

Имитационное моделирование: применение в радиоэкологии

С.В.Мамихин¹, Д.Н.Липатов¹, Д.В.Манахов¹, Т.А.Парамонова¹, В.В.Столбова¹

¹Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова (Москва, Россия)

Статья знакомит читателя с основами использования имитационного моделирования в радиоэкологии. Приведено несколько примеров имитационных радиоэкологических моделей разного уровня, иллюстрирующих возможности метода. Модели позволяют исследовать процессы поведения радионуклидов в экосистемах, прогнозировать развитие радиоэкологической ситуации при различных сценариях выпадений, осуществлять реконструкцию радиоэкологических процессов, недостаточно изученных в ходе радиационных инцидентов прошлого, рассчитывать динамику дозовой нагрузки на компоненты экосистем и человека. Обсуждаются некоторые проблемы применения имитационного моделирования в радиоэкологии.

Ключевые слова: имитационное моделирование, радиоактивное загрязнение, экосистема, радионуклиды.

Проблема исследования и прогнозирования экологических последствий радиоактивного загрязнения, возникающего после аварий на ядерных объектах или в результате применения ядерного оружия, чрезвычайно важна для нашей цивилизации. В связи с бурным развитием современных вычислительных средств одним из основных методов исследования экологических систем и прогнозирования их поведения в различных ситуациях стал метод математического моделирования. Особенно широко в экологии используется так называемое имитационное моделирование. Его основная характеристическая черта — возможность менять те или иные параметры или функции в ходе работы модели. В отличие от аналитических моделей, реализуемых, как правило, на бумаге или с помощью специализированной компьютерной программы и включающих обычно всего два-три уравнения, имитационные модели работают только на компьютере и могут содержать десятки и даже сотни уравнений и состоять из нескольких субмоделей. Это позволяет наиболее полно использовать всю имеющуюся атрибутивную информацию и даже описывать в формализованном виде действительные механизмы изучаемых процессов.

Следует, наверно, напомнить, что процесс построения математической модели в экологии состоит из нескольких этапов [1]. Перечислим их

и кратко охарактеризуем для лучшего понимания дальнейшего изложения.

Постановка задачи — выделение конечного числа свойств и процессов, которые наиболее существенны для решения исследуемой экологической проблемы.

Концептуализация — обобщение и анализ информации, имеющей отношение к исследуемому объекту; оценка полноты этой информации; создание концептуальной схемы объекта.

Спецификация — определение входных переменных и переменных состояния будущей модели.

Идентификация — определение математических соотношений между вышеуказанными переменными, в том числе установление численных значений параметров модели.

Наблюдения и эксперименты — сбор недостающей информации.

Реализация модели — построение алгоритма модели в аналитическом виде или в виде компьютерной программы.

Проверка (верификация) модели — сравнение результатов моделирования с уже имеющейся информацией, полученной в ходе предварительных исследований.

Исследование модели — изучение свойств модели, ее устойчивости к варьированию начальных условий, поведения в исследуемом диапазоне факторов влияния и т.д.



Сергей Витальевич Мамихин, доктор биологических наук, ведущий научный сотрудник кафедры радиоэкологии и экотоксикологии факультета почвоведения Московского государственного университета имени М.В.Ломоносова. Область научных интересов — математическое моделирование потоков радионуклидов в окружающей среде, оценка дозовых нагрузок на компоненты биоты и человека.
e-mail: svmamikhin@mail.ru



Денис Николаевич Липатов, кандидат биологических наук, старший преподаватель той же кафедры. Научные интересы связаны с контролем загрязнения почв, радиоэкологией, геостатистикой.
e-mail: denis_lipatov@mail.ru



Дмитрий Валентинович Манахов, кандидат биологических наук, старший преподаватель той же кафедры. Изучает формы нахождения и биогеохимию естественных и техногенных радионуклидов.
e-mail: demian2@yandex.ru



Татьяна Александровна Парамонова, кандидат биологических наук, старший преподаватель той же кафедры. Занимается миграцией антропогенных радионуклидов в ландшафтах территорий, пострадавших от чернобыльской аварии, механизмами адаптации травянистых растений к абиогенному стрессу.
e-mail: tparamonova@soil.msu.ru



Валерия Владимировна Столбова, кандидат биологических наук, старший преподаватель той же кафедры. Специалист в области радиоэкологии, биотестирования.
e-mail: vstol@bk.ru

После построения модели ее используют для изучения объекта моделирования и прогнозирования или реконструкции его поведения в тех или иных условиях путем проведения численных экспериментов на компьютере.

Метод математического имитационного моделирования, по нашему мнению, в наибольшей степени отвечает объектам, целям и задачам экологических исследований. Это ядро современного системного анализа. Метод особенно актуален в радиоэкологии при изучении поведения радиоактивных веществ в окружающей среде и при оценке дозовой нагрузки на человека и биоту. Например, имитационное моделирование поведения радионуклидов позволяет учитывать нерегулярное изменение внешних по отношению к моделируемому объекту условий, в первую очередь режим радиоактивных выпадений и динамику их физико-химической формы. Кроме того, представляя объект исследования в формализованном виде, мы получаем возможность проведения экспериментов без нанесения какого-либо ущерба самому объекту. Это особенно ценно, потому что в радиоэкологических исследованиях мы имеем дело со сложными дисперсными источниками ионизирующего излучения, способными к миграции, и с такими уязвимыми в радиологическом отношении объектами, как многие компоненты экосистем и экосистемы в целом. Построение модели посредством варьирования входной информации позволяет проводить на компьютере численные эксперименты, т.е. имитацию различных вариантов выпадений, и изучать поведение биосферы или ее отдельных компонентов при радиоактивном загрязнении.

К настоящему времени создано значительное количество разнообразных имитационных математических моделей, которые воспроизводят ситуации, связанные с поступлением радионуклидов в окружающую среду, и могут быть использованы для оценки последствий радиоактивного загрязнения биосферы в целом или ее отдельных компонентов. Моделируется обычно пространственная и временная динамика радионуклидов в почвах, системах «почва—растения», экосистемах различных типов, пищевых цепочках и сетях, а также формирование доз облучения и его влияние на состояние живых организмов, целостность экосистем и здоровье людей.

Применение имитационного моделирования

Метод моделирования применяется в радиоэкологии уже много лет. Делались попытки построения моделей поведения радионуклидов еще на аналоговых вычислительных машинах (АВМ). Так, в 1961 г. Дж.С.Олсон предложил достаточно сложную по структуре реализованную на АВМ модель, в которой рассматривалась миграция радиоизотопов в компонентах травянистой экосистемы [2]. Позднее модели создавались уже на электронных вычислительных машинах.

Имитационное моделирование было применено для изучения и минимизации экологических последствий аварии на Чернобыльской АЭС. Сложная радиоэкологическая ситуация, возникшая в результате этого опаснейшего инцидента, послужила импульсом к разработке инструментария для изучения и количественного прогнозирования ее дальнейшего развития. Таким средством должны были стать и стали имитационные модели. Уже в то время они в наибольшей степени отвечали требованиям, предъявляемым к инструментам прогнозирования. Модели позволяли учитывать как условия выпадения радиоактивных осадков, так и многообразие факторов, оказывающих влияние на поведение радионуклидов в экосистемах. Начинаясь тогда же бурное развитие информационно-вычислительных технологий и упрощение доступа к вычислительным средствам послужили дополнительными стимулами к активизации усилий исследователей в этом направлении.

Чернобыльская авария стала одной из наиболее значимых экологических катастроф, она повлекла за собой обширное радиоактивное загрязнение. Следует отметить, что практические задачи, стоявшие в первые годы после аварии перед радиоэкологами, требовали локализации моделей — привязки их к конкретным местным условиям, например фи-

зико-химическим свойствам почв и особенностям их гидрологического режима, видовому составу растительного покрова, характеру радиоактивных выпадений и т.д. Необходимо было ответить на ряд неотложных вопросов прикладного характера. К примеру, оценить, насколько интенсивно будут мигрировать радионуклиды вниз по профилю почв 30-километровой зоны (зоны отчуждения) и не попадут ли они в ближайшее время в грунтовые воды, а далее — в источники технической и питьевой воды. Также важно было определить, насколько высоким будет уровень загрязнения сельско- и лесохозяйственной продукции, выявить основные пути и факторы перераспределения радионуклидов в экосистемах на загрязненной территории, количественно оценить эффективность биогеохимических барьеров и т.д. Все это вносило свои коррективы в процесс создания «чернобыльских» моделей. Предлагавшиеся модели существенно различались в связи с их предполагаемым использованием.

В качестве конкретного примера приведем описание двух групп моделей, разработанных на кафедре радиоэкологии и экотоксикологии факультета почвоведения Московского государственного университета имени М.В.Ломоносова. Начнем с относительно простых моделей вертикальной миграции ^{137}Cs в почвах лесного фитоценоза, которые рассмотрим подробнее, чтобы проиллюстрировать на несложном примере сам процесс моделирования.

Модель миграции ^{137}Cs в почвах

Поскольку в результате чернобыльской аварии были загрязнены почвы обширных территорий, одной из наиболее острых проблем стала опасность проникновения радионуклидов в источники питьевой воды. Поэтому в числе прочих задач требовалось дать оценку скорости вертикальной миграции радионуклидов (в первую очередь, радиоцезия как одного из наиболее опасных элементов) по профилю почвы.

С этой целью были построены квазидиффузионные математические модели вертикальной миграции ^{137}Cs в почвах контрастной степени гидроморфности: в автоморфной дерново-подзолистой почве элювиального ландшафта (экосистема дубравы с примесью сосны и березы) и в гидроморфной торфянисто-глеевой подзолистой почве аккумулятивного ландшафта (экосистема черноольшаника). Воспроизводилась ситуация мелкодисперсных радиоактивных выпадений после аварии. Было принято, что размер радиоактивных частиц не превышает 10 мкм. Шаг моделей по времени — 1 сут. Рассматривались подстилка (верхний горизонт почвы пере-

менной толщины) и 15 нижележащих сантиметровых слоев.

На рис.1 представлена потоковая диаграмма, отражающая топологическую структуру моделей, где блоки соответствуют содержанию мигранта в данном компоненте, а стрелками обозначены пути миграции.

В моделях используются следующие переменные состояния, характеризующие содержание ^{137}Cs в компонентах экосистемы: P – содержание ^{137}Cs в наземной фитомассе (в данной версии использовался упрощенный вариант описания динамики ^{137}Cs в растительном покрове, это позволило снизить время прохождения задач); S_{ao} – суммарное содержание ^{137}Cs в лесной подстилке; $X_{(i)}$ – подвижная компонента ^{137}Cs в нижележащей толще почвы; $Y_{(i)}$ – неподвижная компонента ^{137}Cs , где $i = 1, \dots, n$ – номер сантиметрового слоя почвы. Также в качестве

переменной состояния введен фиктивный компонент – распределительный пул R , отражающий перераспределение ^{137}Cs в почве корневой системой растений и гифами грибов. Принято, что сумма потоков, поступающих в пул, равна сумме потоков, выходящих из него, поэтому он всегда пустой. Под неподвижной формой содержания ^{137}Cs подразумевалась такая форма, когда мигрант закреплен в корневых системах растений и в почвенно-поглощающем комплексе в результате корневого поглощения, адсорбции, ионного обмена и осаждения в составе органических и органоминеральных комплексов или илестых частиц, задержанных почвой. Все остальное считалось подвижной формой.

Аналитически модель описывается следующей системой дифференциальных уравнений:

$$\begin{aligned} dP/dt &= fap + fsp - fps - dp, \\ dS_{ao}/dt &= fas + fps - f_1 - ds, \\ dX_i/dt &= f_i - f_{i+1} - d1_i - xy_i + g_i + rx_i - xr_i, \\ dY_i/dt &= xy_i - d2_i - g_i + df_{i-1} - df_i, \\ dR/dt &= \sum_{i=1}^n xr_i - \sum_{i=1}^n rx_i - dr. \end{aligned}$$

Численные значения параметров уравнений модели определялись в основном с помощью модели методом последовательных приближений (итераций). Для калибровки моделей использовались

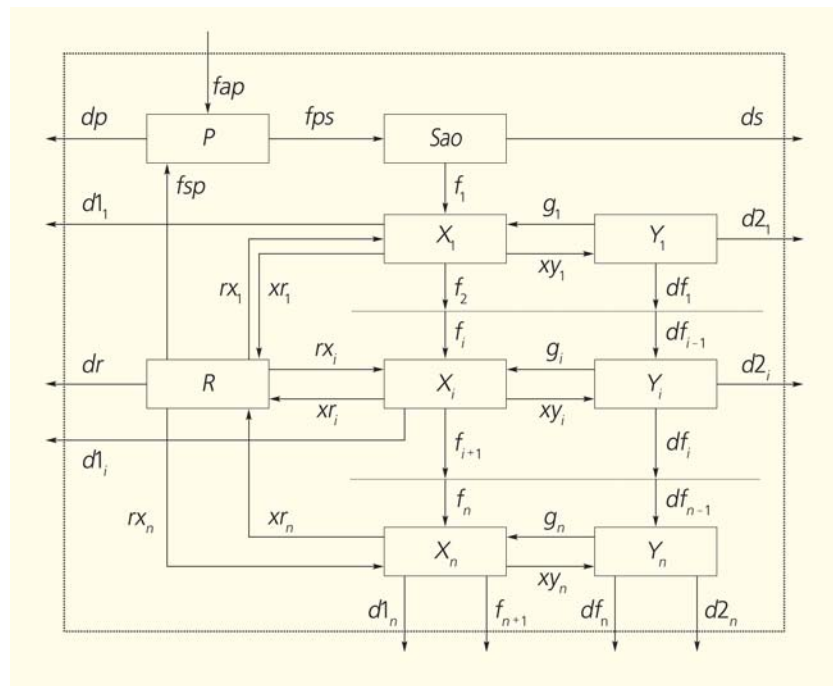


Рис.1. Потоковая диаграмма модели вертикальной миграции ^{137}Cs в почве. Пояснения в тексте.

лись данные по распределению ^{137}Cs в почвах 30-километровой зоны аварии Чернобыльской АЭС в 1986–1991 гг. Для проверки модели были использованы данные с тех же участков, полученные по несколько иной методике отбора в 1992 г.

Модели позволили дать прогноз динамики вертикального распределения ^{137}Cs в почве (рис.2) и провести ряд экспериментов по изучению его поведения. Например, была получена количественная оценка влияния лесной подстилки на интенсивность миграции ^{137}Cs по профилю почвы. Если

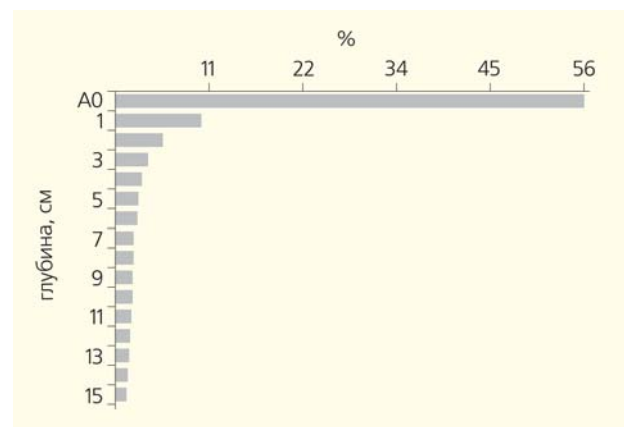


Рис.2. Прогноз вертикального распределения ^{137}Cs (процент от суммарного загрязнения рассматриваемого профиля) в почве гидроморфного ландшафта через 10 лет после выпадений.

вынос радионуклида за пределы рассматриваемой 15-сантиметровой толщи автоморфных лесных почв с подстилкой, по расчетам с помощью модели, составил за 10 лет 0% от первоначальной плотности загрязнения, а за 20 лет – 0.17%, то при удалении подстилки эти показатели составили уже 0.01% и 1.48% соответственно. Также было количественно подтверждено, что на интенсивность миграции радиоцезия в почве в огромной степени влияет ее гидроморфность. Модель показала, что характер вертикального распределения радиоцезия в гидроморфных почвах кардинально отличается от такового в автоморфных. Вынос ^{137}Cs за пределы рассматриваемой 15-сантиметровой толщи гидроморфных лесных почв с нарушенной подстилкой составил за 10 лет 0.75%, за 20 лет – 31.5%.

Данный алгоритм после необходимых модификаций впоследствии успешно применялся при построении моделей вертикальной миграции радиоцезия в пойменных почвах Тульской обл. [3] и почвах территорий, загрязненных при аварии на АЭС «Фукусима» в Японии [4]. Также с использованием этого алгоритма была разработана модель расчета ослабления дозовой нагрузки на наземные организмы при заглоблении со временем радионуклидов в почву [5].

Загрязнение леса: модель EcoRad

Теперь перейдем к группе более сложных моделей. Еще одной важной проблемой, возникшей в связи с чернобыльской аварией, было радиоактивное загрязнение растительного покрова, в первую очередь тех его компонентов, которые имели хозяйственное значение или потреблялись дикими животными. Особенно сильно пострадали леса. До сих пор специалисты отмечают, что модели поведения радионуклидов в лесных экосистемах особенно сложны из-за комплексного характера происходящих в них процессов [6, 7]. Поэтому следующим шагом в наших исследованиях была попытка интерпретировать механизмы перераспределения радионуклида внутри древесных растений в течение года на основе данных по сезонной (внутригодовой) динамике содержания радиоцезия в компонентах древостоя и потоков данного радионуклида между ними. Также ставилась задача уточнить параметры многолетней динамики радиоцезия в лесных биогеоценозах в нестационарном и квазиравновесном состояниях (когда абсолютное суммарное содержание радиоцезия в компонентах меняется только в результате радиоактивного распада). В первую очередь нужно было определить величину потоков радионуклида между почвой и растительностью, в том числе в условиях варьирования

Ecorad_D

Московский Государственный Университет им. М.В. Ломоносова
Факультет Почвоведения
Кафедра радиоэкологии и экотоксикологии

Модель сезонной (внутригодовой) динамики содержания Cs-137 в почве и древостое экосистемы снытевой дубравы
(демонстрационная версия)

Автор: Мамихин Сергей Витальевич E-mail: svmamikhin@mail.ru

Описание модели

Выбор сценария радиационного инцидента

Рассчитать вертикальное распределение в почве

На какое количество лет рассчитать динамику Cs-137 ? →

На счет

Выход

(установите мышью курсор в белом квадрате, введите число, не превышающее 50, и нажмите кнопку "На счет")

Рис.3. Стартовая страница интерфейса программы модели EcoRad.

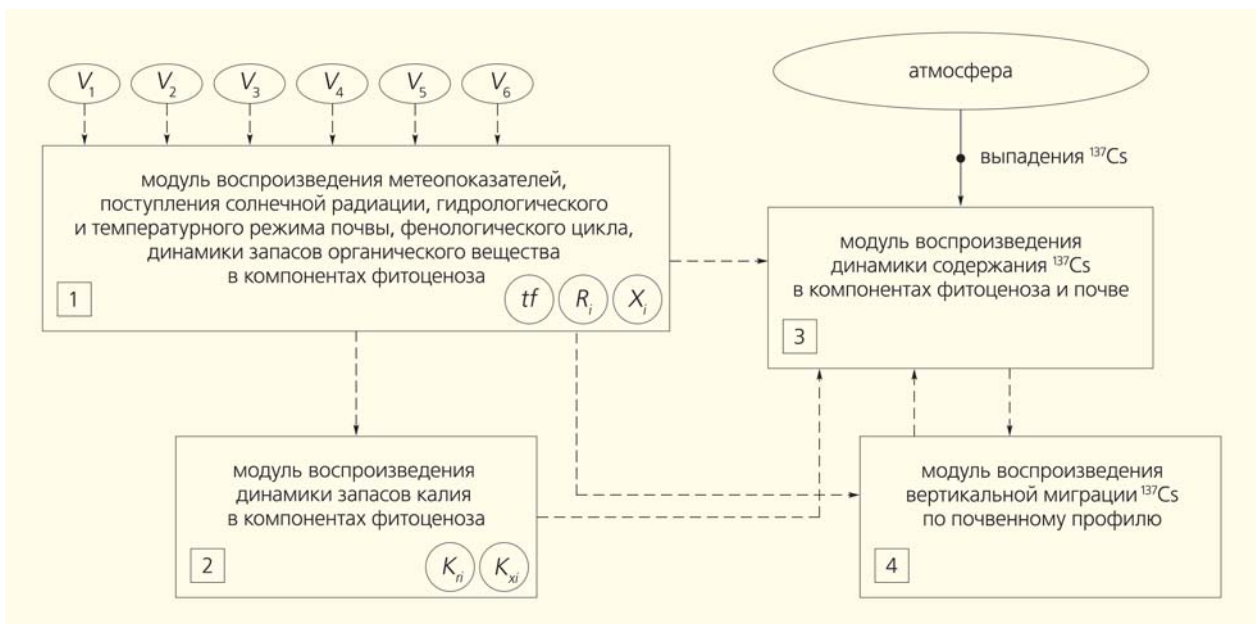


Рис.4. Структура модели EcoRad (V_1, \dots, V_6 — входные переменные, tf — фенологическое время, R_i и X_i — запас органического вещества в корнях и компонентах надземной части древостоя, K_{ji} и K_{xi} — запас калия в них, 1–4 — блоки модели).

от года к году метеорологических показателей, а впоследствии и глобального изменения климата.

Для проведения численных экспериментов по изучению поведения ^{137}Cs (а позднее и ^{90}Sr) в лесной экосистеме и получения информации о параметрах его круговорота была разработана и реализована имитационная модель EcoRad (рис.3). Для этого мы адаптировали уже имевшуюся модель почасовой динамики органического вещества экосистемы широколиственного леса [8]. Модель состояла из семи блоков, воспроизводящих метеорологические условия, поступление солнечной радиации, гидрологический и температурный режим почвы, динамику запасов углерода в компонентах древесного и травянистого ярусов и в почве. Структура модели EcoRad представлена на рис.4.

Был организован расчет и передача в радиоэкологический модуль необходимых для его работы данных по запасам углерода, интенсивности опада и дыхания, по скорости прохождения фенологического цикла. Модуль мы разработали на базе созданных ранее моделей многолетней динамики (с шагом в один год) радиоцезия [8] путем пересмотра алгоритма и введения в него новых правил перераспределения и дополнительного потока f_{y2sw} (вымывание радиоцезия из листьев). В частности, в данной версии полагается, что из почвы радиоцезий поступает в компоненты не напрямую, а через распределительный пул (рис.5). В модуле воспроизводится с шагом в одни сутки динамика содержания радиоцезия в компонентах древостоя и поч-

ве. Работа с моделью показала достаточность такого шага для целей исследования на данном этапе.

Алгоритм построения радиоэкологического модуля, отражающий основные составные меха-

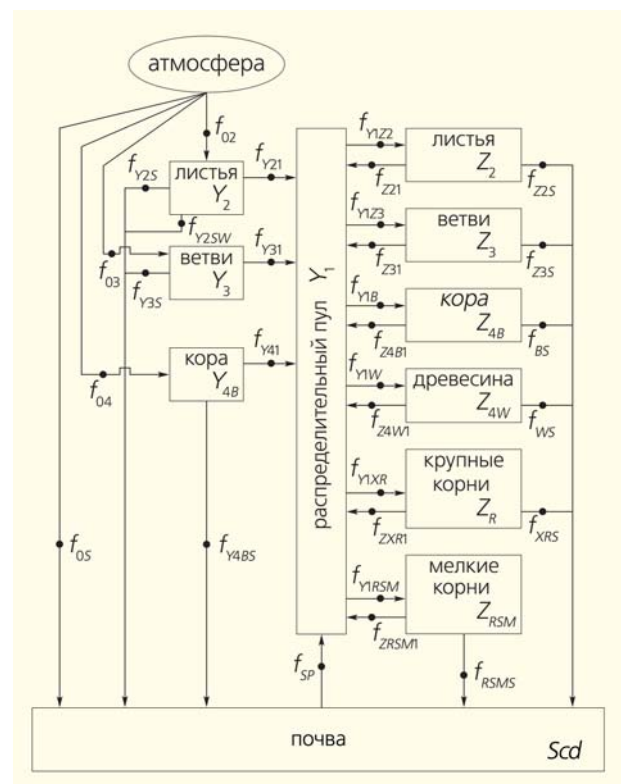


Рис.5. Модуль воспроизведения динамики радиоцезия.

Таблица

Распределение ^{137}Cs между надземными компонентами древостоя, %

Компонент	Ок-Ридж* [11]	Модель (30 лет)
Листья	2.7	3.3
Ветви	22.6	29.7
Ствол	74.7	67

* Данные Ок-Риджской национальной лаборатории (США)

низмы поведения радиоцезия в лесной экосистеме, характеризуется следующими условиями.

1. Предполагается, что поведение ^{137}Cs в растениях подчиняется тем же закономерностям, что и поведение калия.

2. Динамика радиоцезия в растительности рассматривается в связи с динамикой фитомассы.

3. Содержание ^{137}Cs в растительности подразделяется на наружное и внутреннее. Динамика каждой из этих частей рассматривается отдельно. Критерием разделения служит путь попадания радионуклида в структурную часть растения: внутреннее загрязнение возникает в результате поступления из почвы или из других частей растения, наружное — из-за прямого попадания на поверхность надземной части.

4. Ведущим фактором, определяющим характер поведения радионуклида в системе «почва — растительный покров», считается увлажненность экотопа.

5. Радиоцезий в силу своей подвижности постоянно перемещается по растению в соответствии с потребностями в калии тех или иных тканей, слагающих компоненты растения.

Функции и параметры были определены с помощью самой модели с использованием метода итераций на основе данных по многолетней динамике содержания радиоцезия в компонентах лесных экосистем с различной степенью увлажнения [9, 10].

Проверка работы модели проводилась по данным о распределении по компонентам древостоя глобального ^{137}Cs [11] (табл.).

Уточнение априорных предположений о формальном механизме поведения радиоцезия в двух основных подсистемах лесной экосистемы — почве и древесной растительности — и количественное определение роли их компонентов в круговороте этого радионуклида проводились в ходе численных экспериментов с моделью. Делалось это путем модификации алгоритма до достижения адекватности результатов расчетов с данными по многолетней динамике содержания радиоцезия в компонентах лесной экосистемы элювиального ландшафта, полученными в результате исследования чернобыльских выпадений, с учетом экспериментальных данных по внесению радиоцезия в растения.

На рис.6 представлено воспроизведение моделью динамики содержания ^{137}Cs в компонентах древостоя в экосистеме приводораздельной дубравы (элювиальный ландшафт) в течение первых 10 лет после выпадений, аналогичных чернобыльским. В более крупном масштабе отражена ситуа-

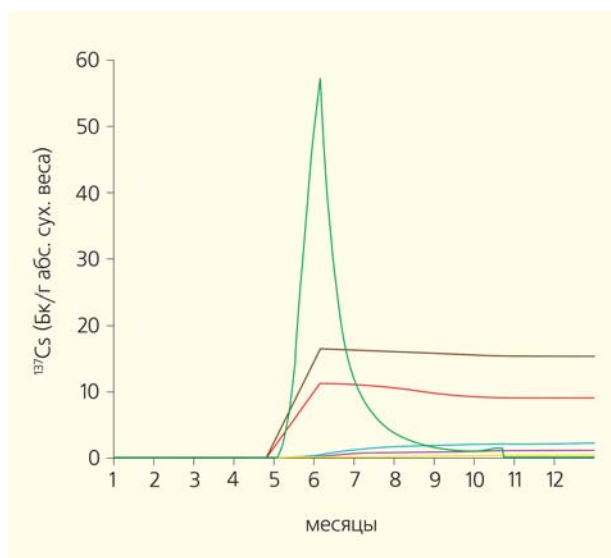
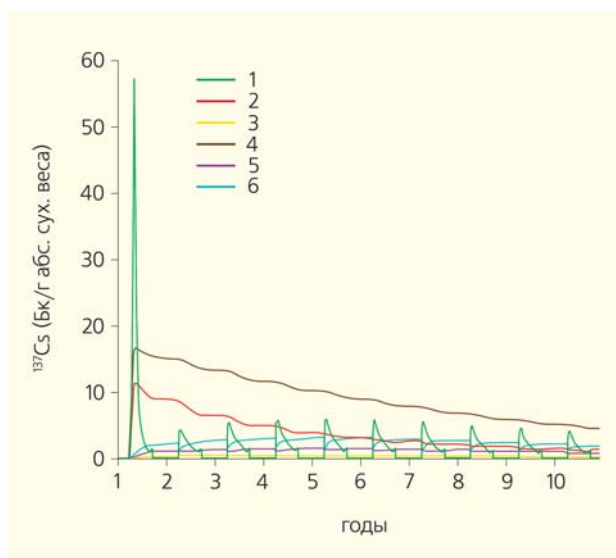


Рис.6. Воспроизведение моделью посуточной динамики удельной активности компонентов древостоя в приводораздельной дубраве (элювиальный ландшафт) в течение 10 лет после выпадений, аналогичных чернобыльским (слева), и в год, когда произошли выпадения. Условные обозначения: 1 — листья; 2 — ветви; 3 — древесина; 4 — кора; 5 — корни крупные; 6 — корни мелкие.

ция в первый год, наиболее интересный в плане перераспределения радиоцезия.

Построение и программная реализация модели EcoRad позволили провести ряд численных экспериментов, в том числе разработать прогноз развития ситуации на 20 лет при повторении аналогичного выпадения условно через 10 лет (например, в результате разгерметизации саркофага). Позднее алгоритм был модифицирован и успешно использован для воспроизведения динамики ^{90}Sr [12].

Разные виды и уровни радиозокологических моделей

Представленные выше модели относятся к точечным, т.е. воспроизводят процессы, происходящие на единице площади. При необходимости они могут быть интегрированы в так называемые пространственно распределенные модели, в том числе крупномасштабные модели региональных и глобальных природно-территориальных комплексов. Можно даже выделить отдельное направление в радиозокологии, которое посвящено исследованиям миграции радионуклидов в ландшафтах с помощью моделей, построенных с применением ГИС-технологий, а именно разработку разномасштабных моделей, в которых учитывается как вертикальное, так и горизонтальное перемещение радиоактивных веществ. Например, одна из наиболее ранних моделей — SUTRA — воспроизводила водный перенос ^{137}Cs на ограниченном элементе рельефа — склоне холма — и позволяла оценить влияние на этот процесс геогеологических факторов, в основном гидрологических свойств почвы [13]. С использованием этого подхода мы разработали модель миграции радионуклидов в некотором объеме почвы, в том числе и на склоновых элементах ландшафта [14].

Следует отметить активное международное сотрудничество в области радиозокологического имитационного моделирования. Так, в течение ряда лет Международное агентство по атомной

энергии инициировало научно-исследовательские программы по радиозокологическому математическому моделированию, в рамках которых проводилось изучение миграции и аккумуляции радионуклидов в лесных экосистемах (рис.7). Например, с 1996 по 2001 г. реализовывалась программа «Биосфера: моделирование и оценка» (BIOMASS: Biosphere Modelling and Assessment). Объектом моделирования стало поведение ^{137}Cs в экосистеме соснового леса, подвергшейся радиоактивному загрязнению в результате чернобыльской аварии. По результатам программы BIOMASS были приняты попытки анализа и обобщения подходов различных коллективов с целью дальнейшей выработки единого алгоритма построения подобных моделей [15], а также сформулирован целый ряд критических замечаний по поводу ранее использовавшихся подходов к расчету загрязнения растительного покрова, например с помощью коэффициентов перехода. Были также разработаны ре-



Рис.7. Окрестности Чернобыльской АЭС.

Фото предоставлено автором

комендации по дальнейшей работе в данной области с учетом опыта программы.

Более предметно о математическом моделировании в черномыльских исследованиях можно прочесть в обзорной статье, вышедшей несколько лет назад в журнале «Радиационная биология. Радиоэкология» [16]. Сейчас опыт применения имитационного моделирования при проведении черномыльских исследований используется для прогнозирования последствий аварии на АЭС «Фукусима» [17].

Помимо прогнозирования, модели могут использоваться и для реконструкции различных радиоэкологических ситуаций. В свое время для этой цели мы предложили модель погодичной динамики ^{90}Sr в компонентах лесной экосистемы после кыштымской аварии 1957 г. [18]. На рис.8 представлена реконструкция ситуации за последующие 50 лет.

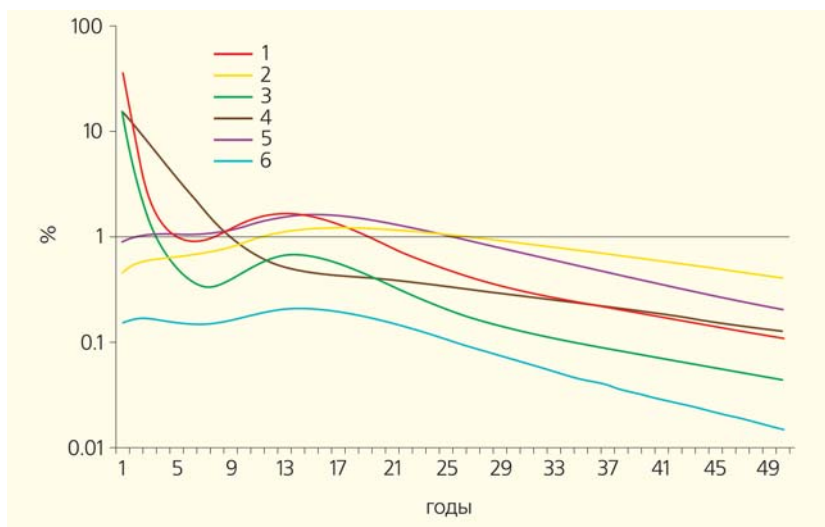


Рис.8. Прогноз динамики вклада основных компонентов древостоя в общее загрязнение ^{90}Sr экосистемы соснового леса в ситуации однократного выпадения (в процентах от общей суммы загрязнения). Условные обозначения: 1 — ветви; 2 — древесина; 3 — хвоя; 4 — кора; 5 — корни крупные; 6 — корни мелкие.

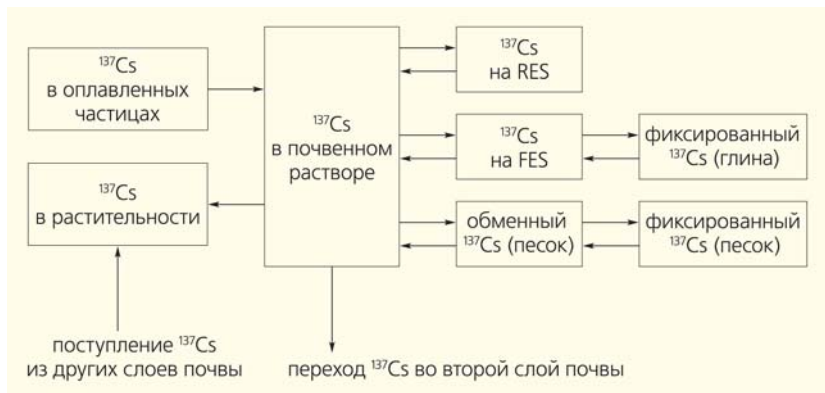


Рис.9. Концептуальная модель поведения ^{137}Cs в почве.

Отметим, что радиоэкологические модели бывают разных уровней. Кроме экосистемного, в них могут отображаться процессы популяционного или даже организменного уровня, как, например, во второй группе моделей из рассмотренных выше, где воспроизводится поведение ^{137}Cs и ^{90}Sr в структурных частях дерева.

В качестве дополнительного примера приведем краткое описание комплекса моделей С.И.Спиридонова и М.К.Мукушевой [19], отображающих поведение ^{137}Cs и ^{90}Sr в системах типа «растительность — почва» Семипалатинского испытательного полигона (Казахстан) и в организмах обитающих там сельскохозяйственных животных.

Отличительной чертой алгоритма почвенно-растительной модели (рис.9) стало разделение почвы по механическому составу и рассмотрение динамики радионуклидов отдельно в глине и песке. Предполагаются неселективная (regular exchange sites, RES) и селективная (frayed edge sites, FES) сорбция этого радионуклида на глинистых минералах. Рассматриваются слои почвы по 5 см толщиной. Данные, полученные с помощью почвенно-растительной субмодели, используются далее в субмоделях поведения радионуклидов в организме двух основных видов сельскохозяйственных животных данного региона — лошадей и овец (рис.10). Здесь есть некоторые интересные, на наш взгляд, особенности алгоритма. Например, учитывается, что радионуклиды могут поступать в желудочно-кишечный тракт животных не только с кормом, но и с почвенными частицами, захватываемыми при выпасе. Также принято, что интенсивность потребления растительности меняется в зависимости от времени года.

Представленные модели позволяют прогнозировать загрязнение мяса и молока. Эта информация впоследствии используется при расчете дозовых нагрузок на население региона, потребляющее загрязненные радионуклидами продукты питания.

Следует заметить, что в последнее время господствовавший в радиоэкологии антропоцентрический подход уступает свои позиции эоцентрическому, при котором не менее важной становится оценка дозовой нагрузки на флору и фауну загрязненных территорий. Такие расчеты проводятся как с использованием программных модулей миграционных моделей, так и с помощью автономных программных пакетов. На рис.11 приведены результаты расчетов дозовой нагрузки на отдельных представителей биоты [20].

Как показал опыт использования метода математического моделирования в радиоэкологических исследованиях, его применение позволяет успешно прогнозировать или реконструировать развитие ситуации в случае радиационных инцидентов. Проведение численных экспериментов на моделях дает возможность оценить развитие многих потенциально опасных ситуаций, связанных с выбросом радиоактивных веществ в окружающую среду. В ходе таких расчетов можно, например, выявить биогеохимические барьеры, на которых накапливаются радионуклиды, и количественно оценить их роль в этих процессах. Еще одна важная задача, которая решается с использованием этого метода, — расчет дозовых полей, что необходимо для оценки возможной дозовой нагрузки на биоту и человека. Наличие адекватных моделей позволяет существенно оптимизировать проведение научных полевых работ в зонах радиоактивного загрязнения, сократить время пребывания исследователей на загрязненных территориях и снизить дозовую нагрузку на научный персонал.

Вместе с тем в радиоэкологическом моделировании существует ряд проблем, которые в той или иной степени снижают его эффективность. В первую очередь — это недостаток исходной информации. Например, отмечается, что для большинства животных (особенно для диких) радиобиологическая информация недостаточна или полностью от-

сутствует. Систематически изучены всего несколько лабораторных видов: мышь, крыса, кролик, собака, морская свинка и обезьяна. В результате при моделировании информацию приходится переносить на похожие виды животных.

Еще одна проблема — упрощение. Так, при расчете дозовых нагрузок на организмы оценки мощности дозы, как правило, проводятся, исходя из предположения о том, что радионуклиды равномерно распределены по всему организму (для инкорпорированных излучателей). При оценках внешнего облучения организмов распределение радионуклидов в окружающей среде также предполагается равномерным. Несмотря на то что организмы имеют самую разнообразную форму,

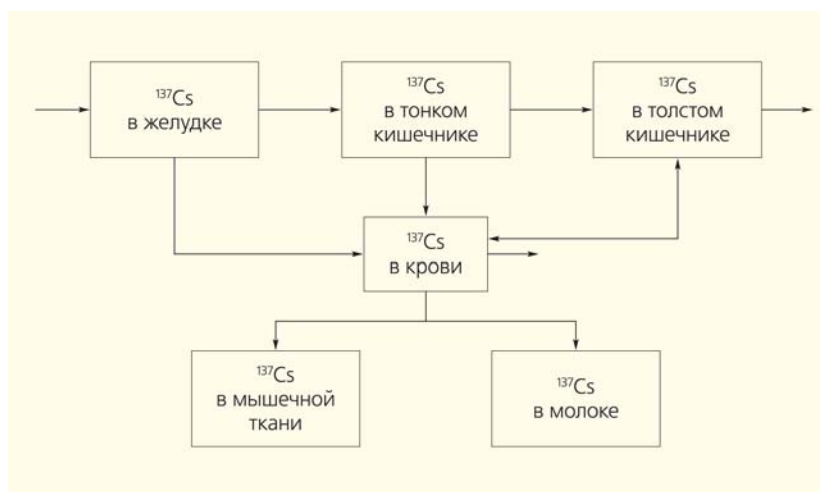


Рис.10. Концептуальная модель поведения ^{137}Cs в организме лошадей.

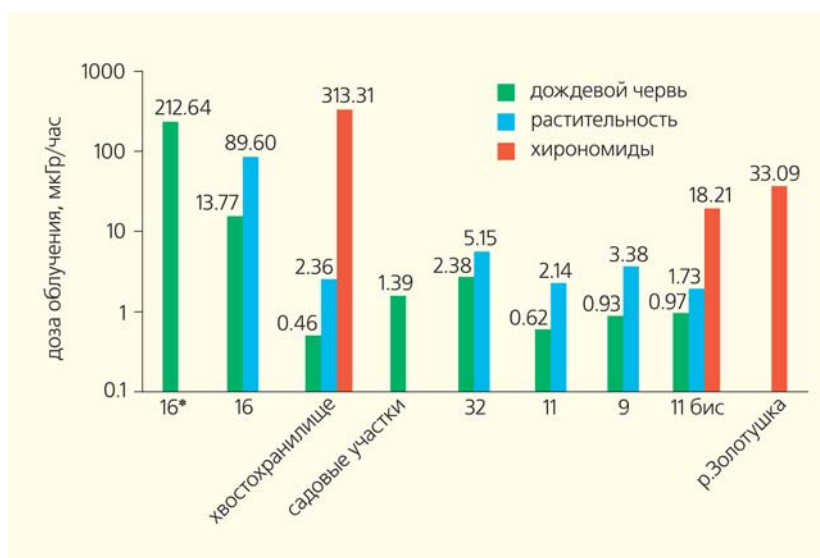


Рис.11. Расчет дозовой нагрузки на биоту на различных экспериментальных участках в районе уранодобывающего предприятия [20].

при расчетах дозовых нагрузок используются упрощенные дозиметрические модели, в которых организм отображается цилиндром, сферой или эллипсоидом [21]. Иногда используется косвенная информация. При рассмотрении поведения радионуклидов в организмах могут использоваться представления о механизме поведения их химических аналогов. Например, для радиоцезия — это калий, а для радиостронция — кальций.

* * *

Завершая наш обзор, можно констатировать, что имитационное моделирование в радиоэкологии — удобный и эффективный инструмент исследования поведения радиоактивных веществ в окружающей среде. Заменяя реальный объект на его виртуальную копию, мы снижаем риск как для самого объекта моделирования, так и для исследователей-радиоэкологов, вынужденных работать в ис-

ключительно вредных для человека условиях радиоактивного загрязнения. Проводя численные эксперименты на моделях по имитации разнообразных радиологических ситуаций, мы получаем возможность прогнозирования поведения радионуклидов, их переноса между компонентами экосистем, накопления на биогеохимических барьерах и формирования дозовых нагрузок на биоту и человека.

Поскольку в одной статье трудно описать все разнообразие радиоэкологических имитационных моделей, мы приводим здесь ссылки на некоторые обзорные статьи [6, 7, 16]. Дополнительную информацию можно получить также при посещении информационного ресурса EcoRadMod*, посвященного различным разделам радиоэкологии, в том числе и математическому моделированию. ■

* <http://soil.msu.ru/kafedry/kaf-radioecologia/ecoradmod>

Литература / References

1. Федоров В.Д., Гильманов Т.Г. Экология. М., 1980. [Fedorov V.D., Gilmanov T.G. Ecology. Moscow, 1980. (In Russ.)]
2. Олсон Дж.С. Моделирование процессов передвижения радиоизотопов в экологических системах с помощью аналоговых вычислительных машин. Вопросы радиоэкологии. М., 1968; 303–315. [Olson J.S. Modeling of the processes of the movement of radioisotopes in ecological systems using analogue computers. Radioecology Issues. Moscow, 1968; 303–315. (In Russ.)]
3. Мамихин С.В., Голосов В.Н., Парамонова Т.А. и др. Вертикальное распределение ¹³⁷Cs в аллювиальных почвах поймы р.Локна (Тульская область) в отдаленный период после аварии на ЧАЭС и его моделирование. Почвоведение. 2016; 12: 1521–1533. [Mamikhin S.V., Golosov V.N., Paramonova T.A. et al. Vertical distribution of ¹³⁷Cs in alluvial soils of the Lokna River floodplain (Tula oblast) long after the Chernobyl accident and its simulation. Eurasian Soil Science. 2016; 49(12): 1432–1442.]
4. Мамихин С.В., Липатов Д.Н., Манахов Д.В. и др. Адапционные возможности алгоритма моделирования вертикальной миграции радионуклидов в почвах VERT_MIG. Вестник Московского университета. Серия Почвоведение. 2018; 1: 16–22. [Mamikhin S.V., Lipatov D.N., Manahov D.V. et al. The adaptive capability of the algorithm to simulate the vertical migration of radionuclides in soils VERT_MIG. Moscow University Soil Science Bulletin. 2018; 1: 16–22. (In Russ.)]
5. Мамихин С.В., Манахов Д.В., Бадави В.М. Расчетные методы радиологической оценки воздействия химических веществ, применяемых в хозяйственной деятельности. Проблемы радиоэкологии и пограничных дисциплин. Ред. В.И.Мигунов, А.В.Трапезников. Екатеринбург, 2010; 13: 18–32. [Mamikhin S.V., Manahov D.V., Badavi V.M. Calculation methods for radiological assessment of the effects of chemicals used in business. Problems of Radioecology and Related Disciplines. V.I.Migunov, A.V.Trapeznikov (eds). Ekaterinburg, 2010; 13: 18–32. (In Russ.)]
6. Переволоцкий А.Н., Гончаров Е.А., Переволоцкая Т.В. К вопросу о моделировании распределения радионуклидов в лесных биогеоценозах. Радиационная биология. Радиоэкология. 2016; 56(6): 655–663. DOI:10.7868/S0869803116060102. [Perevolotsky A.N., Goncharov E.A., Perevolotskaya T.V. Revisiting the modelling of radionuclide distribution in forest ecosystems. Radiation Biology. Radioecology. 2016; 56(6): 655–663. (In Russ.)]
7. Diener A., Hartmann P., Urso L. et al. Approaches to modelling radioactive contaminations in forests: Overview and guidance. Journal of Environmental Radioactivity. 2017; 178–179: 203–211. DOI:10.1016/j.jenvrad.2017.09.003.
8. Мамихин С.В. Динамика углерода органического вещества и радионуклидов в наземных экосистемах (имитационное моделирование и применение информационных технологий). М., 2003. [Mamikhin S.V. The Dynamics of Carbon of Organic Matter and Radionuclides in Terrestrial Ecosystems (Simulation Modeling and Application of Information Technologies). Moscow, 2003. (In Russ.)]
9. Мамихин С.В., Тихомиров Ф.А., Щеглов А.И. Динамика содержания ¹³⁷Cs в лесных биогеоценозах, подвергшихся радиоактивному загрязнению в результате аварии на Чернобыльской АЭС. Экология. 1994; 2: 43–49. [Mamikhin S.V., Tikhomirov F.A., Scheglov A.I. Dynamics of ¹³⁷Cs content in forest biogeocenoses subjected to radioactive contamination as a result of the Chernobyl accident. Russian Journal of Ecology. 1994; 25(2): 106–110. (In Russ.)]
10. Mamikhin S.V., Tikhomirov F.A., Shcheglov A.I. Dynamics of ¹³⁷Cs in the forests of the 30-km zone around the Chernobyl nuclear power plant. The Science of the Total Environment. 1997; 193: 169–177.

11. Voris P. van, Cowan C.E., Cataldo D.A. et al. Chernobyl case study: modeling the dynamics of long term cycling and storage of ^{137}Cs in forested ecosystems. Transfer of Radionuclides in Natural and Semi Natural Environments. G.Desmet, P.Nassimbeni, M.Belli (eds). Barking, 1990; 61–73.
12. Мамихин С.В., Манахов Д.В. Имитационная модель посуточной динамики ^{90}Sr в подсистеме «почва–древостой» лиственного леса. Вестник Московского университета. Серия Почвоведение. 2016; 2: 33–39. [Mamikhin S.V., Manakhov D.V. Simulation model of ^{90}Sr daily dynamics in the system soil – wood stand of deciduous forest. Moscow University Soil Science Bulletin. 2016; 2: 33–39. (In Russ.)]
13. Sundblud B., Mathiasson L. The turnover of ^{137}Cs within a forest ecosystem described by a compartment modelling approach GIDEA study site, Sweden. The Science of the Total Environment. 1994; 157: 139–146.
14. Мамихин С.В., Бадави В.М. Имитационная модель трехмерной миграции ^{137}Cs в почвах. Вестник Московского университета. Серия Почвоведение. 2011; 4: 32–36. [Mamikhin S.V., Badawy W.M. Imitative model ^{137}Cs three-dimensional migration in soils. Moscow University Soil Science Bulletin. 2011; 4: 32–36. (In Russ.)]
15. Shaw G., Venter A., Avila R. et al. Radionuclide migration in forest ecosystems – results of a model validation study. Journal of Environmental Radioactivity. 2005; 84: 285–296. DOI:10.1016/j.jenvrad.2003.09.006.
16. Мамихин С.В. Имитационное моделирование поведения радионуклидов в наземных экосистемах в исследованиях экологических последствий аварии на Чернобыльской АЭС. Радиационная биология. Радиоэкология. 2016; 56(3): 313–321. [Mamikhin S.V. Simulation of radionuclide behaviour in terrestrial ecosystems in studies of ecological consequences of accident at Chernobyl NPP. Radiation Biology. Radioecology. 2016; 56(3): 313–321. (In Russ.)]
17. Calmon P., Gonze M.-A., Mourlon Ch. Modeling the early-phase redistribution of radiocesium fallouts in an evergreen coniferous forest after Chernobyl and Fukushima accidents. Science of the Total Environment. 2015; 529: 30–39. DOI:10.1016/j.scitotenv.2015.04.084.
18. Мамихин С.В., Никулина М.В. Имитационная модель поведения ^{90}Sr в почве и древесном ярусе соснового леса. Радиационная биология. Радиоэкология. 2005; 45(4): 218–226. [Mamikhin S.V., Nikulina M.V. Imitation model of ^{90}Sr behaviour in the soil and stand of pine forest. Radiation Biology. Radioecology. 2005; 45(4): 218–226. (In Russ.)]
19. Спиридонов С.И., Мукушева М.К. Семипалатинский испытательный полигон: радиоэкологические модели и риски. Алматы, 2010. [Spiridonov S.I., Mukusheva M.K. Semipalatinsk test site: radioecological models and risks. Almaty, 2010. (In Russ.)]
20. Карпенко Е.И., Спиридонов С.И. Расчет дозовых нагрузок на биоту в районе расположения уранодобывающего предприятия на основе комплекса дозиметрических моделей. Вестник Российской академии естественных наук. 2012; 4: 52–59. [Karpenko E.I., Spiridonov S.I. The calculation of dose rates to biota in the vicinity of the uranium-mining factory based on a system of dosimetric models. Bulletin of the Russian Academy of Natural Sciences. 2012; 4: 52–59. (In Russ.)]
21. Крышев И.И., Сазыкина Т.Г. Радиационная безопасность окружающей среды: Обзор. Радиация и риск (Бюллетень национального радиационно-эпидемиологического регистра). 2018; 27(3): 113–131. [Kryshch I.I., Sazykina T.G. Radiation protection of the natural environment. Review. Radiation and Risk. Bulletin of the National Radiation and Epidemiological Registry. 2018; 27(3): 113–131. (In Russ.)]

Simulation Modeling in Radioecology

S.V.Mamikhin¹, D.N.Lipatov¹, D.V.Manakhov¹, T.A.Paramonova¹, V.V.Stolbova¹

¹Lomonosov Moscow State University (Moscow, Russia)

The article introduces the readers to the basics of simulation modeling in radioecology. Several examples of simulation radioecological models of different levels are presented; these models illustrate the possibilities of the method. They allow investigation the processes of radionuclide behavior in ecosystems, prediction the development of radioecological situation under different scenarios of deposition, to reconstruction radioecological processes which were not sufficiently studied during the radiation accidents of the past, and calculation the dynamics of the radiation dose rates to ecosystem components and humans. Some issues of simulation modeling application in radioecology are discussed.

Keywords: simulation modeling, radioactive contamination, ecosystem, radionuclides.