

ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

УДК 574:631.438.2

АДАПТАЦИОННЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ АЛГОРИТМА МОДЕЛИРОВАНИЯ ВЕРТИКАЛЬНОЙ МИГРАЦИИ РАДИОНУКЛИДОВ В ПОЧВАХ VERT_MIG

С.В. Мамихин, Д.Н. Липатов, Д.В. Манахов, Т.А. Парамонова,
В.В. Столбова, А.И. Щеглов

Рассмотрены возможности использования алгоритма VERT_MIG в имитационных моделях вертикальной миграции радионуклидов в почве. Алгоритм успешно применялся при построении моделей миграции ^{137}Cs и ^{90}Sr при радиоактивном загрязнении различных почв в результате аварий на Чернобыльской АЭС и АЭС Фукусима-1. Представлены результаты моделирования. Обсуждаются перспективы дальнейшего использования данного алгоритма и некоторые аспекты применения имитационного моделирования в этой области.

Ключевые слова: радионуклиды, почвы, миграция, имитационное моделирование, алгоритм

Введение

Исследования поведения ^{137}Cs в системах *почва—растение*, которые проводятся нами в течение целого ряда лет, позволили получить достаточный объем информации для построения имитационных моделей, включая модели вертикальной миграции ^{137}Cs в почвах, основанные на алгоритме VERT_MIG.

Моделированию поведения радионуклидов в почве и системах типа *почва—растение* давно уделяется пристальное внимание. Интерес к этой области радиоэкологических изысканий резко возрос после аварии на Чернобыльской АЭС. С накоплением исходного материала и уточнением целей и задач исследований модели претерпевали своеобразную эволюцию. На первых порах для расчетов использовались самые простые модели, основанные на регрессионных зависимостях, полученных в предыдущие годы радиоэкологических исследований, и аналитические модели, реализованные на ЭВМ, подобные приведенным в [3, 6, 14, 21]. Наиболее распространенными были квазидиффузионные и конвективно-диффузионные миграционные модели.

По мере накопления в ходе полевых и лабораторных исследований необходимой информации алгоритмы моделей постепенно усложнялись. Появлялись модели, учитывающие различие физико-химических форм нахождения радионуклидов в почве и процессы их фиксации почвенным поглощающим комплексом [2, 4, 8, 9, 15, 16, 19, 23]. Они позволили дать с той или иной степенью достоверности прогноз интенсивности нисходящей миграции радионуклидов для основных типов почв,

представленных на территории зоны отчуждения и прилегающих территориях, и количественно подтвердить роль тех или иных почвенных горизонтов как биогеохимических барьеров на пути миграции радионуклидов. На основании некоторых моделей можно было прогнозировать динамику биологической доступности радионуклидов почвы [8, 9, 18, 23]. Это, в свою очередь, позволило использовать их в качестве подмоделей в моделях более высокого уровня, воспроизводящих поведение радионуклидов в системах *почва—растение*.

Математическое моделирование использовалось и для проведения численных экспериментов по ремедиации почв, подвергшихся радиоактивному загрязнению, например, для учета влияния химических реагентов на состав почвенного раствора [20] или для прогнозирования интенсивности вертикальной миграции радиоцезия после удаления почвенной подстилки [7]. Были построены модели, отображающие поведение радионуклидов в отдельных фазах почвы, например, в почвенном растворе [22].

Можно выделить отдельное направление исследования миграции радионуклидов в почвах, которое по сути смыкается с моделями, построенными с применением ГИС-технологий, а именно разработку разномасштабных моделей пространственного перераспределения радионуклидов, в которых учитывается не только вертикальное, но и горизонтальное их перемещение [10, 25]. Так, модель SUTRA представляла собой попытку воспроизвести водный перенос ^{137}Cs на ограниченном элементе рельефа — склоне холма и оценить влияние на этот процесс геогеологических факторов, в основном гидрологических свойств почвы [25].

Первая имитационная модель, построенная на алгоритме VERT_MIG, появилась еще в 1987 г. при подготовке прогнозов и рекомендаций для правительственной комиссии, работавшей в 30-километровой зоне аварии Чернобыльской АЭС. В процессе своего развития, параллельно с накоплением необходимой исходной информации, модели претерпевали определенные изменения: усложнялись, меняли виды своей реализации, использовались для воспроизведения, изучения и прогнозирования различных ситуаций, связанных с радиоактивным загрязнением почвенно-растительного покрова.

Алгоритм достаточно подробно рассматривался ранее [7, 23], поэтому ограничимся здесь очень кратким его описанием. Подразумевается, что модели, построенные на базовом алгоритме, — точечные, размерность переменных состояния — кБк/м^2 .

Модели представляют собой системы конечно-разностных уравнений. В исходном варианте используются следующие переменные состояния, которые с шагом в одни сутки отражают динамику содержания ^{137}Cs в соответствующих компонентах: P — содержание ^{137}Cs в наземной фитомассе, $X(i)$ — мобильная компонента содержания ^{137}Cs в почве, $Y(i)$ — малоподвижная компонента ^{137}Cs , где $i = 1, \dots, n$ — номер слоя почвы.

Под малоподвижной компонентой подразумевается такая форма содержания ^{137}Cs , когда радионуклид закреплен в подземной фитомассе в результате поглощения корневыми системами, а также в почвенном поглощающем комплексе путем необменной сорбции глинистыми минералами и глинисто-гумусовыми комплексами, ионообменной сорбции гумусовыми веществами почвы, соосаждения в составе малорастворимых солей. Остальная часть запасов ^{137}Cs считается подвижной компонентой, в основном это водорастворимая и отчасти обменная формы соединений радионуклида. Также в качестве переменной состояния введен фиктивный компонент — распределительный пул R , с помощью которого отображается перераспределение ^{137}Cs в почве корневой системой растений, гифами грибов и в результате деятельности организмов почвенной микро- и мезофауны. При этом принято, что сумма потоков, поступающих в пул, равна сумме потоков, выходящих из него.

Функции переноса представляют собой уравнения той или иной степени сложности в зависимости от уровня знаний о закономерностях функционирования объекта моделирования. В первом приближении — это линейные функции. При рассмотрении различных ситуаций алгоритм модифицировался в соответствии со свойствами объекта моделирования и условиями его функционирования. Например, по-разному задавались краевые условия, при определении функций переноса вводились дополнительные вспомогательные переменные, отображающие воздействие различных факто-

ров влияния, менялась толщина рассматриваемых слоев, выделялся верхний слой переменной толщины и т.д. Со временем менялись способы реализации моделей, использовались различные диалекты алгоритмического языка Бэйсик и среды программирования. Выдача результатов моделирования организовывалась как в текстово-цифровом, так и в графическом виде.

Применение моделей, построенных на алгоритме VERT_MIG. Этот алгоритм с момента своего создания несколько раз использовался при построении математических моделей, предназначенных для решения различных радиоэкологических проблем. Рассмотрим некоторые из наиболее актуальных, на наш взгляд, ситуаций и применение моделей, основанных на данном алгоритме для решения связанных с этими ситуациями задач.

В результате Чернобыльской аварии 1986 г. были загрязнены почвы обширных территорий. Одной из наиболее острых проблем стала возможность проникновения радионуклидов в источники питьевой воды. Для решения этой проблемы в числе прочих задач требовалось дать оценку скорости вертикальной миграции радионуклидов по профилю почв с разным гидрологическим режимом.

Для изучения и прогнозирования поведения ^{137}Cs чернобыльского выброса в почвах лесных экосистем были разработаны две версии математической модели вертикальной миграции этого радионуклида в почвах контрастной степени гидроморфности: автоморфной дерново-подзолистой элювиального ландшафта (фитоценоз — дубрава с примесью сосны и березы) и гидроморфной торфянисто-глеевой подзолистой аккумулятивно-го ландшафта (фитоценоз — черноольшаник). Воспроизводилась ситуация мелкодисперсных радиоактивных выпадений. Было принято, что размер выпавших частиц составлял < 10 мкм. Рассматривались переменные, соответствующие следующим слоям почвы: в качестве верхнего слоя варьирующей толщины — лесная подстилка, а далее — 15 нижележащих сантиметровых слоев.

Отметим, что в данной реализации алгоритма при расчете функций переноса, входящих в систему уравнений, дополнительно используются вспомогательные переменные. Например, переход неподвижной компоненты в подвижное состояние в результате десорбции, ионного обмена и др. рассчитывается следующим образом: $g_i = a_6 \text{sig}(i) Y_i$, где sig — вспомогательная переменная, которая отражает сигмоидальный характер кривой зависимости емкости поглощения почвы в данном слое от глубины его залегания (i) и толщины гумусированного слоя почвы (hc), которая задана следующей формулой: $\text{sig}(i) = (i-1)^2 / (((0,5(hc-1) - 1)^2 - 1) + (i-1)^2)$.

Численные значения параметров определялись в основном с помощью модели методом итераций. Для калибровки модели использовались

данные по распределению ^{137}Cs в почвах 30-километровой зоны аварии Чернобыльской АЭС в 1986—1991 гг. [17]. Для проверки модели автоморфного ландшафта брали данные с тех же участков, полученные по несколько иной методике отбора в 1992 г. Модель реализована в среде структурного программирования Quick Basic 4.5.

Модель позволила дать требуемый прогноз динамики вертикального распределения ^{137}Cs в почве, выборочно оценить опасность его попадания в грунтовые воды и провести ряд экспериментов по изучению поведения радионуклида в почве, в частности, по влиянию на скорость его миграции таких факторов, как гидроморфность почв, наличие лесной подстилки, скорость ее разложения, толщина гумусированного горизонта (рис. 1). Было установлено, что вынос ^{137}Cs за пределы рассматриваемой 15-сантиметровой толщи автоморфных лесных почв с подстилкой по расчетам на модели составил за 10 лет 0% от первоначальной плотности загрязнения, за 20 лет — 0,17%, при удалении подстилки эти показатели составили 0,01 и 1,48% соответственно. Вынос за пределы рассматриваемой 15-сантиметровой толщи гидроморфных лесных почв с ненарушенной подстилкой составил за 10 лет 0,75, за 20 лет — 31,5%. Также была дана оценка участия в миграционном процессе корневых систем и гифов грибов.

Адаптированная версия данной разработки в настоящее время применяется в качестве субмо-

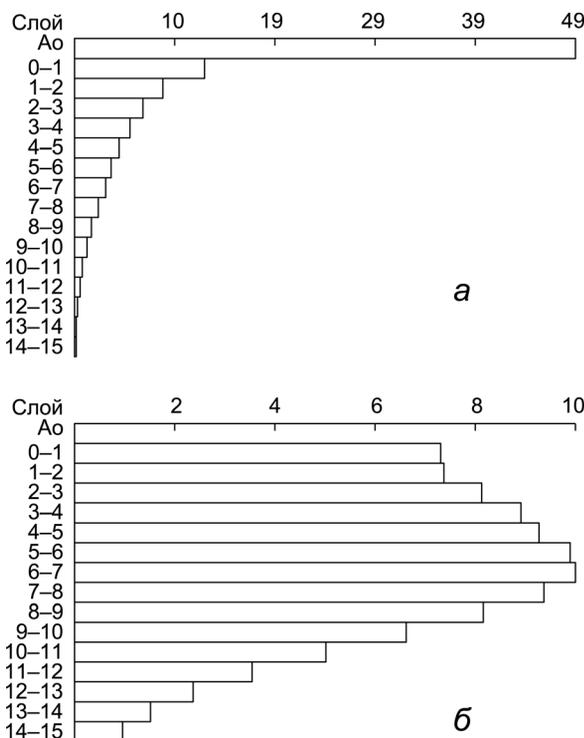


Рис. 1. Прогноз на 20 лет вертикального распределения ^{137}Cs в почвах, загрязненных в результате аварии на Чернобыльской АЭС в 1986 г. (процент от суммарного загрязнения рассматриваемого профиля), в почве автоморфного ландшафта: а — профиль почвы не нарушен, б — лесная подстилка удалена

дели в имитационной модели посуточной динамики ^{137}Cs и ^{90}Sr в почвенно-растительном покрове экосистемы лиственного леса ECORAD_Oak [10, 12], реализованной в среде объектно-ориентированного программирования Visual Basic.

Еще одним примером успешного применения алгоритма VERT_MIG является модель SOIL_bottomland. Она была построена на основе эмпирических данных о вертикальном распределении ^{137}Cs в аллювиальных почвах центральной части Плавского радиоактивного пятна (Тульская обл.) с использованием информации о начальном уровне радиоактивного загрязнения территории, периодичности затопления разных уровней поймы и физико-химических свойствах почв поймы р. Локны [24]. Модель предназначена для изучения и прогнозирования поведения радиоцезия в пойменных почвах.

Имеются существенные отличия от базового варианта алгоритма. Так, для учета влияния переувлажнения на нисходящую миграцию ^{137}Cs во время затопления почвы в уравнения функций введена вспомогательная переменная $BELL(a, b, c, d, e)$, которая задана кривой Пирсона I рода следующего вида: $BELL = ((a - b)/(c - b))^e ((a - d)/(c - d))^{e((d - c)/(c - b))}$. Она описывает асимметричную колоколообразную зависимость процесса от величины аргумента a и равна 0 при $a > b$, $a < d$, принимая максимальное значение 1 при $a = c$. Аргумент e отвечает за ширину колокола: чем меньше его величина, тем шире колокол. В данной версии модели a — это число дней с начала года, b — начало затопления, c — номер дня, в который был достигнут максимум переувлажнения почвы, d — день возврата почвы к обычному режиму увлажнения.

В разработанной программе в зависимости от моделируемого сценария можно задействовать и вспомогательные переменные, задающие режимы поступления радионуклидов из атмосферы, затопления и переотложения радиоактивного материала, при расчете которых используются вероятностные зависимости или генератор случайных чисел. Помимо этого, можно воспроизводить некатастрофические (не связанные с полным разрушением профиля почвы) антропогенные вмешательства. Таким образом, вспомогательные переменные позволяют учитывать радиологическую, паводковую и климатическую ситуации; с их помощью условия расчетов задаются жестко по имеющимся данным или подключаются стохастические элементы с использованием рандомизации.

Привнос ^{137}Cs извне во время паводка, связанный с переотложением радиоактивного материала, входящего в состав речных наносов, реализован в модели путем преобразования массива профильных данных. Добавляется новый элемент массива, соответствующий вновь сформированному верхнему (первому) слою. Затем переиндексируются (переобозначаются) элементы, соответствующие

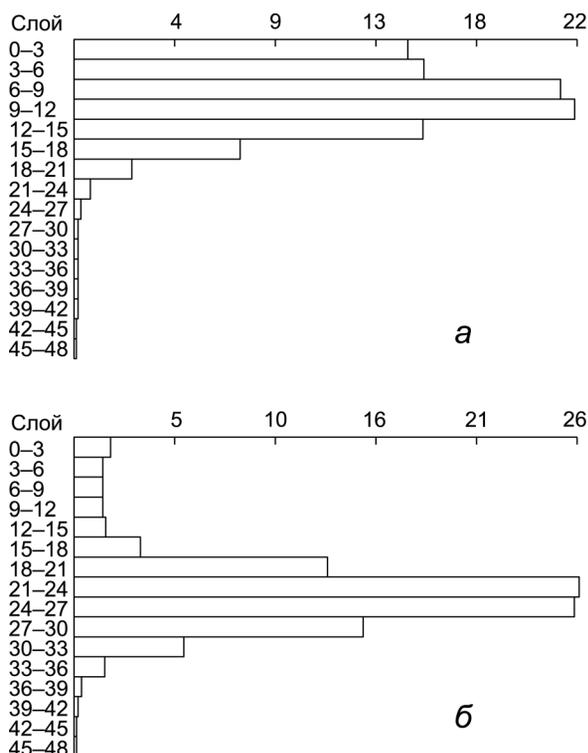


Рис. 2. Результаты работы модели по двум сценариям. Распределение ¹³⁷Cs в почве поймы через 28 лет после аварии на Чернобыльской АЭС: а — привноса извне нет, б — один раз в два года происходил привнос радиоактивного материала; начальная величина переотложения — 1 кБк/м², далее величина привноса снижается в результате радиоактивного распада

нижележащим слоям и удаляется последний элемент, который хранит данные о содержании радионуклида в самом нижнем слое. Поскольку размерность массива (48 элементов) для одномерного достаточно велика, и последний элемент массива при штатной работе программы пуст, то это не противоречит реальной ситуации на рассматриваемом временном интервале до 50 лет. При более долгосрочном прогнозе, когда ожидается более существенное заглубление радионуклида, размерность массива следует увеличить. Аналогичным образом — только путем удаления верхнего элемента массива — в модели реализуется сценарий смыва в половодье верхнего слоя почвы.

Модель реализована в кроссплатформенной среде программирования Qb64. Она имеет рабочую и демонстрационную версии и применима для реконструкции сценария чернобыльского загрязнения почв данной территории, а также для прогнозирования накопления и вертикальной миграции ¹³⁷Cs в профиле аллювиальных почв в различных ситуациях (рис. 2).

Модель использована нами для проведения численных экспериментов по изучению процессов миграции ¹³⁷Cs в пойменных почвах. В ходе экспериментов количественно показана определяющая роль процессов латеральной миграции радио-

нуклида в составе твердого эрозионного стока со склонов водосбора, его переноса в составе речного стока и переотложения на поверхности аллювиальных почв низкой поймы при формировании их профиля. В отсутствие значимых переотложений главным фактором перемещения пика загрязнения в глубь почвенного профиля является квазидиффузия малоподвижной компоненты.

Алгоритм VERT_MIG использован нами и для построения моделей, воспроизводящих вертикальную миграцию радиоцезия в почвах, загрязненных в результате аварии в 2011 г. на АЭС Фукусима-1 (Япония). Исходные данные для идентификации параметров любезно предоставлены нам японскими учеными, принимавшими участие в исследованиях по изучению последствий аварии, и позднее частично опубликованы [26]. В качестве объекта моделирования были выбраны лесная и луговая экосистемы с почвами на вулканических аэральных отложениях (*andosol*), представленные на территориях, подвергшихся радиоактивному загрязнению. Использованная в ходе полевых исследований

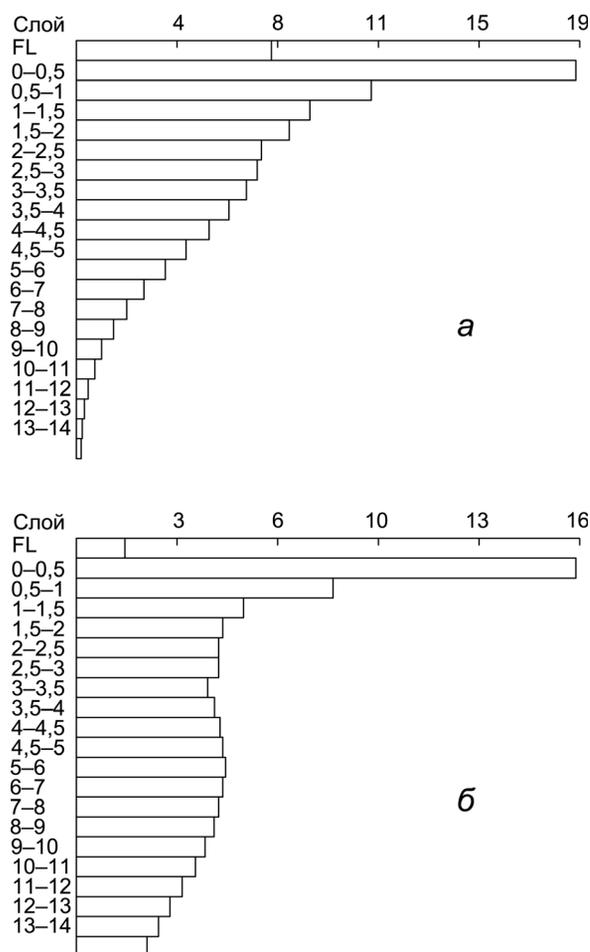


Рис. 3. Прогноз на 5 лет распределения ¹³⁷Cs в верхних слоях почв, загрязненных в результате аварии на АЭС Фукусима-1 (Япония) в 2011 г. (процент от суммарного загрязнения рассматриваемого профиля): а — лесная экосистема, б — луговая экосистема, FL — первый слой переменной мощности, лесная подстилка или ветошь

методика отбора проб почвы позволила японским коллегам более подробно, с шагом по глубине в 0,5 см, изучить радиоактивное загрязнение верхних 5 см почвы. Это учтено при построении моделей (рис. 3).

Данные, полученные в ходе более поздних исследований в этом регионе [5], подтвердили адекватность воспроизведения разработанными нами имитационными моделями поведения ^{137}Cs в рассматриваемых почвах. Модель реализована в кросс-платформенной среде программирования Qb64.

На основе VERT_MIG нами разработана модель, описывающая с шагом в одни сутки вертикальную миграцию ^{90}Sr по почвенному профилю дерново-подзолистой почвы и динамику физико-химических форм его содержания в ней. В модель включены следующие переменные состояния: $X(i)$ — водорастворимая форма содержания радионуклида в почве, $Z(i)$ — обменная форма, $Y(i)$ — фиксированная форма, где $i = 1, \dots, n$ — номер слоя почвы толщиной 1 см.

Значения параметров подобраны методом последовательных приближений (итераций) в процессе калибровки модели по данным, полученным в ходе исследований экологических последствий Кыштымской аварии на Урале [13]. Проверку модели проводили по независимым экспериментальным данным, полученным при исследовании поведения радионуклидов в дерново-подзолистой супесчаной почве в районе с. Чистоголовка (Киевская обл.), в северном секторе зоны отчуждения Чернобыльской АЭС [1].

Прогноз распределения физико-химических форм содержания ^{90}Sr по профилю почвы на глубину до 15 см на десятый год после однократного выпадения ^{90}Sr , процент от общего количества

Слой, см	Водорастворимая	Обменная	Фиксированная
0—1	6,07	62,27	31,67
1—2	2,74	64,52	32,74
2—3	2,25	65,17	32,58
3—4	2,05	65,78	32,17
4—5	1,89	66,45	31,66
5—6	1,75	67,16	31,05
6—7	1,63	67,9	30,47
7—8	1,51	68,65	29,83
8—9	1,42	69,4	29,18
9—10	1,33	70,15	28,52
10—11	1,25	70,9	27,85
11—12	1,18	71,63	27,19
12—13	1,12	72,36	26,53
13—14	1,05	73,12	25,82
14—15	0,99	73,92	25,09

Модель также реализована в Qb64 и позволяет прогнозировать вертикальную миграцию ^{90}Sr по профилю и соотношению между физико-химическими формами его содержания в почве (таблица) при различных сценариях радиоактивных выпадений. С моделью проведены численные эксперименты, в частности, по имитации повторных выпадений. Полученные результаты свидетельствуют об устойчивой работе модели и адекватном отображении ею предполагаемых радиологических ситуаций.

Заключение

Опыт, накопленный нами в процессе разработки, адаптации и реализации рассмотренного алгоритма и эксплуатации моделей, построенных на его основе, позволил сделать некоторые обобщения, выявить недостатки метода имитационного моделирования вертикальной миграции радионуклидов в почве и наметить перспективы дальнейшего его применения в данной области.

Важная задача, которую приходится решать при построении математических моделей — это их параметризация. Чем сложнее модель, тем больше параметров, величины которых так или иначе приходится определять. Развитие метода имитационного моделирования, основанного на реализации моделей на компьютере в виде программы, несколько снизило остроту этой проблемы, позволяя определять величину параметров с помощью самой модели методом итераций, но не убрало ее полностью. Это приводит нас к выводу о необходимости разумной минимизации моделей. В этом отношении, по нашему мнению, рассмотренный алгоритм является компромиссным решением, допускающим по желанию разработчиков как упрощенное рассмотрение процессов вертикальной миграции радионуклидов в почве, так и более дискретное их отображение, например, при необходимости локализации моделей.

Перспективные направления развития алгоритма VERT_MIG связаны, в первую очередь, с получением в ходе полевых и лабораторных исследований исходной информации по моделируемому объекту. Так, при наличии данных по изменению свойств почв региона по профилю возможно использование матриц коэффициентов миграции (конвективного переноса, диффузии, лёсвиважа) с привязкой их величин к вертикальной дифференциации физико-химических свойств почвы. Более полное знание закономерностей поведения радионуклидов в рассматриваемой почве позволит подбирать более адекватные уравнения функций переноса.

Возможно комплексное использование моделей, построенных на алгоритме VERT_MIG. Такие модели без труда реализуются практически

в любых программных средах, даже в электронных таблицах.

В очень упрощенном виде алгоритм уже применялся нами при создании модели трехмерной миграции радионуклидов в почве 3Dmig_mod [11]. В настоящее время для дальнейшего развития этой модели планируется использовать более полно его потенциальные возможности. Предполагается формировать объемный массив из элементарных призм — точечных моделей, построенных на данном алгоритме, путем установления горизонтальных связей между их компонентами.

Еще одним направлением применения алгоритма является интеграция моделей, построенных на его основе, с другими моделями или информационно-прогностическими системами. Включение модулей, построенных на данном алгоритме, в миграционные (например, типа *почва—растительный покров—животные*) и дозиметрические модели более высокого уровня, как показал наш опыт, позволяет успешно учитывать специфику поведения радионуклидов в почве и влияние их заглупления на формирование дозовых нагрузок.

Итак, алгоритм VERT_MIG в базовой версии относительно прост и позволяет при минимуме исходной информации прогнозировать проникновение радионуклидов в глубь почвы. В тоже время он обладает широкими адаптационными возможнос-

тями, легко модифицируется. В частности, допускается включение в модель разнообразных вспомогательных переменных, которые позволяют учитывать различные ситуации и максимально полно использовать имеющуюся исходную информацию. Причем с помощью этих переменных условия расчетов могут задаваться строго по имеющимся данным, а могут подключаться стохастические элементы отображения моделируемых процессов, например, с использованием рандомизации или с учетом ранее найденных вероятностных закономерностей.

Алгоритм в достаточной степени универсален, учитывает общие для большинства радионуклидов процессы их миграции в почвах. Модели, построенные на его основе, легко локализируются, поскольку требуют минимум исходной информации, и в тоже время позволяют учитывать местную специфику загрязненных территорий при наличии соответствующей информации. Помимо этого, алгоритм может успешно использоваться при создании субмоделей вертикальной миграции радионуклидов в почве в радиоэкологических моделях более высокого уровня.

Алгоритм показал свою эффективность при имитации разнообразных ситуаций радиоактивного загрязнения почв, прогнозировании их развития и при проведении численных экспериментов разной направленности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бондаренко Г.Н., Кононенко Л.В. Особенности вертикальной миграции радионуклидов топливных и конденсационных выпадений в почвах // Радиоизотопы в экологических исследованиях. Киев, 1992.
2. Булгаков А.А. Моделирование фиксации ^{137}Cs в почвах // Почвоведение. 2009. № 6.
3. Иванов Ю.А., Кашипаров В.А., Хомутинин Ю.В. и др. Вертикальный перенос радионуклидов выброса ЧАЭС в почвах. III. Математическое моделирование вертикального переноса радионуклидов в почвах // Радиохимия. 1996. Т. 38, вып. 3.
4. Коноплев А.В., Голубенков А.А. Моделирование вертикальной миграции радионуклидов в почве (по результатам ядерной аварии) // Метеорол. и гидрол. 1991. № 10.
5. Коноплев А.В., Голосов В.Н., Йоценко В.И. и др. Вертикальное распределение радиоцезия в почвах зоны аварии на АЭС Фукусима-1 // Почвоведение. 2016. № 5.
6. Лощилев Н.А., Иванов Ю.А., Кашипаров В.А. и др. Вертикальная миграция в почвах Полесья радионуклидов выброса ЧАЭС в различных физико-химических формах // Пробл. с.-х. радиол. Киев, 1991.
7. Мамихин С.В. Динамика углерода органического вещества и радионуклидов в наземных экосистемах (имитационное моделирование и применение информационных технологий). М., 2003.
8. Мамихин С.В. Биологическая доступность радионуклидов почв и воспроизведение ее динамики в имитационных моделях наземных экосистем // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 17. Почвоведение. 2004. № 2.
9. Мамихин С.В. Воспроизведение динамики форм содержания радиоцезия почвы в имитационных моделях наземных экосистем // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 17. Почвоведение. 2007. № 4.
10. Мамихин С.В. Имитационное моделирование поведения радионуклидов в наземных экосистемах в исследованиях экологических последствий аварии на Чернобыльской АЭС // Радиационная биология. Радиоэкология. 2016. Т. 56, № 3.
11. Мамихин С.В., Бадави В.М. Имитационная модель трехмерной миграции в почвах // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 17. Почвоведение. 2011. № 4.
12. Мамихин С.В., Манахов Д.В. Имитационная модель посуточной динамики ^{90}Sr в подсистеме «почва—древостой» лиственного леса // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 17. Почвоведение. 2016. № 2.
13. Поликарпов Г.Г., Клечковский В.М., Алексихин Р.М. Радиоэкология. М., 1971.
14. Силантьев А.Н., Шкуратова И.Г. Обнаружение промышленных загрязнений почвы и атмосферных выпадений на фоне глобального загрязнения. Л., 1983.
15. Фесенко С.В., Спиридонов С.И., Алексахин Р.М. и др. Математическая модель биологической доступности ^{137}Cs в почвах луговых экосистем // Почвоведение. 1997. № 1.
16. Фесенко С.В., Спиридонов С.И., Санжарова Н.И. и др. Моделирование миграции ^{137}Cs в системе почва—растения на торфяных почвах, подвергшихся загрязнению после аварии на Чернобыльской АЭС // Экология. 2002. № 3.

17. Щеглов А.И. Биогеохимия техногенных радионуклидов в лесных экосистемах: по материалам 10-летних исследований в зоне влияния аварии на ЧАЭС. М., 2000.
18. Absalom J.P., Young S.D., Crout N.M. et al. Predicting the transfer of radiocaesium from organic soils to plants using soil characteristics // J. Environ. Radioact. 2001. Vol. 52.
19. Crout Neil M.J., Beresford N.A., Howard B.J. et al. Modelling soil transport and plant uptake of radiocaesium // Transfer of radionuclides in natural and semi-natural environments / G. Desmet, P. Nassimbeni, M. Belli (eds.). Barking, UK, 1990.
20. Hormann V., Kirchner G. Prediction of the effects of soil-based countermeasures on soil solution chemistry of soils contaminated with radiocaesium using the hydrogeochemical code PHREEQC // Sci. Total Environ. 2002. Vol. 289, Iss. 1—3.
21. Koblinger-Bokori E., Szerbin P., Koblinger L., Vegvari I. Measurements and modelling of ^{137}Cs migration into various types of soil // Proc. 9th Congress of IRPA. Vol. 2. Vienna, 1996.
22. Kudas S.P., Gishkeluk I., Grinchik N. Application of computer modeling for the analysis and prediction of contaminant behavior in groundwater systems // Strategies to Enhance Environmental Security in Transition Countries / R.N. Hull et al. (eds.). Vienna, 2007.
23. Mamikhin S.V. Mathematical model of Cs-137 vertical migration in a forest soil // J. Environ. Radioact. 1995. Vol. 28, № 2.
24. Mamikhin S.V., Golosov V.N., Paramonova T.A. et al. Vertical Distribution of ^{137}Cs in Alluvial Soils of the Lokna River Floodplain (Tula oblast) Long after the Chernobyl Accident and Its Simulation // Euras. Soil Sci. 2016. Vol. 49, N 12.
25. Sundblad B., Mathiasson L. The turnover of Cs-137 within a forest ecosystem described by a compartment modelling approach GIDEA study site, Sweden // Sci. Total Environ. 1994. Vol. 157.
26. Takahashi J., Tamura K., Suda T. et al. Vertical distribution and temporal changes of ^{137}Cs in soil profiles under various land uses after the Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant accident // J. Environ. Radioact. 2015. Vol. 139.

Поступила в редакцию
15.07.2017

THE ADAPTIVE CAPABILITY OF THE ALGORITHM TO SIMULATE THE VERTICAL MIGRATION OF RADIONUCLIDES IN SOILS VERT_MIG

S.V. Mamikhin, D.N. Lipatov, D.V. Manahov, T.A. Paramonova,
V.V. Stolbova, A.I. Shcheglov

The possibility of using algorithm VERT_MIG the simulations of vertical migration of radionuclides in the soil are discussed. The algorithm was successfully used to develop models of migration ^{137}Cs and ^{90}Sr in radioactive contamination of different soils as a result of accidents at Chernobyl and Fukushima-1. The results of modeling are presented. The prospects for further use of this algorithm and some aspects of the use of simulation in this area are discussed.

Key words: radionuclides, soil, migration, simulation, algorithm.

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.
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, зав. каф. радиоэкологии и экотоксикологии ф-та почвоведения МГУ им. М.В. Ломоносова. *E-mail:* shchegl@mail.ru.