

Мамихин С. В.

**Модели вертикальной миграции ^{137}Cs
в автоморфных и гидроморфных почвах лесного фитоценоза**

Публикации: Мамихин С. В. Динамика углерода органического вещества и радионуклидов в наземных экосистемах (имитационное моделирование и применение информационных технологий). М., Изд-во Моск. ун-та, 2003, 172 с.

В результате Чернобыльской аварии 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 почвы.

Для изучения и прогнозирования поведения ^{137}Cs чернобыльского выброса в почвах лесных экосистем были построены математические модели вертикальной миграции этого радионуклида в почвах контрастной степени гидроморфности: автоморфной дерново-подзолистой почве элювиального ландшафта (дубрава с примесью сосны и березы) и гидроморфной торфянисто-глеевой подзолистой почве аккумулятивного ландшафта (черноольшанник). Воспроизводилась ситуация мелкодисперсных радиоактивных выпадения в результате Чернобыльской аварии. Дисперсность выпадений менее 10 мкм. Шаг моделей по времени - 1 день. Профиль разбит на сантиметровые слои. Рассматриваются подстилка и 15 нижележащих слоев.

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

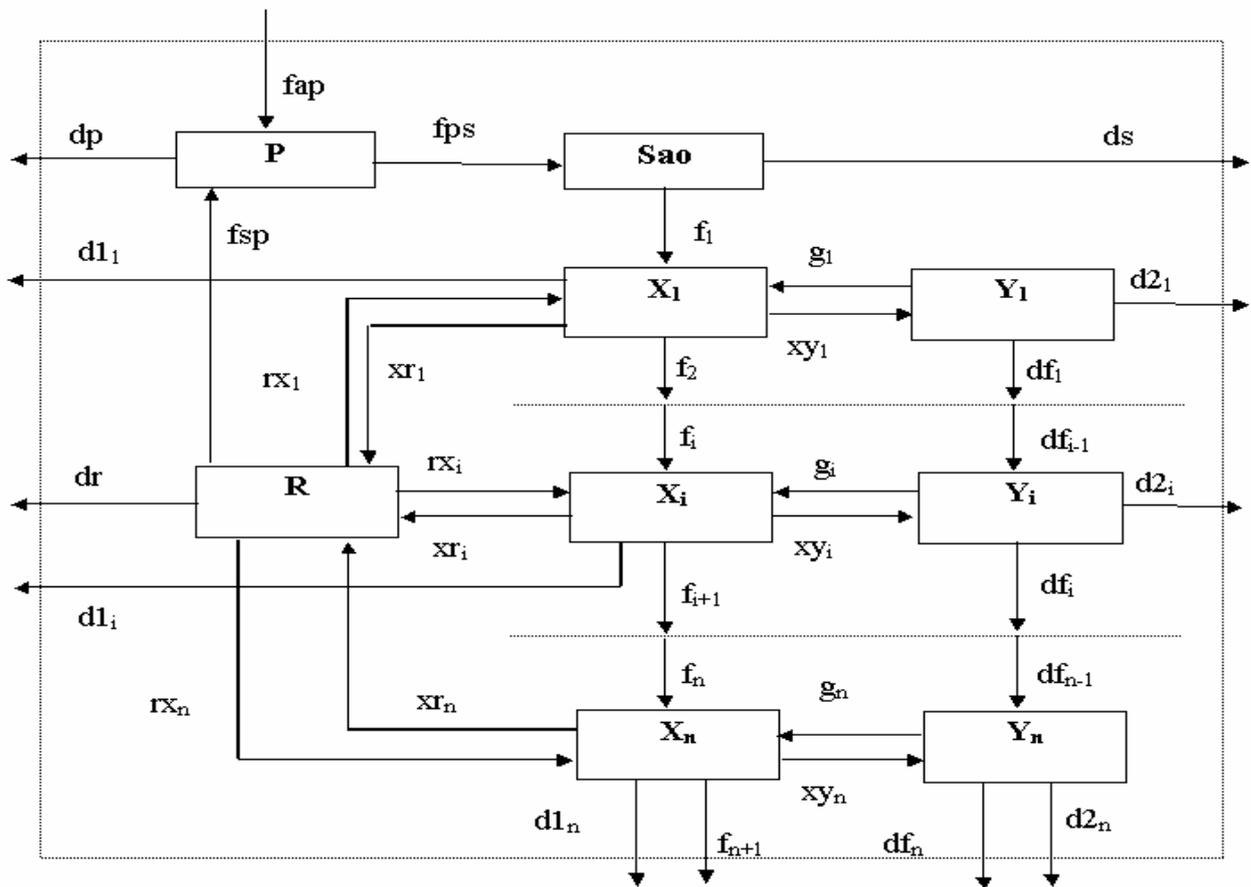


Рис. 1.

В моделях используются следующие переменные состояния, характеризующие содержание ^{137}Cs в экосистеме:

P - содержание ^{137}Cs в надземной 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 подстилке ($AoL + AoF + AoH$).

$X(i)$ - подвижная компонента ^{137}Cs в нижележащей толще почвы,

$Y(i)$ - неподвижная компонента ^{137}Cs , где $i = 1, \dots, n$ - номер сантиметровой 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. Под неподвижной формой содержания ^{137}Cs подразумевалась такая форма, когда мигрант закреплён 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 илистых частиц, задержанных почвой при лессиваже.

Все остальное считалось подвижной формой.

Аналитически модель описывается следующей системой дифференциальных уравнений:

$$dP/dt = fap + fsp - fps - dp$$

$$dSao/dt = fas + fps - f_l - ds$$

$$dX_i/dt = f_i - f_{i+1} - dl_i - xy_i + g_i + rx_i - xr_i$$

$$dY_i/dt = xy_i - d2_i - g_i + df_{i-1} - df_i$$

$$dR/dt = \sum_{i=1}^n xr_i - \sum_{i=1}^n rx_i - dr$$

Функции переноса:

fap - поступление ^{137}Cs из атмосферы на надземную фитомассу в составе радиоактивных выпадений. Для приближенной имитации Чернобыльской аварии было принято, что 26 апреля 1986 года $fap = 0.8 * a_1$. Известно, что на границе зоны около 80% было перехвачено кронами деревьев (Тихомиров и др., 1990). Такая же величина перехвата кронами дубово-елового леса отмечена в Бельгии (Sombre et al., 1994). Принято также, что в другие дни поступлений из атмосферы не было.

fsp - поступление ^{137}Cs в надземную фитомассу из почвы: $fsp = tf * (X + Y)$, где tf - коэффициент перехода ^{137}Cs из почвы в растительность.

fps - поступление ^{137}Cs в подстилку в составе радиоактивных выпадений и с опадом:

$$fps = 0.8 * a_1 * 0.24 * e^{-0.2 * t}$$

Уравнение подобрано на основании данных о скорости естественной дезактивации древостоя при данной дисперсности выпадений.

f_l - выведение ^{137}Cs из подстилки в результате минерализации опада и при выщелачивании из радиоактивных части: $f_l = a_2 * Sao$.

f_i - нисходящая миграция ^{137}Cs в результате конвективного переноса и лессиважа:

$$f_i = a_3 * X_i$$

df_i - миграция ^{137}Cs в результате диффузии: $df_i = d (Y_i - Y_{i+1}) / 2$, где d - коэффициент диффузии

xy_i - закрепление подвижной компоненты в i -ом слое почвы в результате адсорбции, ионного обмена, осаждения в составе органических и органо-минеральных комплексов:

$$xy_i = a_5 * X_i$$

g_i - переход неподвижной компоненты в подвижное состояние в результате десорбции, ионного обмена и др.: $g_i = a_6 * sig(i) * Y_i$, 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:

$$sig(i) = (i - 1)^2 / (((hc - 1) * 0.5 - 1)^2 - 1) + (i - 1)^2,$$

xr_i - поглощение радионуклида корневой системой растений и гифами грибов; принято, что биологически доступной формой ^{137}Cs является подвижная компонента:

$$xr_i = a_7 * X_i.$$

rx_i - высвобождение ^{137}Cs корнями и грибницей путем прижизненных выделений и при отмирании:

$$rx_i = a_8 * R * rd(i),$$

где rd - вспомогательная переменная, отражающая распределение сосущих корней и грибницы по профилю почвы, в этом варианте модели распределение было принято постоянным во времени, а по глубине оно изменяется от 40% в верхнем слое до 0.5% в нижнем.

$$d_1 - \text{радиоактивный распад: } dp = a_4 * P; ds = a_4 * Sao; d1_i = a_4 * X_i;$$

$$d2_i = a_4 * Y_i; dr = a_4 * R$$

Параметры модели для элювиального ландшафта представлены в таблице 3.8. Численные значения параметров определялись в основном с помощью модели методом итераций. Для калибровки моделей использованы данные по распределению ^{137}Cs в почвах 30-км зоны аварии Чернобыльской АЭС в 1986-1991 гг.

Для проверки модели автоморфного ландшафта использованы данные с тех же участков, полученные по несколько иной методике отбора в 1992 году.

Модели позволили дать прогноз динамики вертикального распределения ^{137}Cs в почве 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 и толщина гумусированного горизонта.

Получена количественная оценка влияния подстилки на интенсивность миграции ^{137}Cs по профилю почвы, вынос 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 (рис. 3.4) составил за 10 лет - 0.75%, за 20 лет - 31.5%.

Параметры модели.

	Численное значение, размерность	Смысловое значение
a ₁	задается кБк/м ²	Количество ¹³⁷ Cs, выпавшего на данную территорию
a ₂	0.00015 1/сутки	Коэф-т вывода ¹³⁷ Cs из подстилки
a ₃	0.05 "	Коэф-т миграции ¹³⁷ Cs из вышележащего в нижележащий слой минеральной толщи почвы
a ₄	0.0000633 "	Постоянная радиоактивного распада
a ₅	0.01 "	Коэф-т закрепления подвижной компоненты
a ₆	0.00005 "	Коэф-т перехода неподвижной компоненты в подвижное состояние
a ₇	0.035 "	Доля ¹³⁷ Cs, поглощаемая корневой системой и гифами грибов из данного слоя почвы
a ₈	0.2 "	Коэф-т высвобождения ¹³⁷ Cs из корней и грибницы