

ЭКОЛОГИЯ

УДК 574.4+631.438.2

ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ ПОСУТОЧНОЙ ДИНАМИКИ ^{90}Sr В ПОДСИСТЕМЕ ПОЧВА—ДРЕВОСТОЙ ЛИСТВЕННОГО ЛЕСА*

С.В. Мамихин, Д.В. Манахов

Разработана имитационная модель динамики ^{90}Sr в почве и компонентах древостоя экосистемы лиственного леса с шагом один сутки, которая была использована для проведения численных экспериментов по уточнению механизмов поведения радионуклида. Алгоритм позволяет учитывать влияние метеорологических, фенологических и физиологических факторов на поведение ^{90}Sr и имитировать различные условия выпадений. Результаты моделирования могут быть использованы при нормировании лесохозяйственной продукции лиственного леса. Модель применима для изучения перераспределения кальция в древостое экосистемы последнего.

Ключевые слова: ^{90}Sr , имитационное моделирование, механизмы поведения, лесная экосистема.

Введение

Разработка математических моделей поведения радионуклидов в лесных экосистемах актуальна как в плане практического применения, так и в фундаментальном отношении. Имитационное моделирование за последние десятилетия эффективно используется для прогнозирования и реконструкции ситуаций радиоактивного загрязнения таких сложных природных комплексов, как лесные экосистемы. Перспективным представляется расширение области применения имитационного радиоэкологического моделирования для объяснения или уточнения механизмов поведения радионуклидов в лесных экосистемах. Для этого необходимо дальнейшее усложнение модели, уменьшение ее шага с учетом скорости протекания обменных процессов, включение в них функций, учитывающих физико-химические и физиологические особенности компонентов объекта моделирования. Интерес к изучению поведения радионуклидов в лесных экосистемах в силу их высокой хозяйственной и рекреационной ценности не снижается, и это создает дополнительные стимулы к совершенствованию метода. Как показали в свое время результаты международной научно-исследовательской программы по радиоэкологическому математическому моделированию «Биосфера: моделирование и оценка» («BIOsphere Modelling and ASSEssment», 1996—2001) [23], с накоплением и уточнением исходной информации появляются дополнительные возможности для создания радиоэкологических моделей, основанных на принципиально новых алгоритмах.

Одним из наиболее опасных в биологическом аспекте техногенных радионуклидов является ^{90}Sr . Ранее нами была представлена имитационная модель поведения этого радионуклида в почве и древостое экосистемы соснового леса с шагом в один год, которая успешно использовалась для проведения численных экспериментов по уточнению механизмов многолетней динамики элемента, а также для реконструкции ситуации загрязнения экосистемы сосняка в результате Кыштымской аварии [10]. В ходе этой работы выявлена настоятельная потребность в совершенствовании алгоритма для повышения адекватности модели и запланированы следующие направления:

- Рассмотрение процессов перераспределения радионуклида в рамках внутригодичной динамики со снижением шага до одного дня, что позволило бы учитывать внутригодичную динамику выпадений и взаимную компенсацию ряда важных потоков переноса радионуклида в экосистемах.

- Более тесная интеграция радиоэкологического модуля с модулем динамики органического вещества, что дало бы возможность более адекватно учитывать роль последнего как физического носителя радионуклидов. Постепенный отказ от феноменологической интерпретации поведения радионуклида в организмах в пользу физиологической точки зрения. Вычленение компонентов древостоя, существенно различающихся по физиологии (например, отдельное рассмотрение поведения радионуклидов в «наружной» (мертвые покровные ткани, ритидом) и «внутренней» коре (живая флоэма).

* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 14-04-00143-а).

• Включение в алгоритм правил перераспределения радионуклидов в системе *почва—растение* в соответствии с фенологическими циклами растений-доминантов и учета влияния метеорологических факторов.

Все эти и некоторые другие алгоритмические правила были реализованы в модели посуточной динамики ^{90}Sr в подсистеме *почва—древостой* экосистемы лиственного леса Ecorad_SR90, представленной в данной статье.

В работе мы опирались в первую очередь на данные по динамике содержания ^{90}Sr в древесосте и почве, полученные в ходе радиоэкологических исследований на Урале [1, 14] и в чернобыльских исследованиях [19]. Помимо этого привлекались данные по накоплению и транслокации в растительности кальция — химического аналога ^{90}Sr [13, 20]. Мы также провели дополнительные исследования по изучению распределения ^{90}Sr в компонентах наземной части древостоя [8, 9]. Сравнительный анализ подтвердил тесную корреляцию между концентрацией кальция и удельной активностью ^{90}Sr в наземных структурных частях.

Описание модели

Объект моделирования — лиственный лес на песчаных подзолистых почвах. Модель — точечная, детерминированная, с элементами стохастичности, описывает поведение ^{90}Sr в компонентах растительного покрова и почве с шагом по времени в одни сутки. Рассчитывали плотность загрязнения радиостронцием обоих объектов (кБк/м²), удельную активность компонентов древостоя (кБк/г абс. сух. массы), запас органического вещества в них

(г абс. сух. массы/м²). Модель предназначена для имитации динамики перераспределения ^{90}Sr в подсистеме *почва—древостой* в условиях микродисперсных выпадений с размером частиц < 200 мкм.

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

Структура модели. Модель состоит из четырех модулей, воспроизводящих динамику метеорологических факторов, температуры и влажности почвы, запасов углерода органического вещества (1) и кальция (2) в компонентах фитоценоза, динамику содержания ^{90}Sr в компонентах фитоценоза и почве (3) и вертикальную миграцию радионуклида по почвенному профилю (4) (рис. 1).

Углеродный модуль (1), описывающий динамику запасов органического вещества, в свою очередь состоит из 7 блоков, воспроизводящих с шагом 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 [6]. Организован расчет и передача в кальциевый (2) и стронциевый (3) модули необходимых для их работы данных по запасам углерода в компонентах растительного покрова (г/м²), интенсивности при-

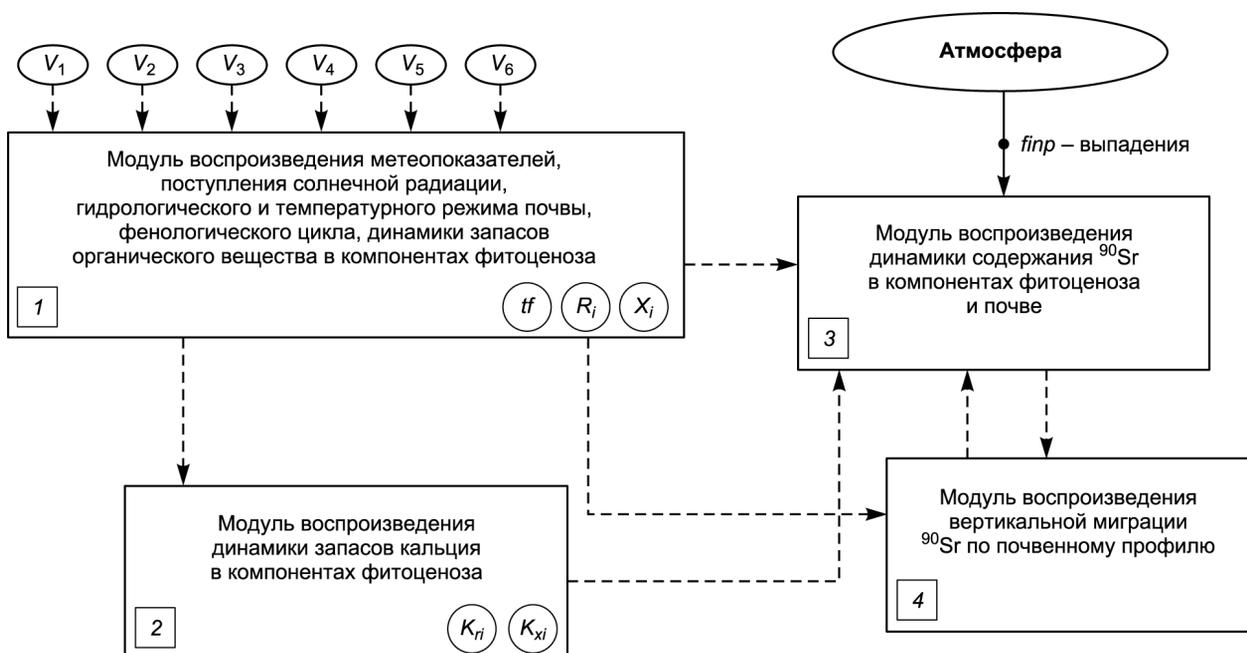


Рис. 1. Общая структура модели

роста, опада и дыхания (г/м²/сут), скорости прохождения фенологического цикла.

С использованием данных по удельному содержанию кальция [13, 20] и расчетных данных по динамике органического вещества, полученных из углеродного модуля, в кальциевом модуле (2) рассчитывается посуточное поступление элемента в древесной с приростом, выведение его с опадом (г/м²/сут) и запас (г/м²). Возрастная динамика удельного содержания кальция в листе рассчитывается в модели на основе литературных данных [17].

В основу модуля воспроизведения динамики содержания ⁹⁰Sr в компонентах растительного покрова и почве (3) заложены следующие предпосылки.

- Содержание радионуклида в растительности подразделяется на две части — наружное и внутреннее загрязнение, динамика которых рассматривается отдельно. Критерием такого разделения является путь поступления радионуклида в структурную часть растения. Внутреннее загрязнение обусловлено поступлением радионуклида из почвы через корневую систему или через другие части растения в результате перераспределения, наружное — только прямым попаданием радионуклида на поверхность надземной части растения.
- Предполагается, что поведение ⁹⁰Sr в древесное подчиняется тем же закономерностям, что и его химического аналога — кальция. Это относительная малоподвижность и слабая способность к реутилизации, закрепление в клеточных стенках в виде пектатов, образование кристаллов оксалата в листьях и одревесневших тканях; для надземной части — преимущественное отложение в ассимилирующих органах, коре ветвей и ствола деревьев [4, 12]. Малоподвижность стронция в растениях подтверждена в опытах рядом исследователей [16, 18, 21].
- 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, стронций возвращается в распределительный пул.
- Распределение радионуклида по компонентам древесной осуществляется пропорционально содержанию его химического аналога — кальция в соответствующем компоненте.

Структура стронциевого модуля представлена на рис. 2. В модуль включены следующие переменные состояния: Z_i — внутреннее загрязнение растительности, Y_i — наружное ее загрязнение, Scd — загрязнение почвы. Индекс i соответствует следующим структурным частям растений: 1 — распределительный пул, 2 — листья, 3 — ветви, 4w — древесина ствола, 4b — кора ствола, r — корни крупные, rsm — корни мелкие. Распределительный пул — фиктивный компонент, в котором со-

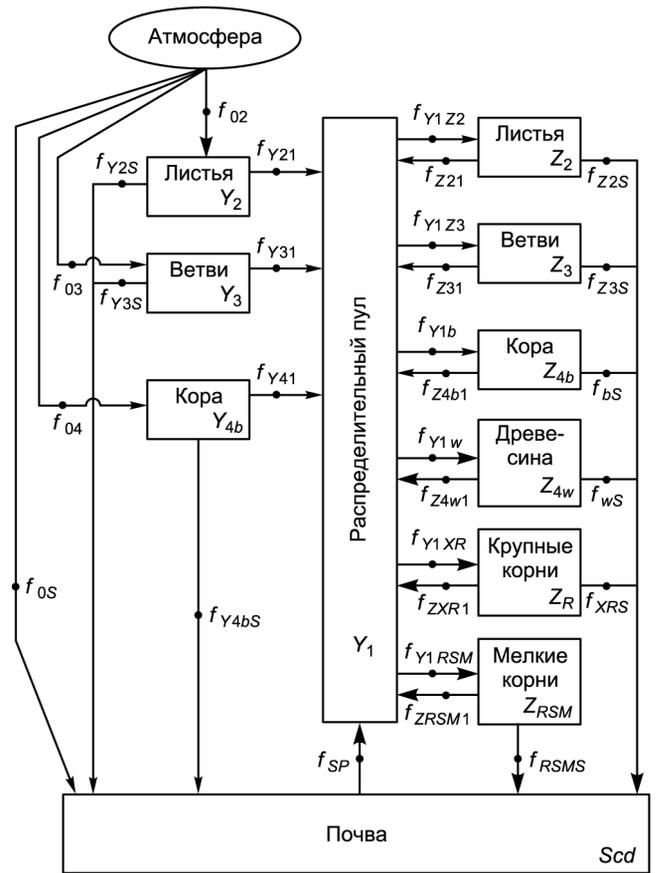


Рис. 2. Поточковая диаграмма динамики ⁹⁰Sr в компонентах экосистемы лиственного леса

держание радионуклида в конце суток равно нулю, поскольку принято, что все содержимое пула распределяется по компонентам древесной. Функции радиоактивного распада ⁹⁰Sr, содержащегося в компонентах экосистемы, не указаны, чтобы не загромождать диаграмму.

В аналитическом виде модуль представляет собой систему из 11 конечно-разностных уравнений следующего вида:

наружное загрязнение листьев, ветвей и коры: $\Delta Y_i = f_{0i} - f_{Yi1} - f_{YiS}$;

распределительный пул: $\Delta Y_1 = f_{SP} + \sum_{i=1}^{k=6} f_{Zi1} + \sum_{i=1}^{k=3} f_{Yi1} - \sum_{i=1}^{k=6} f_{Y1Zi}$;

внутреннее загрязнение листьев, ветвей, коры, древесины, крупных и мелких корней: $\Delta Z_i = f_{Y1Zi} - f_{Zi1} - f_{ZiS}$;

почва (в версии, когда формы содержания раздельно не рассматриваются): $\Delta Scd = f_{0S} + \sum_{i=1}^{k=3} f_{YiS} + \sum_{i=1}^{k=6} f_{ZiS} - f_{SP}$;

если используется версия, когда формы содержания рассматриваются раздельно, принято, что физико-химические формы содержания ⁹⁰Sr в почве по их доступности растениям можно условно объединить в две группы — доступные (ионная и

обменная формы, $Sbac$) и недоступные (фиксированные). Вторая группа может быть в свою очередь разбита на две части: временно недоступный растениям ^{90}Sr , содержащийся в топливных частицах и мертвом органическом веществе ($Stnc$), и практически недоступный растениям ^{190}Sr , фиксированный в почвенно-поглощающем комплексе ($Sbnc$).

$$\Delta Sd = (f_{inp}(ny, nd) - fap) - fsp + fps - rd \cdot Sd;$$

$$\Delta Stnc = (f_{inp}(ny, nd) - fap) + fps - fad - ftnr;$$

$$\Delta Sbac = ad \cdot Stnc + fav - faf - fsp - fbar;$$

$$\Delta Sbnc = af \cdot Sbac - fav - fbnr.$$

Функции переноса. Размерность функций — $\text{кБк}/\text{м}^2/\text{сут}$. Функции переноса (f_{0i}), отражающие поступление ^{90}Sr на поверхность рассматриваемых компонентов наземной части древостоя, описываются уравнениями вида:

$$f_{0i} = a_j (1 - \text{sig}(psize, 0, 1000)) \cdot X_i \cdot f_{inp},$$

где f_{inp} — функция, отражающая посуточную динамику поступления ^{90}Sr из атмосферы; X_i — фитомасса соответствующего компонента ($\text{г}/\text{м}^2$); $(1 - \text{sig}(psize, 0, 1000))$ — функция зависимости удержания выпадений от размера частиц $psize$ (мкм), a_j — компенсирующий коэффициент. Значения вспомогательной переменной $\text{sig}(a, b, c)$, заданной формулой: $\text{sig} = (a - b)^2 / (((c - b)/2 - b)^2 + (a - b)^2)$, возрастают от 0 при $a \leq b$ до 1 при $a \geq c$.

Принято, что выпадения, которые не были задержаны древостоем, поступают на поверхность почвы: $f_{0S} = f_{inp} - \sum_{i=1}^{k=3} f_{0i}$.

Важнейшим аспектом круговорота химического элемента в наземных экосистемах является интенсивность его поглощения растениями из почвы, которая определяется биологической доступностью элемента. В алгоритме модели предусмотрена возможность прямого учета информации о динамике доступных физико-химических форм содержания ^{90}Sr при ее наличии или использовании интегральной функции времени и физико-химических свойств конкретной почвы. В последнем случае функция поступления ^{90}Sr из почвы в растения описывается уравнением:

$$f_{SP} = am \cdot \text{bell}(a, b, c, d, e) \cdot Scd,$$

где am — коэффициент максимальной биологической доступности ^{90}Sr для данного типа почв. Переменная bell , заданная кривой Пирсона I рода, равная $\text{bell}(a, b, c, d, e) = ((a - b)/(c - b))^e \cdot ((a - d)/(c - d))^e \cdot ((d - c)/(c - b))$, описывает асимметричную колоколообразную зависимость процесса от величины аргумента a и равна 0 при $a \leq b$, $a \geq d$, принимая максималь-

ное значение 1 при $a = c$. Аргумент e отвечает за ширину колокола: чем меньше его величина, тем шире колокол. В данном случае a — количество дней, прошедших с момента выброса. Функция была откалибрована по данным Ф.А. Тихомирова о динамике содержания ^{90}Sr в компонентах древостоя [14, 15] и А.Н. Архипова с соавт. о динамике соотношения форм содержания радионуклида в почве [2].

Поступивший в растения из атмосферы и почвы ^{90}Sr далее перераспределяется по их органам через распределительный пул, который пополняется как поступлениями из почвы, так и отчислениями из структурных частей растений. Вклад структурных частей в распределительный пул описывается следующими уравнениями:

$$f_{Yi1} = c_i \cdot tba \cdot Y_i, f_{Zi1} = h_i \cdot Z_i/X_i,$$

где c_i и h_i — коэффициенты, специфические для каждого компонента, а tba — общая биологическая активность растений, функция фенологического времени $x12$ описывается уравнением: $tba = \text{bell}(x12, 1, 210, 360, 5)$. Принято, что максимум биологической активности наблюдается в конце июля.

Расчет распределения радионуклида из распределительного пула по компонентам древостоя производится по формуле: $f_{1i} = Y_1 \cdot k_i / \sum_{i=1}^{i=6} k_i$.

Выведение «наружного» ^{90}Sr из растительности с опадом описывается следующим образом: $f_{YiS} = b_i (Y_i - f_{Yi1})$, где b_i — коэффициент, который отражает скорость самоочистения i -й фракции от наружного загрязнения. Принято, что выведение «внутреннего» ^{90}Sr из растений происходит пропорционально опад: $f_{ZiS} = Z_i \cdot O_i/X_i$, где O_i — посуточный опад i -го компонента.

Подробное описание функций переноса для почвенного модуля представлено в наших более ранних работах [6, 7, 22].

Калибровка и проверка модели. После реализации алгоритма в виде компьютерной программы появилась возможность более точно идентифицировать уравнения функций переноса и величину уже известных параметров. В ходе разработки модели с ней проводились численные эксперименты по изучению устойчивости ее работы с различными вариантами функций переноса, конечным результатом чего и была приведенная здесь версия. Уточнение известных и определение неизвестных параметров модуля воспроизведения динамики ^{90}Sr проводили методом итераций (последовательные приближения) с привлечением данных Ф.А. Тихомирова по динамике его содержания в компонентах листового леса, полученных в ходе экспериментов по внесению радионуклида в кроны деревьев [14], А.И. Шеглова по содержанию ^{90}Sr

чернобыльского происхождения в компонентах древостоя в 1992 г. [19], а также наших данных [8, 9]. Для проверки адекватности воспроизведения моделью многолетней динамики радионуклида использовали данные полевых наблюдений, приведенные в коллективной монографии, посвященной анализу последствий радиационных аварий разных лет [1].

Результаты и их обсуждение

Построение имитационной модели позволило рассчитать посуточную динамику удельной активности компонентов древостоя и вертикальную миграцию ^{90}Sr в почве в течение необходимого числа лет. Появилась возможность сравнить функциональность алгоритмов воспроизведения погодичной [10] и посуточной динамики этого радионуклида. Основные преимущества от перехода на более дробный шаг по времени мы получили для анализа поведения ^{90}Sr в древостое. При радиоактивном загрязнении климаксных лесных экосистем в отсутствие дополнительного загрязнения возникает ситуация так называемого квазиравновесия, когда абсолютное содержание радионуклида в компонентах изменяется только в результате радиоактивного распада, а изменение относительного содержания связано только с возрастными особенностями древостоя и меняется слабо. Поэтому внутригодовая динамика загрязнения ^{90}Sr структурных частей растений в этот период весьма показательна и может отражать влияние метеорологических, фенологических и физиологических факторов на исследуемые процессы. На рис. 3 представлены результаты расчета посуточной динамики ^{90}Sr в компонентах лиственного древостоя на восьмой год после однократных выпадений плотностью 160 кБк/м^2 в начале первого года.

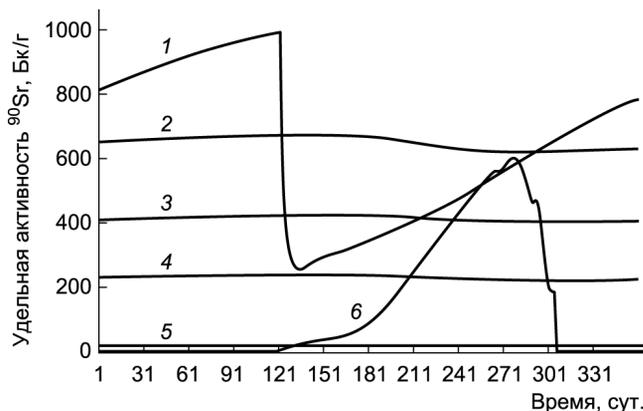


Рис. 3. Расчет посуточной динамики удельной активности ^{90}Sr в структурных частях древостоя лиственного леса на восьмой год после однократных выпадений: 1 — корни мелкие, 2 — кора, 3 — ветви, 4 — корни крупные, 5 — древесина, 6 — листья

Первоначальная пониженная удельная активность листьев и существенное снижение уровня загрязнения мелких корней в начале вегетационного сезона связаны с резким нарастанием их биомассы в этот период. Это явление характерно и для химического аналога стронция — кальция. Отмечено, что молодые ткани, как правило, обеднены кальцием, поэтому вновь образованные структурные фракции растений содержат его существенно меньше по сравнению с более старыми [3, 5, 17].

Многолетняя посуточная динамика удельной активности компонентов древостоя, рассчитанная с помощью модели, представлена на рис. 4. Следует отметить очень похожую картину поведения ^{90}Sr в листе и мелких корнях дуба, что подтверждает, как нам представляется, аналогичность его метаболизма в этих двух фракциях.

Анализ чувствительности модели показал особую роль параметров биологической доступности и перераспределения радионуклида из распределительного пула.

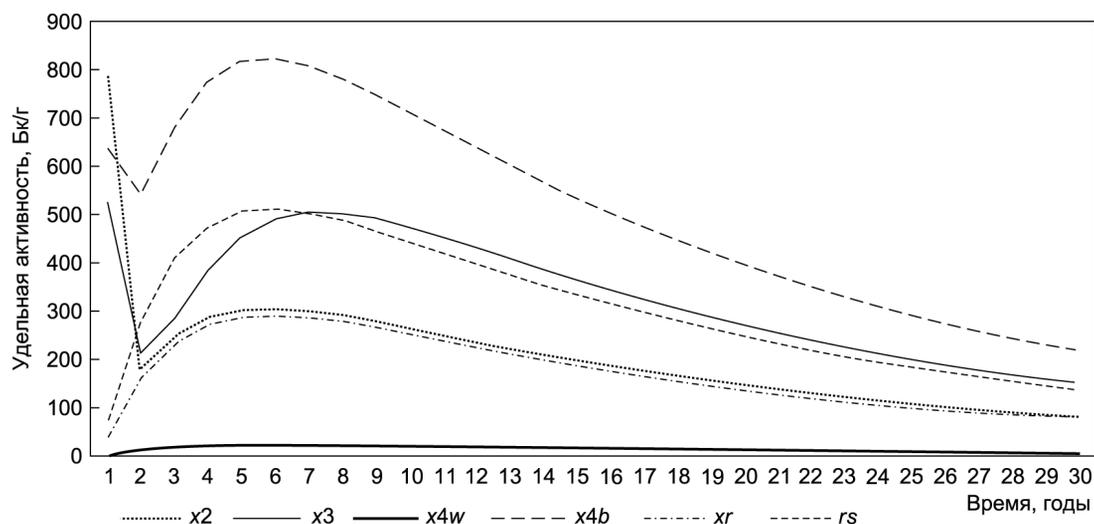


Рис. 4. Прогноз на 30 лет динамики удельной активности ^{90}Sr в структурных частях древостоя лиственного леса: x2 — листья, x3 — ветви, x4b — кора, x4w — древесина, xr — корни крупные, rs — корни мелкие

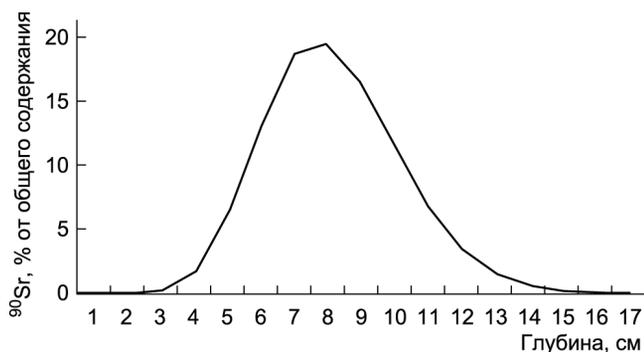


Рис. 5. Расчет вертикального распределения ^{90}Sr по профилю почвы (процент от общего содержания в почве) на восьмой год после однократных выпадений. Первые два слоя лесной подстилки (A0L + A0F) и A0H — переменной толщины, далее — сантиметровые

На рис. 5 представлены результаты расчета вертикального распределения ^{90}Sr в почве на восьмой год после его однократных выпадений. По результатам экспериментов с моделью вертикальная миграция ^{90}Sr особенно чувствительна к параметрам перехода радионуклида из одной физико-химической формы в другую, а именно — из подвижной в фиксированную.

В ходе работы над моделью обнаружился недостаток, связанный с отсутствием исчерпывающей информации по некоторым вопросам. В частности, слабым местом алгоритма явилась неопределенность в описании поступления ^{90}Sr в растения из почвы. Для конкретизации алгоритма и локализации модели необходимо наличие данных по динамике физико-химических форм его содержания в рассматриваемой почве. Воспользоваться данными по кальцию в этом случае не удастся. Исследования предыдущих лет показали аналогичность поведения ^{90}Sr , стабильного стронция и калия только в растительном покрове экосистем. При рассмотрении же процесса поглощения растениями ^{90}Sr из почвы отмечаются значительные

расхождения, которые объясняются, в частности, тем, что радионуклиды поступают в почву в виде микроколичеств и, как правило, в иной физико-химической форме, чем элементы, которые уже присутствуют в почве. Показано, что в этом случае их поведение может значительно отличаться от такового даже стабильных изотопов этих же элементов [11].

Выводы

Разработан алгоритм воспроизведения точной динамики загрязнения ^{90}Sr компонентов древостоя и почвы экосистемы лиственного леса. Алгоритм позволяет учитывать влияние метеорологических, фенологических и физиологических факторов на поведение радионуклида и имитировать различные условия выпадений.

Модель реализована на языке Visual Basic. Рабочая версия модели позволяет проводить численные эксперименты по изучению поведения ^{90}Sr в экосистеме и делать прогноз для большого спектра вероятных ситуаций радиоактивного загрязнения и реконструкцию уже случившихся радиоактивных инцидентов. Имеется демонстрационная версия, которая позволяет ознакомиться с возможностями модели на примере четырех предлагаемых на выбор сценариев выпадения.

Результаты моделирования могут быть использованы при нормировании лесохозяйственной продукции лиственного леса. Модель применима для изучения перераспределения кальция в древостое его экосистемы.

Авторы глубоко признательны своему учителю, профессору Тихомирову Федору Анатольевичу, которому 1 января 2016 г. исполнилось бы 85 лет. Его доброе отношение, советы и материалы послужили основой данной работы, как и многих других.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Алексахин Р.М., Булдаков Л.А., Губанов В.А.* и др. Крупные радиационные аварии: последствия и защитные меры. М., 2001.
2. *Архипов А.Н., Озорнов А.Г., Паскевич С.А.* Биологическая доступность ^{137}Cs и ^{90}Sr в почвах 30-км зоны ЧАЭС // Докл. Междунар. науч. конф. «Чернобыль-94». Т. 1. Чернобыль, 1996.
3. *Гродзинский А.М., Гродзинский Д.М.* Краткий справочник по физиологии растений. Киев, 1973.
4. *Кramer П.Д., Козловский Т.Т.* Физиология древесных растений. М., 1983.
5. *Лахер В.* Экология растений. М., 1978.
6. *Мамихин С.В.* Динамика углерода органического вещества и радионуклидов в наземных экосистемах (имитационное моделирование и применение информационных технологий). М., 2003.
7. *Мамихин С.В.* Воспроизведение динамики форм содержания радиоцезия почвы в имитационных моделях наземных экосистем // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 17. Почвоведение. 2007. № 4.
8. *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 // Радиацион. биол. Радиоэкол. 2008. Т. 48, № 6.
9. *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 // Там же. 2014. Т. 54, № 1.
10. *Мамихин С.В., Никулина М.В.* Имитационная модель поведения ^{90}Sr в почве и древесном ярусе соснового леса // Там же. 2005. Т. 45, № 4.

11. Молчанова И.В., Караваева Е.Н. Ретроспективный обзор экспериментальных исследований поведения радионуклидов в почвенно-растительном покрове // Проблемы радиоэкологии и пограничных дисциплин. Вып. 4. Заречный, 2001.
12. Полевой В.В. Физиология растений. М., 1989.
13. Ремезов Н.П., Быкова Л.Н. Потребление и круговорот азота и зольных элементов в лесах европейской части СССР. М., 1959.
14. Тихомиров Ф.А. Вопросы радиоэкологии лесных биогеоценозов // Проблемы радиоэкологии и биологического действия малых доз ионизирующей радиации. М., 1976.
15. Тихомиров Ф.А. Распределение и миграция радионуклидов в лесах ВУРС при радиоактивных выпадениях // Экологические последствия радиоактивного загрязнения на Южном Урале. М., 1993.
16. Тюрюканов А.Н., Абатуров Ю.Д., Летова А.Н. Экспериментальное изучение роли корневых систем в миграции радионуклидов // Методы изучения корневых систем и организмов ризосферы. Л., 1968.
17. Цыпленков В.Л., Банкина Т.А., Федоров А.С. Определение зольного состава растительных материалов. Л., 1981.
18. Чеботина М.Я. Распределение Co-60, Sr-90 и Cs-137 в растениях гороха при внекорневом способе загрязнения их растворами радиоизотопов // Информ. бюл. АН СССР. 1971. № 13.
19. Щеглов А.И. Биогеохимия техногенных радионуклидов в лесных экосистемах: по материалам 10-летних исследований в зоне влияния аварии на ЧАЭС. М., 1999.
20. Экспериментальные исследования ландшафтов Припятского заповедника. Минск, 1976.
21. Bengtsson G.B. Mobility of superficially applied caesium-134 and strontium-85 in apple branches under precipitation-free conditions // Analyst. 1992. Vol. 117. P. 1193–1196.
22. Mamikhin S.V. Mathematical model of Cs-137 vertical migration in a forest soil // J. Environ. Radioactiv. 1995. Vol. 28, N 2. P. 161–170.
23. Shaw G., Venter A., Avila R. et al. Radionuclide migration in forest ecosystems — results of a model validation study // Ibid. 2005. Vol. 84. P. 285–296.

Поступила в редакцию
06.05.2015

SIMULATION MODEL OF ^{90}Sr DAILY DYNAMICS IN THE SYSTEM SOIL—WOOD STAND OF DECIDUOUS FOREST

S.V. Mamikhin, D.V. Manakhov

A simulation model of the ^{90}Sr dynamics in soil and wood stand components of the deciduous forest ecosystem with a step of one day was developed, that was used to conduct numerical experiments to clarify the mechanisms of ^{90}Sr behavior. The algorithm allow to take into account the impact of meteorological, phenological and physiological factors on the behavior of the radionuclide and to simulate different conditions of deposition. The simulation results can be used in the valuation of forest products of deciduous forest. The model is applicable to study the redistribution of calcium in the stand of deciduous forest ecosystem.

Key words: the forest ecosystem, simulation, ^{90}Sr , mechanisms of behavior.

Сведения об авторах

Мамихин Сергей Витальевич, докт. биол. наук, вед. науч. сотр. каф. радиоэкологии и экотоксикологии ф-та почвоведения МГУ имени М.В. Ломоносова. Тел.: 8(495) 939-50-09; *e-mail*: svmamikhin@mail.ru. **Манахов Дмитрий Валентинович**, канд. биол. наук, ст. препод. каф. радиоэкологии и экотоксикологии ф-та почвоведения МГУ имени М.В. Ломоносова. Тел.: 8(495) 939-50-09; *e-mail*: demian2@yandex.ru.