

ЭКОЛОГИЯ

УДК 574:631.438.2+004.942

ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ ПОСУТОЧНОЙ ДИНАМИКИ ^{137}Cs В ПИЩЕВОЙ СЕТИ ЭКОСИСТЕМЫ ЛИСТВЕННОГО ЛЕСА***С.В. Мамихин, В.М. Бадави, Д.Н. Липатов, Д.В. Манахов,
Т.А. Парамонова, В.В. Столбова, А.И. Щеглов**

Показано дальнейшее развитие имитационной модели EcoradOak_CS_FW сезонной динамики ^{137}Cs в компонентах экосистемы снытевой дубравы, в число которых теперь включены консументы 1-го и 2-го порядков. Моделируется перераспределение радиоцезия в полнозвенной пищевой сети лесной экосистемы типа *почва—растительный покров—травоядные животные—хищники*. Алгоритм, использованный в модели, позволяет учитывать влияние почвенных, метеорологических, фенологических и физиологических факторов на поведение радионуклида в этой сети и прогнозировать радиологические ситуации при различных условиях радиоактивных выпадений. Данные по загрязнению организма животных радиоцезием, полученные с помощью модели, лежат в основе расчета динамики внутренней дозовой нагрузки. Результаты моделирования могут быть использованы при нормировании лесохозяйственной продукции лиственного леса. Модель также применима для изучения перераспределения калия в трофической цепи экосистемы лиственного леса.

Ключевые слова: радиоактивное загрязнение, пищевые цепи, имитационное моделирование, дозовые нагрузки.

Введение

Перераспределение радионуклидов по трофическим цепям — предмет постоянного интереса в радиоэкологии. В последние годы эта область знаний стала привлекать все большее внимание в соответствии с развитием экоцентрического принципа в базовой концепции радиационной защиты окружающей среды. В связи с этим дополнительную актуальность получили исследования в области моделирования перераспределения радионуклидов в трофических цепях и сетях и динамики дозовой нагрузки на биоту природных экосистем.

Одними из наиболее сложных объектов в этом отношении являются лесные экосистемы. Многоярусная и неоднородная пространственная структура фитоценозов, разнообразие кормовой базы и сезонный тип питания лесных животных обуславливают сложный характер поведения радионуклидов в пищевой цепи экосистем. Применение метода математического моделирования в этой области сталкивается с большими трудностями. В первую очередь — это проблема получения исходной информации, необходимой для идентификации параметров и проверки моделей, что заставляет исследователей прибегать к вынужденным упрощениям и привлечению косвенных данных.

В такой ситуации алгоритмы реализованных моделей служат формализованным отображением уровня знаний об объекте моделирования, а также своеобразным руководством к проведению исследований, направленных на получение данных, необходимых для дальнейшего их совершенствования. Прогностические возможности радиоэкологических имитационных моделей мотивируют исследователей на их создание и развитие. Существует ряд моделей пищевых цепей, например таких как Ecosys, Farmland, Pathway, которые с той или иной степенью достоверности воспроизводят поведение радионуклидов в агроэкосистемах, однако их сложно адаптировать для применения в лесной радиоэкологии из-за специфики лесных экосистем, в первую очередь, из-за наличия древесного яруса и особенностей поведения и питания диких животных. Из известных нам работ сторонних исследователей наиболее разработанной в этом направлении может быть признана модель С.И. Спиридонова [24], в которой используются расчеты динамики биомассы растений и к которой привязана динамика загрязнения ^{137}Cs компонентов растительного покрова. В модели также с помощью коэффициентов перехода из суточного рациона в мясо и коэффициентов выведе-

*Исследование проводилось в рамках НИОКТР № АААА-А21-121012290189-8, выполняемой по государственному заданию, при поддержке Междисциплинарной научно-образовательной школы Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова «Будущее планеты и глобальные изменения окружающей среды».

дения ^{137}Cs из организма рассчитывается содержание радионуклида в мышцах косули и лося.

Подходы к созданию имитационной модели посуточной динамики ^{137}Cs в пищевой сети экосистемы лиственного леса

В ситуации постепенного накопления исходных данных, необходимых для построения радиоэкологических моделей пищевых сетей, наиболее логичным представляется их эволюционное развитие. По мере получения необходимой информации можно использовать алгоритмы, все более реалистично отображающие моделируемые процессы. Следуя этой логике, на первом этапе нами была разработана имитационная модель динамики содержания ^{137}Cs в компонентах пищевой цепи наземной экосистемы с шагом в одни сутки — Ecosad_FC [11], которую затем адаптировали к воспроизведению моделируемых процессов в лесных экосистемах различных типов гидроморфности. Основным параметр, определяющий загрязнение консументов, — коэффициент накопления, который является весьма приближенной и интегрированной характеристикой, не учитывающей воздействие многих важных факторов. Модель позволяет получать ориентировочные оценки загрязнения организма диких животных и дозовой нагрузки на них.

Более надежной альтернативой моделям, построенным с использованием коэффициентов накопления, могли бы служить таковые, условно названные «физиологическими»: они призваны отражать в той или иной степени действительные процессы поступления радионуклидов в организм растения или животного, их перераспределения по тканям и последующего выведения. В отношении растений такие модели уже построены (см., например, [10, 12, 24, 36]). В качестве примера «физиологической» модели поведения радионуклидов в организме животных может служить модель динамики ^{137}Cs в организме сельскохозяйственных животных, а именно лошадей и овец [23].

Препятствием к построению такой модели для диких животных является недостаток необходимых данных: собран крайне недостаточный объем исходной информации, они носят фрагментарный характер и сильно варьируют (см., например, обзор [34]). В такой ситуации вынужденная мера — использование упрощенного варианта алгоритма, когда организм животного рассматривается как черный ящик с входящими и выходящими потоками, а также привлечение информации, характеризующей поведение радиоцезия в организме сельскохозяйственных животных. В этом случае можно ограничиться данными о содержании радионуклида в корме и скорости выведения его из организма. Тогда будет полезна информация об «усвоении» радионуклида рассматриваемым ор-

ганизмом. Это могут быть, например, коэффициенты всасывания, т.е. поступления его из желудочно-желудочного тракта в кровь и лимфу с последующим распределением по внутренним органам животного. Показано, что для домашнего скота этот коэффициент составляет от 57 (овцы) до 75—100% (свиньи) от ^{137}Cs , поступившего в организм с кормом [2, 5]. Также есть обобщенные данные о том, что у жвачных животных всасывается 80% радионуклида от поступившего в желудочно-кишечный тракт [35].

В качестве параметров, характеризующих выведение радионуклидов, используются периоды полувыведения — биологический и эффективный (дополнительно учитывается радиоактивный распад) и предлагаются соответствующие уравнения, описывающие этот процесс. В основном выведение ^{137}Cs из организма представлено экспоненциальным уравнением с некоторой постоянной выведения (λ). Однако следует также упомянуть, что в ряде исследований выявлен и более сложный характер кривых. В частности, приводятся два периода полувыведения (для раннего и более позднего периодов с момента поступления радионуклида) и, соответственно, предлагаются двухэкспоненциальные уравнения [1, 2].

Показано, что выведение ^{137}Cs из организма объекта зависит от ряда факторов, определяющих скорость его метаболизма, в первую очередь, от размера и возраста особи. Так, период биологического полувыведения радиоцезия ($T_{1/2}$), время, за которое активность накопленного радионуклида уменьшается вдвое, составляет 6,5 сут для белых крыс, 23—25 — для кроликов [7], 41 — для лошадей и 70 сут — для человека [4]. Рассчитанные нами по этим данным постоянные выведения равны: для крыс — 0,107, для кроликов — 0,029, для лошадей — 0,017, для человека — 0,01. Для лошадей разного возраста этот период варьирует: для 9—12-месячных особей — в интервале 21,3—31,2, для 2—3-летних — около 41,2 сут [1]. Постоянные выведения, по нашим расчетам, равны 0,027 и 0,017 соответственно. Для северных оленей (*Rangifer tarandus*) приводится константа, равная 0,041 [3], для европейской косули (*Capreolus capreolus*) $T_{1/2}$, по результатам обследования 108 животных, она равна 22 дням (λ , по нашим расчетам, равна 0,032) [34]. Для чернохвостого оленя (*Odocoileus hemionus*) показано увеличение периода полувыведения ^{134}Cs в зависимости от его массы (от 10 сут при массе 40 кг до 35 при массе 120 кг), а также его уменьшение в зависимости от суточного потребления корма (от 21 сут при потреблении 0,5 кг до 15 — при потреблении 2,5 кг) (Nakonsen, Whicker, 1969, цит. по [27]). Последнее, по всей видимости, связано с тем, насколько полно переваривается корм.

Мы полагаем, что получить информацию по интенсивности всасывания в организм диких животных и выведения из него радионуклидов можно с помощью самой модели методом последовательных приближений (итераций), используя в качестве целевых показателей косвенные данные, в первую очередь, коэффициенты накопления (K_n). С этой целью получила дальнейшее развитие модель сезонной (посуточной) динамики содержания ^{137}Cs в компонентах экосистемы снытевой дубравы EcoradOak. Теперь, помимо вертикальной миграции радионуклида в почве, поступления его из почвы в растения и перераспределения по структурным частям древостоя, в модели воспроизводится посуточная динамика содержания радионуклидов в организме животных, растительноядных и хищников.

При локализации трофической модели (выбор участников сети — объектов моделирования) ее алгоритм должен учитывать специфические особенности физических характеристик, питания, сезонного поведения и т.д. Поясним это на примере. В качестве объектов моделирования (консументов) нами выбраны: лось (*Alces alces*), заяц русак (*Lepus europaeus*) — консументы 1-го порядка, и волк (*Canis lupus*) — консумент 2-го порядка, т.е. животные, типичные для средних широт европейской части Российской Федерации. Рассмотрим исходные данные, использованные при построении модели. Взрослые особи лося (консумент 1-го порядка) имеют массу в среднем 400 (250—570) кг. Спектр поедаемого им корма зависит от времени года: в вегетационный период (середина весны, лето, середина осени) — в основном травянистые растения и листья деревьев и кустарников (до 80—90%), в остальное время — ветви деревьев и кустарников (до 90—99%). В отдельные годы в сентябре до 40% поедаемого корма составляют плодовые тела грибов [20], однако несколько их генераций употребляются в течение лета и осени; ежегодный урожай грибов сильно варьирует из года в год (см., например, [21], из-за чего учесть этот вид корма в модели не представляется возможным. Существенный момент — влияние температуры воздуха на интенсивность метаболизма, а следовательно, на потребление корма травоядными животными. Известно, что средняя биомасса потребляемого в сутки лосем корма колеблется от 13 кг на особь зимой до 35 кг летом [20].

Взрослый заяц русак (консумент 1-го порядка) весит от 4 до 6 кг. В лесу и зарослях кустарников он предпочитает, пока есть возможность, питаться травянистой растительностью. И только после установления глубокого снежного покрова и образования наста зайцы переходят к преимущественному питанию древесной растительностью.

По наблюдениям в условиях вольерного содержания, установлено, что за сутки заяц съедает 500—800 г разного корма, а при питании только зелеными кормами — до 1 кг [22].

Консумент 2-го порядка, волк, весит в среднем 40—50 кг. В летние месяцы он ведет одиночный образ жизни или парами и питается в основном зайцами, птицей, грызунами. Зимой волки ведут стайный образ жизни, в их рацион входит мясо крупных млекопитающих — лося и кабана. Волк поедает за сутки в среднем 3,5—4 кг мяса [6].

Алгоритм имитационной модели переноса ^{137}Cs по пищевой сети EcoradOak_CS_FW

Описание алгоритма и работы модели EcoradOak_CS в отношении процессов, происходящих в звене пищевой цепи *почва—растение* экосистемы широколиственного леса, представлено в наших предыдущих публикациях, отражающих ее развитие [10, 12, 14, 15]. Подробно останавливаться на этом не будем, а только отметим, что модель создана на базе информации, полученной в ходе наших работ в 30-километровой зоне аварии на Чернобыльской АЭС в 1986—1993 гг., и с привлечением литературных данных других исследователей. Для дальнейшего использования модели EcoradOak_CS в качестве модуля в составе модели трофической сети EcoradOak_CS_FW с целью уточнения параметров модуля и дополнительной проверки его работы использованы наши полевые и лабораторные данные, относящиеся уже к отдаленному периоду после аварии [13, 17, 29, 30—32].

Основное внимание в статье уделено нашему подходу в моделировании динамики радионуклидов в звеньях *растения—консументы 1-го порядка* и *консументы 1-го порядка—консументы 2-го порядка*.

Объект моделирования — экосистема широколиственного леса на темно-серой лесной почве. Запас органического вещества в компонентах растительности рассчитывается в г абс. сух. массы/м². Модель является точечной, детерминированной с элементами стохастичности, и описывает поведение ^{137}Cs в почве, компонентах растительного покрова и организме лосей, зайцев и волков с шагом по времени в одни сутки. Рассчитывается динамика вертикального распределения радиоцезия по профилю почвы, плотности загрязнения им растительности и почвы (кБк/м²) и удельной активности компонентов растительного покрова и мяса животных (кБк/кг абсолютно сухой массы и свежей (сырой) массы). Модель предназначена для имитации динамики перераспределения ^{137}Cs в системе *почва—растения—травоядные животные—хищники* в условиях микродисперсных выпадений с размером частиц < 200 мкм.

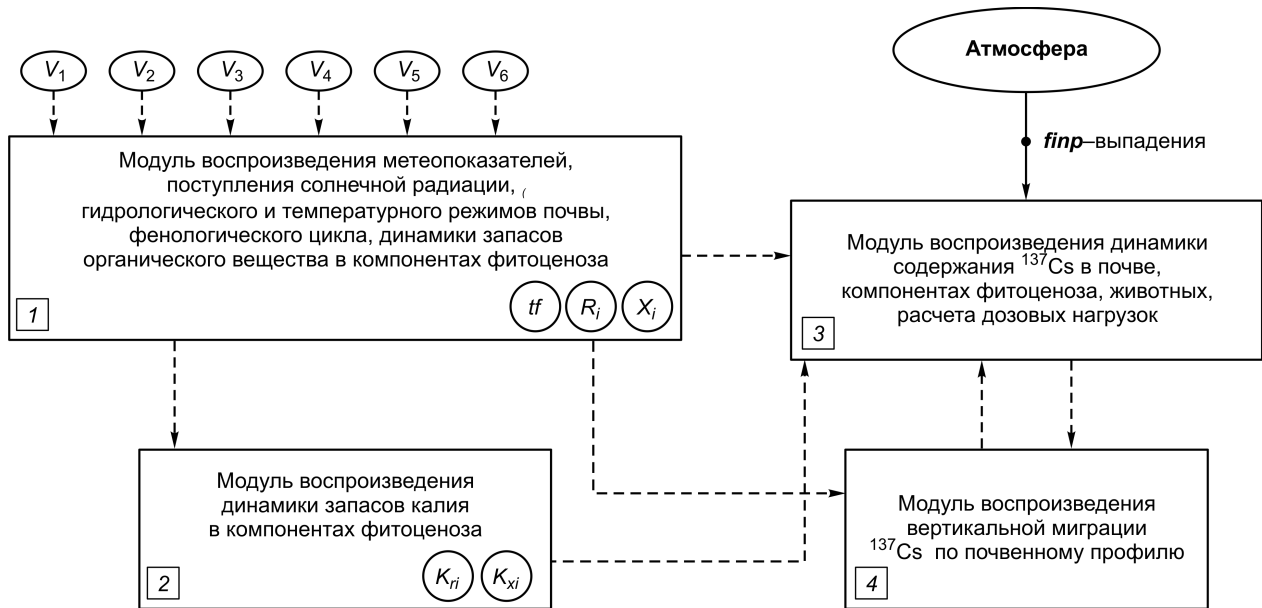


Рис. 1. Общая структура имитационной модели EcoradOak_Cs

Модель реализована в среде объектно-ориентированного программирования Visual Basic. Результаты выдаются в разном временном масштабе — от суток до года в цифровой и графической формах. Имеется демонстрационная версия для ознакомления с возможностями модели, где организован интерфейс, необходимый пользователю для выбора сценария загрязнения и определения срока прогноза.

Структура модели EcoradOak_CS_FW представлена на рис. 1. Она состоит из четырех модулей, воспроизводящих динамику: 1 — метеорологические факторы, температура и влажность почвы, запасы углерода органического вещества в компонентах фитоценоза; 2 — запасы калия в компонентах фитоценоза; 3 — содержание ^{137}Cs в почве, компонентах фитоценоза, организме травоядных и хищных животных и дозовая нагрузка на них; 4 — вертикальная миграция ^{137}Cs по почвенному профилю.

«Углеродный» модуль, описывающий динамику запасов органического вещества, в свою очередь состоит из семи блоков, воспроизводящих с шагом в один час метеорологические условия, поступление солнечной радиации на растительный покров, гидрологический и температурный режимы почвы, динамику запасов углерода в компонентах древесного и травянистого ярусов и в почве. В основу модуля положен алгоритм, использованный в продукционной модели Oak [10].

Организован расчет и передача в калиевый и радиоцезиевый модули необходимых для их работы данных по запасам углерода в компонентах растительного покрова ($\text{г}/\text{м}^2$), интенсивности прироста, опада и дыхания ($\text{г}/\text{м}^2/\text{сут}$), по скорости прохождения фенологического цикла. Здесь же рассчитывается «фенологическое» время (tf), что не-

обходимо для учета влияния наиболее критичного для средней полосы внешнего фактора — температуры воздуха (Q) на прохождение фенологических стадий состояния растений и на процессы жизнедеятельности растений и животных: $tf_{i+1} = tf_i + 1 + k \cdot (Q - Q_i)$, где Q_i — температура воздуха, характерная для данного календарного времени (t). Принято, что в первое полугодие повышенная по сравнению со среднемесячной многолетней температура воздуха ускоряет прохождение растением фенологического цикла, а во второе — замедляет (с коэффициентом $k = 0,05$).

С помощью данных по удельному содержанию калия [19, 33] и расчетных данных по динамике органического вещества, полученных из углеродного модуля, в калиевом модуле рассчитывается посуточное поступление калия в древесной с приростом, выведение его с опадом ($\text{г}/\text{м}^2/\text{сут}$) и его запас ($\text{г}/\text{м}^2$). Возрастная динамика удельного содержания этого элемента в листьях рассчитывается в модели на основе литературных данных [26].

Приведем дополненные предпосылки, заложенные в основу модуля воспроизведения динамики содержания ^{137}Cs в почве, компонентах растительного покрова и организме животных.

- Содержание радионуклида в растительности подразделяется на наружное и внутреннее загрязнение, динамика каждого рассматривается отдельно. Критерием такого разделения является путь поступления радионуклида в структурную часть растения. Внутреннее загрязнение обусловлено таковым из почвы через корневую систему или из других частей растения в результате перераспределения. При наружном загрязнении радионуклид попадает прямо на поверхность надземной части растения.

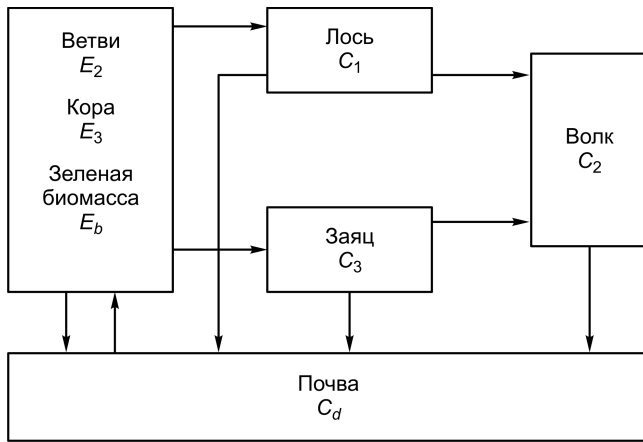


Рис. 2. Схема взаимосвязи переменных состояния модели, описывающих перераспределение радиоцезия в пищевой сети

- Предполагается, что поведение ^{137}Cs в растительности подчиняется тем же закономерностям, что и его химический аналог — калий.
- Динамика содержания радионуклида в компонентах растительного покрова рассматривается в связи с динамикой фитомассы. При сокращении биомассы компонента в случае, когда затраты на дыхание превышают фотосинтез, ^{137}Cs возвращается в распределительный пул.
- Распределение радионуклида по компонентам растений осуществляется пропорционально содержанию его химического аналога (калия) в соответствующем компоненте.
- Организм животных по отношению к ^{137}Cs рассматривается как «черный ящик». Содержание радионуклида в организме обуславливается балансом процессов его всасывания, выделения и радиоактивного распада.

Переменные состояния, описывающие перераспределение радиоцезия в пищевой сети, в общем виде связаны между собой так, как упрощенно показано на рис. 2. В качестве аргумента функций и переключателя потоков для смены сезонного вида корма служит «фенологическое» время (tf).

Таким образом, изменение переменной содержания радиоцезия (кБк/кг свежей массы) в организме i -го вида животного C_i описывается конечно-разностным уравнением следующего вида: $\Delta C_i = f_{IN} - f_{OUT} - f_{RD}$.

Функции переноса, использованные в данном уравнении, описаны следующим образом.

Поступление ^{137}Cs в организм животного (кБк/кг/сут): $f_{IN} = K_a \cdot X(tf) \cdot Y(tf) / M$, где K_a — коэффициент всасывания, $X(tf)$ — удельная активность корма (кБк/кг), $Y(tf)$ — количество корма, съедаемого животным за сутки (кг), M — средняя масса тела (кг). Принято, что коэффициент всасывания у лося, зайца и волка одинаковый и равен 0,8.

Специфические особенности питания лосей и зайцев отражены в модели следующим образом.

Удельная активность корма X варьирует не только от календарного, но и от «фенологического» времени (tf), как указывалось ранее: в вегетативный сезон ($120 < tf < 270$) основным кормом являются листья деревьев, кустарников, кустарничков и травянистые растения, в остальное время — ветви, кора.

$Y = a_1 + (a_2 - a_1) \cdot BELL(tf)$, где a_1 — минимальное количество корма, потребляемого за сутки (кг/сут), a_2 — максимальное; используется вспомогательная переменная $BELL(tf)$, заданная уравнением: $BELL = ((a - b)/(c - b))^e \cdot ((a - d)/(c - d))^{e \cdot ((d - c)/(c - b))}$, которая описывает асимметричную колоколообразную зависимость процесса от величины аргумента a и равна 0 при $a \leq b$, $a \geq d$, принимая максимальное значение 1 при $a = c$. Аргумент e отвечает за ширину колокола — чем меньше его величина, тем шире колокол. $BELL$ отображает зависимость интенсивности питания (количества поедаемого корма) от «фенологического» времени (tf). В нашем случае $a = tf$, $b = 120$, $c = 195$, $d = 270$; для лося $a_1 = 15$, $a_2 = 30$; для зайца $a_1 = 0,5$, $a_2 = 1,0$.

Для волка в модели также отражены сезонные особенности питания. С упрощением принято, что зимой, когда он ведет стайный образ жизни, главный источник питания — лоси, а летом — зайцы.

Выведение ^{137}Cs из организма животного (кБк/кг/сут): $f_{OUT} = a_i \cdot C_i$, где a_i — коэффициент выведения (1/сут). По нашим расчетам, проведенным с помощью модели методом итераций, для лося он равен 0,06, для зайца — 0,19, для волка — 0,015.

Уменьшение удельной активности ^{137}Cs в организме животного в результате радиоактивного распада (кБк/кг/сут): $f_{RD} = \lambda C_i$, где λ — коэффициент распада ^{137}Cs (1/сут), равный 0,0000629.

При идентификации параметров методом итераций мы опирались на обобщенную информацию по коэффициентам накопления. На основании литературных данных, нами принято, что K_H для звеньев лось—растительность и заяц—растительность равен 0,5, а волк—лось и волк—заяц он равен 3.

Уравнения расчета дозовых нагрузок. Расчет эффективной внешней дозы: $De = Sd \cdot ds \cdot K_{pp} \cdot ab \times \text{EXP}(1 - ag \cdot nd) \cdot \text{EXP}(-\lambda \cdot nd)$, где Sd — плотность загрязнения почвы (кБк/м²), ds — мощность поглощенной дозы в воздухе от плоского тонкого источника ^{137}Cs , расположенного на границе воздух—почва ((мкГр/сут)/(кБк/м²)); K_{pp} — коэффициент пересчета поглощенной дозы в эффективную (мкЗв/мкГр); ab , ag — параметры уравнения учета экранирования излучения почвой, которое отражает нисходящую миграцию радионуклида (б/р); λ — константа радиоактивного распада; nd — число дней с момента выпадения (сут).

Расчет эффективной внутренней дозы для всех консументов: $Dh_i = K_d \cdot X(tf) \cdot gv_i$, где K_d — дозовый

коэффициент (мкЗв/кБк); gv_i — количество корма, которое поглощает данный среднестатистический консумент (особь) в сутки (кг/сут).

Результаты и их обсуждение

Численные эксперименты с моделью показали адекватное воспроизведение ею возможных радиоэкологических ситуаций. Результаты моделирования посуточной динамики содержания радиоцезия в организме животных и внутренней дозы облучения для второго года после однократных выпадений по чернобыльскому сценарию представлены на рис. 3. По степени загрязнения организма ^{137}Cs среди рассмотренных видов диких животных лидирует волк, затем следует заяц и замыкает лось, что соответствует экспериментально определенным коэффициентам накопления.

Внутренняя дозовая нагрузка, рассчитанная по приведенной выше формуле, учитывающей радиоактивное загрязнение корма и его количество, поедаемое животным за сутки, имеет другое ранжирование. Лидирует лось, затем следуют волк и заяц. Это объясняется видом и количеством корма, поглощаемого конкретным видом животного. При рассмотрении внутригодичной кривой дозовой нагрузки у лося можно наблюдать ее резкое снижение при переходе животного с началом вегетационного сезона на другой, менее радиоактивный в данный год, вид корма — с веточного на травянистые растения и листья деревьев и кустарников.

Работа над моделью позволила уточнить некоторые важные аспекты, связанные с проблемой математического моделирования динамики радионуклидов в пищевых цепях наземных экосистем. Важнейшим моментом в этом процессе является идентификация параметров. Использование косвенной информации по калию, как это было сделано нами при разработке алгоритма поведения радиоцезия в дровостое, в данном случае к сожалению оказалось неприменимым. В свое время была даже предложена концепция «эффекта тро-

фического уровня» об увеличении содержания ^{137}Cs по отношению к калию на последовательных трофических уровнях (Pendelton et al., 1964, 1965; цит. по [9]), которая, правда, не подтвердилась для начальных звеньев пищевых цепей, где наблюдается, наоборот, снижение этого отношения. Было также показано, что средняя концентрация ^{137}Cs в мышцах лося, белохвостого оленя, бобра и лесного волка составляет 0,32; 0,28; 0,45 и 1,8 Бк/г зола соответственно. Соответствующие значения доли ^{40}K равнялись 8,5; 8,6; 8,3 и 8,2 [39]. Налицо явные различия между консументами разного порядка по содержанию радиоцезия.

В рамках данного исследования поднимался вопрос о вкладе отдельных компонентов фитоценоза в радиоактивное загрязнение мяса диких животных радиоцезием и учете этого при моделировании поведения данного радионуклида в пищевых цепях. По данным наших исследований, проводившихся в 30-километровой зоне аварии Чернобыльской АЭС, удельная активность надземной части травянистых растений и листьев деревьев дубравы примерно одинакова [28, 37]. Так, в 1992 г. средняя удельная активность травянистых растений составила 0,32, а листьев дуба — 0,27 кБк/кг абс. сух. массы. Полевые исследования, наиболее близкие к нашим объектам изучения, проводились в Ирландии [38]. Объектом была экосистема 150-летней дубравы (*Oak petraea*), подлесок — черничник, папоротник, мхи, лишайники. Удельная активность листьев дуба, черники и папоротника составила 57, 23 и 45 Бк/кг абс. сух. массы соответственно, т.е. показатели тоже достаточно близкие. Это дало нам основание ограничиться моделированием динамики радиоактивного загрязнения только компонентов дровостоя.

В нашей модели не учтено потребление консументами 1-го порядка плодовых тел грибов. Это связано с большой неопределенностью их загрязнения радиоцезием. Выявлено, что на накопление данного радионуклида грибами влияет множество факторов [18]. Прежде всего, это осадки и температура почвы в период, предшествующий

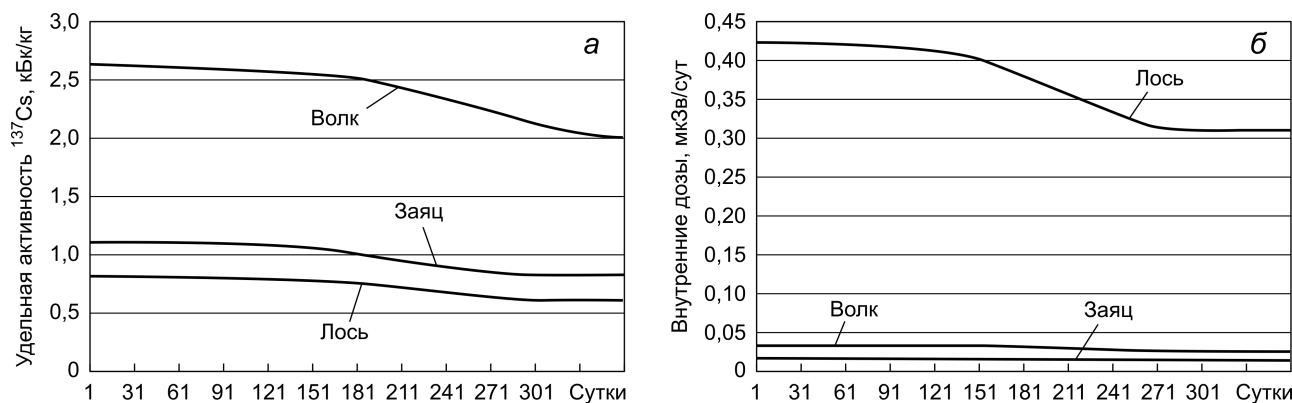


Рис. 3. Результаты расчета посуточной динамики удельной активности ^{137}Cs (кБк/кг свежей массы) в организме диких животных (а) и эффективной внутренней дозы (мкЗв/сут) для усредненной особи (б)

сбору грибов. Именно невозможность точного предсказания этих погодных факторов на ближайшие сезоны вегетации делает проблематичным прогнозирование накопления ^{137}Cs в данном виде корма лесных животных. Помимо этого известно, что массовое появление плодовых тел грибов также носит эпизодический характер, связанный с созданием оптимальных метеорологических и почвенных условий для плодоношения базидиомицетов.

В качестве целевого параметра, по которому можно калибровать модель, могут служить коэффициенты накопления. Однако попытки разыскать в доступных нам литературных источниках конкретную информацию по K_n показали, что для диких млекопитающих таких данных чрезвычайно мало. Даже популярный среди радиоэкологов программный пакет ERICA Assessment Tool (<https://www.ERICA-tool.com/ERICA/download/>), предназначенный для оценки дозовых нагрузок и рисков воздействия радиационного фактора на биоту, оперирует этим коэффициентом только для двух категорий млекопитающих — крупных и мелких роющих, причем и в том и другом случаях это одна и та же величина.

Использование коэффициентов накопления для калибровки модели или в качестве проверочных критериев налагает на такой подход определенные требования. В отсутствие локализованных, т.е. привязанных к конкретному местообитанию животных, данных логичным, с нашей точки зрения, является использование наиболее общей информации, полученной в результате анализа таковой из различных литературных источников [8].

Заключение

В представленном виде модель EcoradOak_CS_FW позволяет прогнозировать накопление радиоцезия в организме трех основных видов диких млекопитающих, типичных для лесов средней полосы, и рассчитывать посуточно внешнюю и внутреннюю дозовые нагрузки на особей этих видов при различных режимах выпадения радиоактивных осадков. Безусловно, упрощение схемы звена *жертва—хищник* до трех видов снижает прогностическую ценность модели. Однако предлагаемый алгоритм позволяет легко усложнять эту схему при наличии необходимых исходных данных. Так-

же он не исключает дальнейшее развитие модели до «физиологического» уровня.

Построение «физиологических» моделей требует знания количественных закономерностей распределения радионуклидов в организме конкретного вида животного. Хотя считается, что радиоцезий распределяется в организме в целом достаточно равномерно, исследования показывают существенную разницу в накоплении его разными органами. Так, в организме овцы коэффициенты накопления ^{137}Cs при его поступлении с кормом для внутренних органов варьируют от 0,046 (почки) до 0,13 (печень) [16], а содержание радионуклида в организме лактирующей коровы — от 12,6 (вымя) до 60,1 (печень) пКи/кг [25].

Следующим этапом развития представленной модели может быть включение в алгоритм учета наиболее важных факторов, оказывающих влияние на процессы усвоения и выведения радионуклидов, таких, например, как обогащенность корма химическими элементами — конкурентами радионуклидов, возраст конкретного животного, температура окружающей среды и т.д. Проведенный нами анализ имеющихся источников по данной тематике показал, что эти факторы зачастую тесно связаны между собой. Для вышеупомянутого функционального расширения алгоритма еще предстоит количественно охарактеризовать как влияние факторов на метаболические процессы, так и их взаимосвязь.

Есть ряд интересных с точки зрения прогнозирования динамики радионуклидов моментов, которые пока не удалось отразить в модели, но они могут определять перспективные направления ее дальнейшего развития. Например, описание возрастной структуры популяции животных, более реалистичное отображение их пищевого спектра и сезонных особенностей жизнедеятельности.

Авторы глубоко признательны своему учителю, профессору Тихомирову Федору Анатольевичу, которому 1 января 2021 г. исполнилось бы 90 лет. Его доброе отношение, советы и материалы всегда помогали нам в работе.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аверин В.С., Цыгвинцев П.Н., Яночкин И.В. и др. Оценка параметров накопления и выведения ^{137}Cs из мышечной ткани лошадей // Зоотехническая наука Беларуси. 2005. Т. 40.
2. Алексахин Р.М., Васильев А.В., Дикарев В.Г. и др. Сельскохозяйственная радиоэкология / Под ред. Р.М. Алексахина, Н.А. Корнеева. М., 1992.

3. Бельцев Д.И., Теплых Л.А., Лобова Е.К. Накопление ^{137}Cs оленями в условиях снежных ландшафтов // Мат-лы симпоз. «Миграция радиоактивных элементов в наземных экосистемах». Москва, 9—12 декабря 1968 г., АН СССР. М., 1971.
4. Бесядовский Р.А., Иванов К.В., Козюра А.К. Справочное руководство для радиобиологов. М., 1978.

5. Бударков В.А., Зенкин А.С., Васильев А.В. и др. Радиобиология. Радиационная безопасность сельскохозяйственных животных. М., 2018.
6. Волк. Происхождение, систематика, морфология, экология / Под ред. Д.И. Бибикова. М., 1985.
7. Ильенко А.И., Криволицкий Д.А. Радиоэкология. М., 1971.
8. Ильенко А.И., Крапивко Т.П. Экология животных в радиационном биогеоценозе. М., 1989.
9. Криволицкий Д.А., Тихомиров Ф.А., Федоров Е.А. и др. Действие ионизирующей радиации на биогеоценоз. М., 1988.
10. Мамихин С.В. Динамика углерода органического вещества и радионуклидов в наземных экосистемах (имитационное моделирование и применение информационных технологий). М., 2003.
11. Мамихин С.В., Липатов Д.Н., Манахов Д.В. и др. Имитационная модель динамики содержания ^{137}Cs в компонентах пищевой цепи наземной экосистемы // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 17. Почвоведение. 2020. № 2.
12. Мамихин С.В., Манахов Д.В. Имитационная модель поустойной динамики ^{90}Sr в подсистеме «почва—древостой» листового леса // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 17. Почвоведение. 2016. № 2.
13. Мамихин С.В., Манахов Д.В., Щеглов А.И. Сравнительный анализ распределения ^{137}Cs , ^{90}Sr и их химических аналогов в компонентах наземной части древесных растений в квазиравновесном состоянии // Радиационная биология. Радиоэкология. 2008. Т. 48, № 6.
14. Мамихин С.В., Манахов Д.В., Щеглов А.И. Распределение ^{137}Cs , ^{90}Sr и их химических аналогов в компонентах наземной части сосны обыкновенной в квазиравновесном состоянии // Радиационная биология. Радиоэкология. 2014. Т. 54, № 1.
15. Мамихин С.В., Никулина М.В., Манахов Д.В. Механизмы сезонной и многолетней динамики радиоактивных изотопов цезия в экосистеме дубового леса // Проблемы радиоэкологии и пограничных дисциплин / Под ред. В.И. Мигунова, А.В. Трапезникова. Вып. 6. Заречный, 2005.
16. Паницкий А.В. Особенности производства сельскохозяйственной продукции на площадке «Дегелен» Семипалатинского испытательного полигона: Автореф. дис. ... канд. биол. наук. Обнинск, 2013.
17. Парамонова Т.А., Мамихин С.В. Корневое поглощение Cs-137 и его распределение между наземными и подземными органами растений: анализ литературы // Радиационная биология. Радиоэкология. 2017. Т. 57, № 6.
18. Переволоцкий А.Н. Распределение ^{137}Cs и ^{90}Sr в лесных биогеоценозах. Гомель, 2006.
19. Ремезов Н.П., Быкова Л.Н. Потребление и круговорот азота и зольных элементов в лесах европейской части СССР. М., 1959.
20. Руденко Ф.А., Семашко В.Ю. Лось, кабан. М., 2003.
21. Сержанина Г.И., Змитрович И.И. Макромицеты. Минск, 1986.
22. Соколов В.Е., Иваницкая Е.Ю., Груздев В.В., Гентнер В.Г. Млекопитающие России и сопредельных регионов: Зайцеобразные. М., 1994.
23. Спиридонов С.И., Мукушева М.К. Семипалатинский испытательный полигон: радиоэкологические модели и риски. Алматы, 2010.
24. Спиридонов С.И., Фесенко С.В., Авила Р., Гонтаренко И.А. Моделирование поведения ^{137}Cs в лесных экосистемах и прогнозирование его накопления в лесной продукции // Радиационная биология. Радиоэкология. 2001. Т. 41, № 2.
25. Туников Г.М., Морозова Н.И., Захарова О.А., Левин В.И. Сельскохозяйственная радиоэкология: Учеб. пос. / Под ред. Л.В. Кирейчевой. Рязань, 2004.
26. Цыпенков В.Л., Банкина Т.А., Федоров А.С. Определение зольного состава растительных материалов. Л., 1981.
27. Шульц В., Уикер Ф. Радиоэкологические методы. М., 1985.
28. Щеглов А.И. Биогеохимия техногенных радионуклидов в лесных экосистемах: по материалам 10-летних исследований в зоне влияния аварии на ЧАЭС. М., 1999.
29. Щеглов А.И., Цветнова О.Б. Биологический круговорот Cs-137 и K-40 в дубравах и агрофитоценозах на темно-серых лесных почвах Тульской области России // Радиационная биология. Радиоэкология. 2017. Т. 57, № 2.
30. Щеглов А.И., Цветнова О.Б., Касацкий А.А. Динамика загрязнения ^{137}Cs различных компонентов лесных экосистем Брянского Полесья // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 17. Почвоведение. 2014. № 3.
31. Щеглов А.И., Цветнова О.Б., Попова Е.П. Влияние корней древесных растений на перераспределение ^{137}Cs в почвах сосняков и березняков зоны радиоактивного загрязнения // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 17. Почвоведение. 2016. № 2.
32. Щеглов А.И., Цветнова О.Б., Попова Е.П. Показатели поступления Cs-137 в почву с опадом корней и корневыми выделениями сосны обыкновенной // Радиационная биология. Радиоэкология. 2017. Т. 57, № 6.
33. Экспериментальные исследования ландшафтов Припятского заповедника. Минск, 1976.
34. Calmon P., Thiry Y., Zibold G. et al. Radionuclide transfer in forest ecosystems // Quantification of Radionuclide Transfer in Terrestrial and Freshwater Environments for Radiological Assessments. IAEA-TECDOC-1616. 2009.
35. Handbook of parameter values for the prediction of radionuclide transfer in terrestrial and freshwater environments. Vienna, 2010.
36. Mamikhin S.V., Kliashtorin A.L. Mathematical model of Cs-137 dynamics in the deciduous forest // J. Environ. Radioact. 1999. Vol. 47, N 1.
37. Mamikhin S.V., Tikhomirov F.A., Shcheglov A.I. Dynamics of Cs-137 in the forests of the 30-km zone around the Chernobyl nuclear power plant // Sci. Tot. Environ. 1997. Vol. 193.
38. Seymour E.M., Mitchell P.L., Leon Vintro L., Little D.J. A Model for the Transfer and Recycling of Cs-137 within a Deciduous Forest Ecosystem // Contaminated Forests — Recent Developments in Risk Identification and Future Perspectives / Ed. by I. Linkov, W. Schell. NATO Sci. Ser. 2. Environ. Security. 1999. Vol. 58.
39. Zach R., Hawkins J.L., Mayoh K.R. Transfer of Fallout Cesium-137 and Natural Potassium-40 in a Boreal Environment // J. Environ. Radioact. 1989. Vol. 10.

**SIMULATION MODEL OF ^{137}Cs DAILY DYNAMICS
IN THE FOOD WEB OF THE DECIDUOUS FOREST ECOSYSTEM****S.V. Mamikhin, W.M. Badawy, D.N. Lipatov, D.V. Manakhov,
T.A. Paramonova, V.V. Stolbova, A.I. Shcheglov**

The simulation model of seasonal dynamics of ^{137}Cs in the components of the snytvo oak forest ecosystem EcoradOak_CS_FW was further developed, which now includes first- and second-order consumers. The radiocesium redistribution in a full-scale food web of a forest ecosystem of the type “soil—vegetation cover—herbivores—predators” is modeled. The algorithm used in the model allows us to take into account the influence of soil, meteorological, phenological and physiological factors on the behavior of radionuclide in the food web and predict radiological situations under various conditions of radioactive fallout. Data on the contamination of animals with radiocesium obtained using the model are used to calculate the dynamics of the internal dose. The results of modeling can be used in the rationing of forest products of deciduous forests. The model is also applicable to the study of potassium redistribution in the trophic chain of a deciduous forest ecosystem.

Key words: radioactive contamination, food chains, simulation modeling, dose loads.

Сведения об авторах

Мамихин Сергей Витальевич, докт. биол. наук, вед. науч. сотр. каф. радиоэкологии и экотоксикологии ф-та почвоведения МГУ им. М.В. Ломоносова. *E-mail:* svmamikhin@mail.ru. **Бадави Ваель Махмуд**, канд. биол. наук, докторант каф. радиоэкологии и экотоксикологии ф-та почвоведения МГУ им. М.В. Ломоносова. *E-mail:* Wael@jinr.ru. **Липатов Денис Николаевич**, канд. биол. наук, ст. препод. каф. радиоэкологии и экотоксикологии ф-та почвоведения МГУ им. М.В. Ломоносова. *E-mail:* dlip@soil.msu.ru. **Манахов Дмитрий Валентинович**, канд. биол. наук, ст. препод. каф. радиоэкологии и экотоксикологии ф-та почвоведения МГУ им. М.В. Ломоносова. *E-mail:* demian2@yandex.ru. **Парамонова Татьяна Александровна**, канд. биол. наук, ст. препод. каф. радиоэкологии и экотоксикологии ф-та почвоведения МГУ им. М.В. Ломоносова. *E-mail:* tparamonova@soil.msu.ru. **Столбова Валерия Владимировна**, канд. биол. наук, ст. препод. каф. радиоэкологии и экотоксикологии ф-та почвоведения МГУ им. М.В. Ломоносова. *E-mail:* vstol@bk.ru. **Щеглов Алексей Иванович**, докт. биол. наук, профессор, зав. каф. радиоэкологии и экотоксикологии ф-та почвоведения МГУ им. М.В. Ломоносова. *E-mail:* shchegl@mail.ru.