}} - Q_{\text{la}}^2 \right) - (k_{12}^{s1} + \lambda) Q_{\text{la}}^2 - \sum_i R_i^2, \quad (3)$$

$$\frac{dQ_{\text{lu}}^2}{dt} = k_{12} \left( Q_{\text{la}}^2 - \frac{Q_{\text{lu}}^2}{b_{12}} \right) - \lambda Q_{\text{lu}}^2. \quad (4)$$

#### Горизонт A:

$$\frac{dQ_{\text{sa}}^1}{dt} = k_{s1}^{s1} Q_{\text{la}}^1 + k_{s1} \left( \frac{Q_{\text{su}}^1}{b_{s1}} - Q_{\text{sa}}^1 \right) - (k_{s1}^{s2} + k_{s1}^{ta} + \lambda) Q_{\text{sa}}^1 - \sum_i R_i^3, \quad (5)$$

$$\frac{dQ_{\text{su}}^1}{dt} = k_{s1} \left( Q_{\text{sa}}^1 - \frac{Q_{\text{su}}^1}{b_{s1}} \right) - \lambda Q_{\text{su}}^1. \quad (6)$$

#### Горизонт B:

$$\begin{aligned} \frac{dQ_{\text{sa}}^2}{dt} &= k_{s1}^{s2} Q_{\text{sa}}^1 + k_{s2} \left( \frac{Q_{\text{su}}^2}{b_{s2}} - Q_{\text{sa}}^2 \right) - \\ &- (k_{s2}^d + k_{s2}^{ta} + \lambda) Q_{\text{sa}}^2 - \sum_i R_i^4, \end{aligned} \quad (7)$$

$$\frac{dQ_{\text{su}}^2}{dt} = k_{s2} \left( Q_{\text{sa}}^2 - \frac{Q_{\text{su}}^2}{b_{s2}} \right) - \lambda Q_{\text{su}}^2. \quad (8)$$

В системе уравнений (1)–(8) параметры  $k_{11}^{12}$ ,  $k_{12}^{s1}$ ,  $k_{12}^{s2}$ ,  $k_{s2}^d$  представляют собой константы скоростей процессов вертикального перемещения  $^{137}\text{Cs}$ , сут $^{-1}$ ;  $k_{11}$ ,  $k_{12}$ ,  $k_{s1}$ ,  $k_{s2}$  – константы скоростей процессов сорбции  $^{137}\text{Cs}$  почвенно-поглощающим комплексом, сут $^{-1}$ ;  $b_{11}$ ,  $b_{12}$ ,  $b_{s1}$ ,  $b_{s2}$  – буферные константы;  $\lambda$  – константа скорости радиоактивного распада  $^{137}\text{Cs}$ , сут $^{-1}$ ;  $R_i^j$  – потоки  $^{137}\text{Cs}$  из  $j$ -го слоя системы лесная подстилка–почва в растительность ( $i$ -го типа) нижнего яруса, Бк м $^{-2}$  сут $^{-1}$ ;  $F_i$  – обратные потоки  $^{137}\text{Cs}$  на поверхность лесной подстилки, формирующиеся вследствие отмирания растительности, Бк м $^{-2}$  сут $^{-1}$ .

**Поведение  $^{137}\text{Cs}$  в древесном ярусе леса.** В первый период после выпадений радионуклиды, задержанные листьями (хвоей) и корой древесных растений, интенсивно перемещаются под полог леса в результате действия дождя и ветра. Наряду с процессом самоочищения крон деревьев происходят транслокация радиоактивных веществ во внутреннюю часть листьев (хвои) и их дальнейшая миграция в формирующуюся древесину. С течением времени, после достижения радионуклидами горизонтов системы лесная подстилка–почва, в которых сосредоточены корни деревьев, становится значимым процесс корневого накопления радионуклидов древесными растениями. В результате ксилемного переноса часть радиоактивных веществ накапливается в листьях (хвое) и в результате опада возвращается на поверхность лесной подстилки.

Для моделирования описанной совокупности процессов, определяющих круговорот  $^{137}\text{Cs}$  в системе почва–древесный ярус, в концептуальную схему модели включены компартменты “поверхность листья (хвои)”, “внутренняя часть листья (хвои)”, “кора”, а также “молодая древесина (ксилема)” и “сформированная древесина (ядро)”. Молодая древесина, включающая ксилемные каналы, сосредоточена во внешней части ствола дерева. В результате диффузии  $^{137}\text{Cs}$ , находящийся в составе ксилемного сока, мигрирует во внутреннюю часть древесного растения. Указанные про-

цессы описаны системой дифференциальных уравнений

$$\frac{dQ_{ba}}{dt} = -(k_{ba}^{II} + \lambda)Q_{ba}, \quad (9)$$

$$\frac{dQ_{vs}}{dt} = -(k_{vs}^{II} + k_{vs}^{vi} + \lambda)Q_{vs}, \quad (10)$$

$$\frac{dQ_{vi}}{dt} = k_{vs}^{vi}Q_{vs} + k_{ta}^{vi}Q_{ta} - (k_{vi}^{ta} + k_{vi}^{II} + \lambda)Q_{vi}, \quad (11)$$

$$\begin{aligned} \frac{dQ_{ta}}{dt} = & k_{s1}^{ta}Q_{sa}^1 + k_{s2}^{ta}Q_{sa}^2 + k_{vi}^{ta}Q_{vi} + k_{tu}^{ta}Q_{ta} - \\ & -(k_{ta}^{vi} + k_{ta}^{tu} + \lambda)Q_{ta}, \end{aligned} \quad (12)$$

$$\frac{dQ_{tu}}{dt} = k_{ta}^{tu}Q_{ta} - (k_{tu}^{ta} + \lambda)Q_{tu}. \quad (13)$$

В системе уравнений (9)–(13) параметры  $k_{vs}^{II}$  и  $k_{vs}^{vi}$  представляют собой константы скоростей процессов удаления  $^{137}\text{Cs}$  с поверхности хвои и листьев и транслокации радионуклида во внутреннюю часть хвои и листьев;  $k_{vt}^{II}$  – константа скорости удаления  $^{137}\text{Cs}$  при опаде. Переход  $^{137}\text{Cs}$  в древесину из листьев и обратный процесс описываются константами скорости  $k_{vi}^{ta}$  и  $k_{ta}^{vi}$ ; корневое поглощение – константами  $k_{s1}^{ta}$  и  $k_{s2}^{ta}$ ; миграция  $^{137}\text{Cs}$  из формирующейся древесины в сформированную и обратный процесс – константами  $k_{ta}^{tu}$  и  $k_{tu}^{ta}$ . Размерность всех описанных констант – сут<sup>-1</sup>.

В конце каждого года  $^{137}\text{Cs}$ , содержащийся в ксилеме, переходит в компартмент “сформированная древесина”. Этот процесс описан в модели дискретным образом:

$$\left. \begin{aligned} Q_{ta}^{y+1} &= 0 \\ Q_{tu}^{y+1} &= Q_{tu}^y + Q_{ta}^y \end{aligned} \right\}, \quad \text{если } t_b = 365, \quad (14)$$

где  $t_b$  – сезонное (годичное) время, сут;  $Q_{ta}^{y+1}$  и  $Q_{tu}^{y+1}$  – содержание радионуклида в компартментах “формирующаяся древесина” и “сформированная древесина” в начале нового года.

**Поступление  $^{137}\text{Cs}$  в растительность нижнего яруса леса.** В состав нижнего яруса леса входит большое количество видов растений, различающихся по своим биологическим характеристикам и особенностям развития. Наибольший интерес с точки зрения радиоэкологической значимости представляют грибы, поскольку они обладают способностью в значительных количествах накапливать  $^{137}\text{Cs}$  [7, 8]. Все виды грибов с использованием в качестве критерия коэффициента пе-

рехода  $^{137}\text{Cs}$  разделены на две группы [8]: группу А, типичными представителями которой являются *Boletus edulis* и *Cantharellus cibarius*, и группу В (*Russula species*, *Suillus luteus* и др.). Полагалось, что причина такой дифференциации заключается в различной глубине залегания грибного мицелия в почве.

К другому типу лесной растительности, потребление которой вносит вклад в формирование поглощенной дозы населения, можно отнести лесные ягоды. В регионах Российской Федерации, подвергшихся загрязнению в результате аварии на ЧАЭС, основными видами растительности, плоды (ягоды) которых составляют существенную долю в рационе человека, являются *Vaccinium myrtillus*, *Vaccinium Oxycoccus* и *Rubus idaeus*.

В состав рациона лесных животных наряду с компонентами древесного яруса входит большое количество видов растений, произрастающих под пологом леса. Выделение компонентов рациона проводилось на основании критериев радиоэкологической значимости и биологических различий рассматриваемых видов растений. В результате были идентифицированы следующие составляющие: грибы, части древесных растений, кустарники, многолетние кустарничковые растения и травянистые растения.

Для описания поступления  $^{137}\text{Cs}$  в растительность был использован подход, согласно которому интенсивность накопления радионуклида пропорциональна скорости прироста биомассы растений и количеству доступного для корневого поглощения  $^{137}\text{Cs}$  в системе лесная подстилка–почва:

$$R_i^j = CR_i \frac{dB_i}{dt} \sum_j \delta_i^j \frac{Q_{ja}}{\rho_j x_j}. \quad (15)$$

В представленном соотношении  $R_i^j$  – потоки  $^{137}\text{Cs}$  из  $j$ -го слоя системы лесная подстилка–почва в растительность ( $i$ -го типа) нижнего яруса,  $\text{Бк м}^{-2}$  сут<sup>-1</sup>;  $dB_i/dt$  – интенсивность прироста биомассы  $i$ -го типа растительности,  $\text{кг м}^{-2}$  сут<sup>-1</sup>;  $Q_{ja}$  – количество радионуклида в доступной форме в  $j$ -ом слое системы лесная подстилка–почва,  $\text{Бк м}^{-2}$ ;  $CR_i$  – концентрационное отношение;  $\delta_i^j$  – доля корневых систем растений, расположенных в  $j$ -ом слое системы лесная подстилка–почва;  $\rho_j$  – плотность,  $\text{кг м}^{-3}$ ;  $x_j$  – толщина  $j$ -го слоя, м.

Следует подчеркнуть, что уравнение (15) применимо для периода роста биомассы растительности ( $dB_i/dt > 0$ ). Изменение содержания радионуклида в растениях в период старения ( $dB_i/dt < 0$ )

пропорционально интенсивности отмирания биомассы

$$F_i = \frac{dB_i Q_i}{dt B_i}, \quad (16)$$

где  $F_i$  – обратные потоки радионуклида на поверхность лесной подстилки, формирующиеся вследствие отмирания растительности.

**Динамика биомассы лесной растительности.** При описании сезонной динамики биомассы растительности нижнего яруса леса было выделено три периода: нарастания биомассы, отмирания биомассы и физиологического покоя. Такой тип динамики характерен как для лесной, так и для луговой растительности [9] и может быть описан системой дифференциальных уравнений.

Период нарастания биомассы ( $t_0 < t < t_m$ ):

$$\frac{dB^i}{dt} = k_g B \left( \frac{B_{\max} - B}{B_{\max}} \right) \quad (17)$$

$$B^i(0) = B_{\min}^i,$$

где  $t_0$  – время начала роста;  $t_m$  – время достижения максимальной биомассы  $i$ -го типа растительности;  $k_g$  – константа скорости роста, сут $^{-1}$ ;  $B_{\max}$  – максимальная биомасса растительности, кг м $^{-2}$ ;  $B_{\min}$  – минимальная биомасса, кг м $^{-2}$ .

Период отмирания биомассы ( $t > t_m$ ):

$$\frac{dB^i}{dt} = -k_s B^i, \quad (18)$$

где  $k_s$  – коэффициент отмирания биомассы, сут $^{-1}$ .

Изменение биомассы растительности описывается уравнением (18) при соблюдении условия  $B^i > B_{\min}^i$ . При достижении порогового значения биомассы наступает период физиологического покоя:

$$\frac{dB^i}{dt} = 0. \quad (19)$$

Следует подчеркнуть, что динамика биомассы грибов, как правило, имеет два максимума в течение вегетационного периода (лето и осень), вследствие чего при разработке модели для этого типа лесной растительности рассматривали два периода роста биомассы и два периода ее отмирания. Изменение биомассы древесного яруса с возрастом насаждения также описано с помощью логистической зависимости.

**Накопление  $^{137}\text{Cs}$  в организме лесных животных.** В представленной модели описано накопление  $^{137}\text{Cs}$  в мышечной ткани двух видов лесных животных (лосей и косуль), мясо которых употребляется в пищу человеком. Поступление радионуклида в организм животных зависит как от

его содержания в растительности, употребляемой в пищу, так и от сезонного изменения состава рациона животных [10].

Динамика содержания радионуклида в мышечной ткани  $j$ -го вида животных ( $Q_{gm}^j$ , Бк м $^{-2}$ ) может быть описана уравнением

$$\frac{dQ_{gm}^j}{dt} = P^j N^j A_{mt}^j \sum_i f_r^{ij} C_i - (k_e^j + \lambda) Q_{gm}^j, \quad (20)$$

где  $C_i$  – концентрация  $^{137}\text{Cs}$  в различных видах лесной растительности (компонентах рациона), Бк кг $^{-1}$ ;  $f_r^{ij}$  – доля  $i$ -го вида корма в рационе;  $A_{mt}^j$  – доля поглощенного радионуклида, переходящего в мышцы;  $N^j$  – плотность животных в лесной экосистеме, м $^{-2}$ ;  $P^j$  – суточное потребление корма, кг сут $^{-1}$ ;  $k_e^j$  и  $\lambda$  – константы скоростей процессов биологического выведения и радиоактивного распада соответственно, сут $^{-1}$ .

Долю поглощенного  $^{137}\text{Cs}$ , переходящего в мышцы, оценивали, исходя из условий равновесия

$$A_{mt}^j = k_e^j M^j T F_g^j, \quad (21)$$

где  $M^j$  – средняя масса животного вида  $j$ ;  $T F_g^j$  – коэффициент перехода, сут кг $^{-1}$ .

Концентрация  $^{137}\text{Cs}$  в мышцах лесных животных ( $C_{gm}$ , Бк кг $^{-1}$ ) может быть оценена следующим образом:

$$C_{gm}(t) = \frac{Q_{gm}}{NM}. \quad (22)$$

## ОЦЕНКА ПАРАМЕТРОВ МОДЕЛИ

**Источники информации.** Подмодели “лесная подстилка–почва” и “растительность нижнего яруса” были параметризованы на основе данных, полученных на экспериментальных участках в районах Брянской обл., загрязненных в результате аварии на Чернобыльской АЭС [11]. При определении параметров, описывающих динамику биомассы лесной растительности, а также при параметризации подмоделей “древесный ярус” и “лесные животные” использовались литературные данные [5, 6, 9, 10, 12–17].

**Методы параметризации.** Значения буферных констант, почвенных характеристик и параметров, отражающих распределение корневых систем растений, определены непосредственно на основе анализа экспериментальных данных. Для оценки констант вертикальной миграции  $^{137}\text{Cs}$  в почве, концентрационных отношений ( $CR$ ) и параметров подмодели “древесный ярус” применялись специальные методы, позволяющие исполь-

**Таблица 1.** Буферные константы и константы скоростей процессов миграции  $^{137}\text{Cs}$  в системе лесная подстилка–почва

Параметр	Автоморфный ландшафт, хвойный лес	Гидроморфный ландшафт, хвойный лес	Автоморфный ландшафт, лиственый лес
$b_{ll}$	12.8	7.9	4
$k_{ll}$	0.3	0.4	0.3
$k_{l1}^{l2}$	0.01	0.0054	0.004
$b_{l2}$	30	13.2	27
$k_{l2}$	0.3	0.4	0.3
$k_{l2}^{s1}$	0.023	0.0045	0.057
$b_{s1}$	85	30.5	211
$k_{s1}$	0.3	0.4	0.3
$k_{s1}^{s2}$	0.021	0.0063	0.017
$b_{s2}$	6.1	17.4	99
$k_{s2}$	0.3	0.4	0.3
$k_{s2}^d$	0.0001	0.0001	0.0001

зовать накопленную информацию по динамике распределения  $^{137}\text{Cs}$  между компонентами лесной экосистемы. Для проведения такого рода идентификации методом покоординатного спуска [18] минимизировался функционал

$$I = \sum_i \left( \frac{Q_{\text{mod}}^i(p) - Q_{\text{exp}}^i}{Q_{\text{exp}}^i} \right)^2, \quad (23)$$

где  $Q_{\text{exp}}^i$  и  $Q_{\text{mod}}^i(p)$  представляют экспериментальные и расчетные данные;  $p$  – вектор параметров модели.

**Таблица 2.** Константы скоростей процессов миграции  $^{137}\text{Cs}$  в древесном ярусе леса

Параметр	Хвойный лес	Лиственный лес
$k_{vs}^{ll}$	0.0495	0.0495
$k_{vi}^{ll}$	0.000633	0.00264
$k_{vs}^{vi}$	0.00005	0.00005
$k_{vi}^{ta}$	0.003	0.003
$k_{ta}^{vi}$	0.01	0.01
$k_{s1}^{ta}$	0.0012	0.0012
$k_{s2}^{ta}$	0.00052	0.00052
$k_{ta}^{tu}$	0.005	0.005
$k_{tu}^{ta}$	0.0001	0.0001

Параметры модели были определены для различных типов лесных экосистем – лиственных и хвойных насаждений, произрастающих на почвах авто- и гидроморфного ряда (табл. 1–3). Константы скоростей процессов биологического выведения  $^{137}\text{Cs}$  из организма косуль и лосей ( $k_e$ ) составляют 0.046 и 0.023 сут $^{-1}$ . Значения коэффициентов перехода  $^{137}\text{Cs}$  в мышцы ( $TF_g$ ) для этих видов животных принимались равными соответственно 0.45 и 0.19 сут  $\text{kg}^{-1}$  [16, 17].

## ПРОВЕРКА АДЕКВАТНОСТИ МОДЕЛИ

Представленная модель была проверена с использованием независимых экспериментальных данных, в том числе в рамках программы BIOMASS, проводимой МАГАТЭ [19]. В последнем случае результаты модельных расчетов сравнивались с экспериментальными данными, полученными для участка хвойного леса, подвергшегося радиоактивному загрязнению в результате аварии на Чернобыльской АЭС и расположенного в Житомирской обл. (Украина). На рис. 2 приведены (в качестве примера результатов верификации в рамках программы BIOMASS) расчетные и экспериментальные данные, отражающие изменение концентрации  $^{137}\text{Cs}$  в гумусном горизонте подстилки и органоминеральном горизонте почвы.

На рис. 3 показано сравнение динамики концентрации  $^{137}\text{Cs}$  в мышцах лесных животных, рассчитанной с помощью модели, со среднегодовыми данными, полученными в регионе Харбо (Швеция) в период с 1986 по 1991 г. [20]. Соответ-

ствие результатов расчета содержания  $^{137}\text{Cs}$  в конечном звене лесной "пищевой цепочки" экспериментальным данным позволяет сделать вывод о реалистичном описании моделью совокупности процессов миграции  $^{137}\text{Cs}$  в лесной экосистеме.

## АНАЛИЗ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ МОДЕЛИ

Разработанную модель использовали для оценки влияния различных факторов на интенсивность накопления  $^{137}\text{Cs}$  в компонентах лесной экосистемы. С этой целью был проведен анализ чувствительности выходных переменных модели к изменению наиболее значимых параметров, основанный на использовании индекса чувствительности  $SI$  [5]. Значения  $SI$  (изменяющегося от 0 до 1) позволяют провести количественное сравнение значимости ряда радиоэкологических показателей. На рис. 4 показаны значения  $SI$ , отражающие влияние концентрационных отношений ( $CR^{ds}$ ,  $CR^{gr}$  и  $CR^{mu}$ ), величины максимума потребления грибов в составе рациона животных ( $I_{max}$ ) и времени достижения этого максимума ( $T_{max}$ ) на содержание  $^{137}\text{Cs}$  в мышцах косуль и лосей в осенний период. Полученные результаты позволяют заключить, что параметр  $CR^{mu}$ , характеризующий интенсивность накопления  $^{137}\text{Cs}$  грибами, а также показатели урожайности этого вида лесной растительности существенным образом влияют на поступление  $^{137}\text{Cs}$  в организм косуль. Несколько иная картина наблюдается при оценке

Таблица 3. Концентрационные отношения, характеризующие переход  $^{137}\text{Cs}$  в растительность нижнего яруса леса

Тип лесной растительности	Параметр	Значение
Ягоды	$CR^{be}$	11
Грибы (группа А)	$CR^{mu1}$	46
Грибы (группа В)	$CR^{mu2}$	46
Трава	$CR^{gr}$	5.7
Кустарничковые растения	$CR^{ds}$	4.1
Кустарники	$CR^{bu}$	21

влияния этих факторов на накопление  $^{137}\text{Cs}$  в мышцах лосей, поскольку доля грибов в составе рациона этих животных значительно меньше.

## ПРОГНОЗИРОВАНИЕ НАКОПЛЕНИЯ $^{137}\text{Cs}$ В ЛЕСНОЙ ПРОДУКЦИИ

Разработанную модель использовали для прогнозирования содержания  $^{137}\text{Cs}$  в лесной продукции, употребляемой в пищу человеком. На рис. 5 и 6 приведены расчетные данные (плотность выпадений  $^{137}\text{Cs}$  1 кБк  $\text{m}^{-2}$ ), отражающие изменение концентрации  $^{137}\text{Cs}$  в грибах и ягодах, а также сезонную динамику содержания этого радионуклида в мышцах косуль и лосей. При расчетах использовали модель, параметризованную для

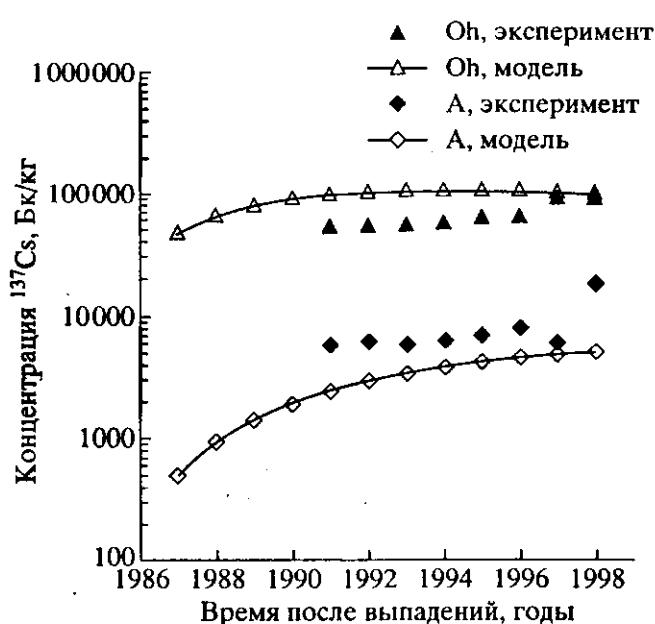


Рис. 2. Динамика концентрации  $^{137}\text{Cs}$  в гумусном горизонте подстилки (Oh) и органоминеральном горизонте почвы (A). Сравнение экспериментальных данных для хвойного леса (полугидроморфный ландшафт), расположенного в Житомирской обл. (Украина), и результатов модельных расчетов.

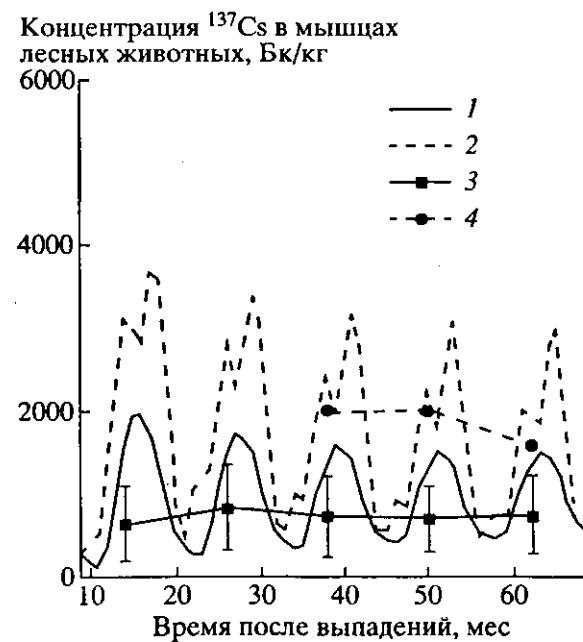


Рис. 3. Изменение концентрации  $^{137}\text{Cs}$  в мышечной ткани лосей (1, 3) и косуль (2, 4) после аварии на ЧАЭС (регион Харбо, Швеция). 1, 2 – результаты модельных расчетов; 3, 4 – экспериментальные данные [20].

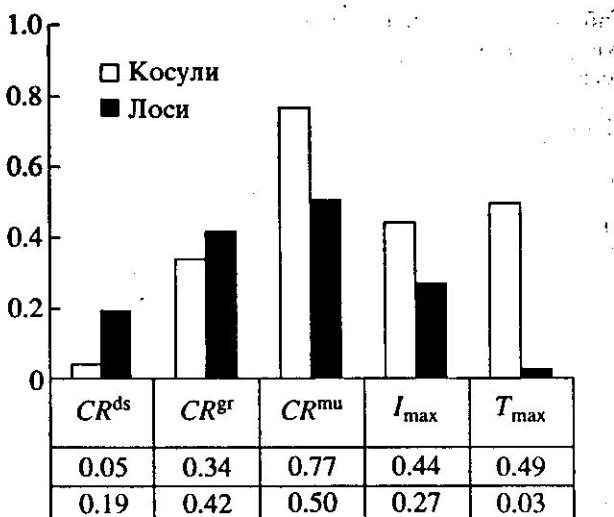


Рис. 4. Индексы чувствительности, отражающие влияние концентрационных отношений, величины максимума потребления грибов в составе рациона животных ( $I_{max}$ ) и времени достижения этого максимума ( $T_{max}$ ) на содержание  $^{137}\text{Cs}$  в мясе косуль и лосей (10-й год после выпадений).

хвойного леса, произрастающего на почвах полуgidроморфного ряда. Полученные результаты демонстрируют существенное различие в накоплении  $^{137}\text{Cs}$  грибами с различной глубиной залегания мицелия (рис. 5), причем с течением времени это различие уменьшается вследствие миграции  $^{137}\text{Cs}$  по профилю почвы. Отмечены значительные сезонные вариации концентрации  $^{137}\text{Cs}$  в

мышцах лесных животных (рис. 6), обусловленные изменением состава их рационов в течение года. Величина максимального содержания  $^{137}\text{Cs}$  в организме косуль и лосей определяется интенсивным потреблением грибов в осенний период, что полностью согласуется с результатами экспериментальных исследований, изложенных в [16].

Изменение накопления  $^{137}\text{Cs}$  в различных видах лесной растительности, в результате вертикального перемещения этого радионуклида по профилю почвы, оказывает влияние на размах сезонных колебаний содержания  $^{137}\text{Cs}$  в организме животных и на среднегодовую динамику этого показателя. Снижение среднегодовой концентрации  $^{137}\text{Cs}$  в мышцах косуль (до 2 раз за 20-летний период) обусловлено уменьшением накопления  $^{137}\text{Cs}$  в растительности нижнего яруса леса, составляющей основу рациона этого вида животных. Динамика содержания  $^{137}\text{Cs}$  в мышцах лосей в значительной степени определяется изменением накопления этого радионуклида в листве и хвое деревьев, характеризующихся более глубоким залеганием корневых систем. В результате влияния этих факторов первоначальное различие в среднегодовой концентрации  $^{137}\text{Cs}$  в мышцах лосей и косуль, достигающее 2 раз в первые годы после выпадений, нивелируется по прошествии 20-летнего периода. Следует отметить, что для критических групп населения, употребляющих в пищу мясо лесных животных, вклад этого вида лесной продукции в формирование дозы внутреннего облучения может быть существенным. В то

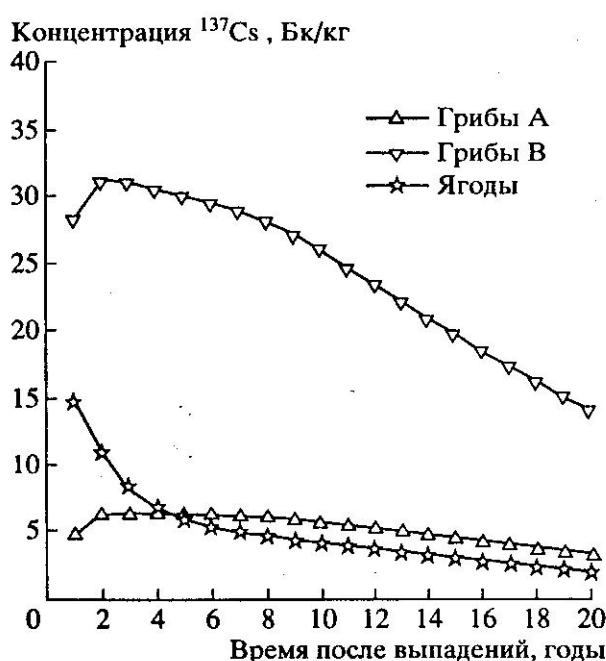


Рис. 5. Прогноз динамики содержания  $^{137}\text{Cs}$  в грибах и ягодах (хвойный лес, полугидроморфный ландшафт). Плотность загрязнения 1 кБк  $\text{m}^{-2}$ .

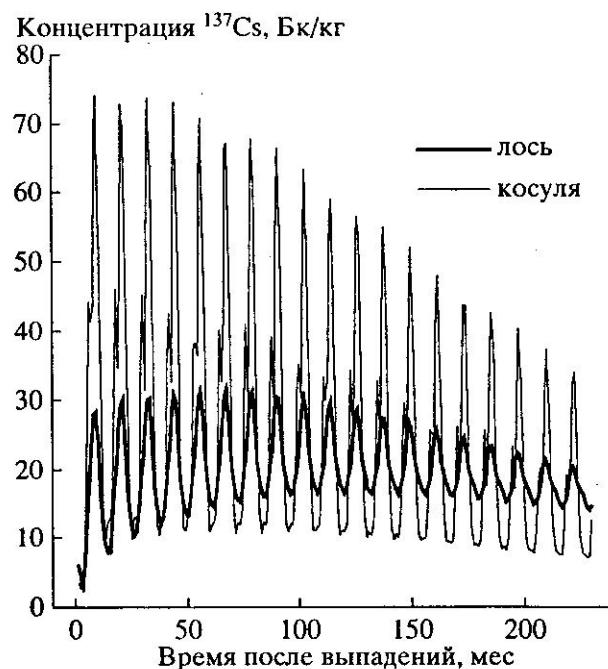


Рис. 6. Прогноз сезонной динамики содержания  $^{137}\text{Cs}$  в мясе косуль и лосей (хвойный лес, полугидроморфный ландшафт). Плотность загрязнения 1 кБк  $\text{m}^{-2}$ .

же время наличие значительных сезонных колебаний содержания  $^{137}\text{Cs}$  в организме косуль и лосей (рис. 6) дает возможность применения ограничительных контрмер, заключающихся в варьировании сроков охоты.

Разработанная модель может быть использована при решении теоретических проблем лесной радиоэкологии, связанных с изучением особенностей поведения  $^{137}\text{Cs}$  в лесных экосистемах различных типов, и для оценки влияния природных и антропогенных факторов на интенсивность процессов миграции этого радионуклида. Модель позволяет дать долгосрочный прогноз динамики содержания  $^{137}\text{Cs}$  в различных компонентах леса, лесной продукции и может быть использована для оценки дозовых нагрузок на население, проживающее в районах, подвергшихся радиоактивному загрязнению.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Olson J.S. // Health Phys. 1965. V. 11. P. 1385–1392.
- Прохоров В.М., Гинзбург Л.Р. // Экология. 1971. № 5. С.11–17.
- Алексахин Р.М., Нарышкин М.А. Миграция радионуклидов в лесных биогеоценозах. М.: Наука, 1977. 142 с.
- Mamikhin S.V. // J. Environ. Radioactiv. 1995. V. 28. № 2. P. 161–170.
- Shell W.R., Linkov I // Radioecology and the restoration of radioactive-contaminated sites. NATO ASI Series. Ser. 2. Environment. 1996. V. 13. P. 115–136.
- Лес и Чернобыль (Лесные экосистемы после аварии на Чернобыльской АЭС. 1986–1994 гг.) / Под ред. В.А. Ипатьева. Минск: МНПП “Старнер”, 1994. 248 с.
- Shutov V.N., Bruk G.Ya., Basalaeva L.N. et al. // Radiat. Prot. Dosim. 1996. V. 67. № 1. P. 55–64.
- Pathway analysis and dose distributions. Joint study project № 5. Final report. EUR 16547 EN. Luxemburg, 1996. 130 p.
- Аткина Л.И. Структура и продуктивность травяно-кустарничкового яруса лесов Южной тайги Средней Сибири: Автореф. дис. ... канд. биол. наук. Красноярск, 1990. 27 с.
- Cederlung G., Ljungqvist H., Markgreen G. et al. // Swed. Wildlife Res. 1980. V. 11. P. 171–247.
- Fesenko S.V., Soukhova N.V., Sanzharova N.I. et al. // J. Environ. Radioactiv. 2000 (in press).
- Behaviour of radionuclides in natural and semi-natural environments. Experimental collaboration project № 5. Final report. / Ed M. Belli, F. Tikhomirov. EUR 16531 EN. Luxemburg, 1996. 147 p.
- Козловский В.Б., Павлов В.М. Ход роста основных лесообразующих пород СССР. Справочник. М.: Лес. пром-сть, 1967. 327 с.
- Краснов В.П., Орлов А.А. // Раст. ресурсы. 1996. Т. 32. Вып. 1–2. С. 41–47.
- Переведенцева Л.Г. Агариковые грибы как компоненты лесных биогеоценозов. Автореф. дис. ... канд. биол. наук. Свердловск, 1980. 25 с.
- Lindner G., Drissner J., Herrmann T. et al. // Sci. Total Environ. 1994. V. 157. P. 189–196.
- Lowe V.P., Horill A.D. // Environ. Pollut. 1988. V. 54. P. 81–87.
- Васильев Ф.П. Численные методы решения экстремальных задач. М.: Наука, 1980. 520 с.
- IAEA. Model-Data Intercomparison Study. BIOMASS THEME 3 Forest Working Group. Working Document № 2. 2000 (in press).
- Johanson K.J., Bergstrom R. // Sci. Total Environ. 1994. V. 157. P. 309–316.

Поступила в редакцию  
03.04.2000

## Modelling of $^{137}\text{Cs}$ Behaviour in Forest Ecosystems and Prediction of Its Accumulation in Forest Products

S. I. Spiridonov<sup>1</sup>, S. V. Fesenko<sup>1</sup>, R. Avila<sup>2</sup>, I. A. Gontarenko<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Russian Institute of Agricultural Radiobiology and Agroecology, Obninsk, 249020 Russia;  
e-mail: rear@obninsk.org.

<sup>2</sup> Swedish Radiation Protection Institute, Stockholm

A mathematical model of  $^{137}\text{Cs}$  migration in forest ecosystem is presented, which describes the behaviour of this radionuclide in the forest litter-soil system, trees, understory and forest animals. The model's parameters for different types of forest ecosystems are estimated and model's adequacy is tested through the use of independent experimental data. The sensitivity of the model's output variables is analyzed to variations in the most significant parameters. The differences in the seasonal and mean annual dynamics of  $^{137}\text{Cs}$  concentration in muscles of roe deers and mooses are shown to be defined by specific features of the diets of these animals and variations in  $^{137}\text{Cs}$  content in the main diet components.