

МОДЕЛЬ КОРНЕВОГО ПОСТУПЛЕНИЯ ^{137}Cs НА НАЧАЛЬНОЙ СТАДИИ ОНТОГЕНЕЗА НЕКОТОРЫХ КУЛЬТУРНЫХ РАСТЕНИЙ

А. Н. Берлизов¹, Д. М. Гродзинский², Н. М. Рашидов², В. В. Тришин¹, В. В. Бережная²

¹ Институт ядерных исследований НАН Украины, Киев

² Институт клеточной биологии и генетической инженерии НАН Украины, Киев

На основе данных, полученных в условиях лабораторного эксперимента, разработана феноменологическая двухпараметрическая модель корневого поступления ^{137}Cs в надземную часть культурных растений – пшеницы, ржи, кукурузы, гороха, фасоли и сои – на начальной стадии их развития. На основе единого подхода модель описывает закономерности накопления радионуклидов растениями с разным типом корневых систем в условиях существенно отличающегося характера вертикального распределения активности в корнеобитаемом слое почвы. Параметры модели имеют адекватную интерпретацию. Определенные при описании экспериментальных данных значения параметров позволяют прогнозировать величины коэффициентов накопления для исследованных видов культурных растений при произвольном вертикальном профиле радиоактивного загрязнения почвы. Кроме того, модель дает информацию об особенностях корневого минерального питания растений на начальной стадии их онтогенеза.

Введение

При планировании мероприятий по фитодезактивации радиоактивно загрязненных территорий, а также прогнозировании доз облучения населения за счет миграции радионуклидов по трофическим цепям важным этапом является получение надежных прогнозов величин аккумуляции радионуклидов фитомассой различных видов культурных растений. Особенно актуальным исследование данных вопросов стало после Чернобыльской катастрофы, приведшей к выбросу огромного количества радиоцезия в окружающую среду. Следует отметить, что на протяжении последних десятилетий достигнут значительный прогресс в понимании биологических процессов, происходящих при накоплении радиоцезия растениями [1]. Среди факторов, влияющих на накопление радионуклидов надземной частью растений, можно указать следующие: 1) физико-химические свойства почвы (влажность, рН, пористость) [2]; 2) биологическая доступность радионуклидов в почве [3]; 3) дисперсность и физико-химические свойства содержащих радионуклиды частиц [4]; 4) вертикальный профиль загрязнения почвы [5]; 5) особенности структуры корневой системы растений и физиологические параметры корней [6]; 6) фаза развития растений [7].

В недавней работе [8] представлены результаты проведенных нами экспериментов (рис.1), где в контролируемых лабораторных условиях исследовалось влияние толщины Δ и глубины залегания h загрязненного ^{137}Cs слоя почвы на коэффициенты накопления (КН) культурных растений – пшеницы (*Triticum aestivum* L.), ржи (*Secale cereale* L.), кукурузы (*Zea mais* L.), имеющих мочковатую корневую систему, а также гороха (*Pisum sativum* L.), фасоли (*Phaseolus vulgaris* L.) и сои (*Glicine max* L. Merr.), имеющих стержневой тип корневой системы. В первой серии экспериментов фиксировалась толщина радиоактивного слоя $\Delta = 4$ см, который располагали на различных глубинах $h = 0, 4, 8$ и 12 см, а во второй серии загрязнен-

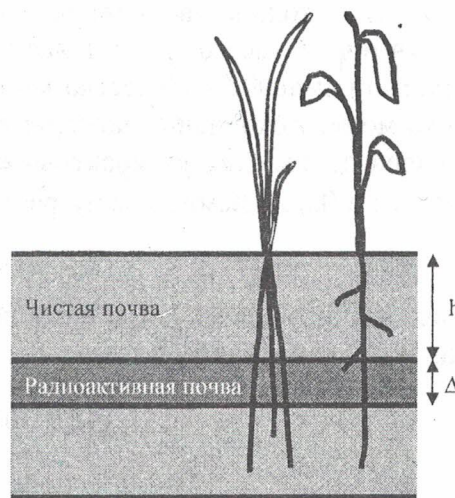


Рис. 1. Схема эксперимента [8].

© А. Н. Берлизов, Д. М. Гродзинский, Н. М. Рашидов, В. В. Тришин, В. В. Бережная, 2005

ный слой располагали на поверхности ($h = 0$ см) и варьировали его толщину $\Delta = 4, 8, 12$ и 16 см. По измеренным удельным активностям надземной части растений A_m (Бк/кг) для каждого варианта рассчитывали величины коэффициента накопления $KH = A_m / A_{ms}$, где $A_{ms} = (2,00 \pm 0,10) \cdot 10^4$ Бк/кг – удельная активность загрязненного слоя почвы. Таким образом, среди перечисленных выше факторов были выделены только два – влияние профиля загрязнения почвы и типа корневой системы растений, что позволило установить пределы связанного с ними возможного варьирования величин KH , а также получить данные, необходимые для разработки соответствующей математической модели корневого поступления ^{137}Cs в надземную часть растений для рассматриваемого периода развития.

В следующих разделах приведено подробное изложение разработанной модели, а также приведены результаты ее применения для описания полученных в [8] экспериментальных данных.

Модель корневого поступления ^{137}Cs на начальной стадии онтогенеза

В основу модели положим следующие исходные положения:

- 1) количество поступающих в надземную часть растения радионуклидов составляет некоторую постоянную часть его минерального питания;
- 2) скорость поступления минеральных веществ постоянна в течение рассматриваемого периода развития растений;
- 3) изменение длины корневой системы со временем происходит в соответствии с S-образным (сигмоидальным) законом.

В соответствии с первым положением активность ^{137}Cs , поступающая из загрязненного слоя почвы, составляет некоторую постоянную часть α_{Cs} (Бк/кг) массы минерального питания растения, поставляемого корневой системой из этого же слоя. При этом считается, что α_{Cs} не зависит ни от глубины залегания, ни от толщины радиоактивного слоя почвы. Если скорость поступления минеральных веществ в момент времени t с загрязненного слоя почвы толщиной Δ , расположенного на глубине h (далее слой (h, Δ)), обозначить через $v_m(t; h, \Delta)$ (г/с), то скорость поступления ^{137}Cs (Бк/с) с этого слоя запишется как

$$v_{Cs}(t; h, \Delta) = \alpha_{Cs} \cdot v_m(t; h, \Delta), \quad (1)$$

а суммарная активность, накопленная растением за весь период наблюдения t_0 , как

$$A(t_0; h, \Delta) = \int_0^{t_0} v_{Cs}(t; h, \Delta) dt = \alpha_{Cs} \int_0^{t_0} v_m(t; h, \Delta) dt = \alpha_{Cs} \cdot m_m(t_0; h, \Delta), \quad (2)$$

где $m_m(t_0; h, \Delta)$ – количество минеральных веществ, полученных растением с рассматриваемого слоя в течение всего времени наблюдения.

Пусть суммарное количество минеральных веществ $m_m(t_0; 0, l_0)$ (l_0 – длина корневой системы на момент окончания эксперимента), полученных растением за время эксперимента со всех слоев почвы (как радиоактивных, так и не радиоактивных), составляет некоторую часть β массы $m(t_0)$ надземной части растения к концу периода наблюдения:

$$m_m(t_0; 0, l_0) = \beta \cdot m(t_0). \quad (3)$$

Тогда удельная активность ^{137}Cs , накопленного растением за это время, и соответствующий коэффициент накопления будут равны:

$$A_m(t_0; h, \Delta) = \frac{A(t_0; h, \Delta)}{m(t_0)} = \alpha_{Cs} \cdot \beta \cdot \frac{m_m(t_0; h, \Delta)}{m_m(t_0; 0, l_0)}, \quad (4)$$

$$KH = \frac{A_m(t_0; h, \Delta)}{A_{ms}} = KH_0 \cdot \frac{m_m(t_0; h, \Delta)}{m_m(t_0; 0, l_0)}, \quad (5)$$

где A_{ms} – удельная активность почвы, $KH_0 = \alpha_{Cs} \cdot \beta / A_{ms}$ – коэффициент накопления для растения, выращенного на почве, характеризующейся равномерным распределением радиоактивности по вертикальному профилю. Как видно из выражений (4) и (5), для описания процесса переноса радиоактивности из почвы в растение в рамках принятых приближений необходимо знать функцию количества минеральных веществ, полученных растением за время наблюдения, в зависимости от глубины залегания и толщины питающего слоя почвы.

Для ее нахождения введем функцию $R(x, t)$, описывающую распределение скорости поступления минеральных веществ по длине корня в произвольный момент времени t . Тогда скорость поступления минеральных веществ в растение со слоя (h, Δ) в произвольный момент времени наблюдения t запишется как

$$v_m(t; h, \Delta) = \int_h^{h+\Delta} R(x, t) dx. \tag{6}$$

Отметим, что функция $R(x, t)$ отлична от нуля лишь в интервале $x = [0, l(t)]$, где $l(t)$ – длина корневой системы растения на момент времени t . Далее используем гипотезу постоянного поступления (положение № 2), согласно которой будем считать, что интегральная (со всего объема почвы на глубину залегания корневой системы $l(t)$) скорость поступления минеральных веществ не зависит от времени:

$$v_m(t; 0, l(t)) = v_0 = \text{const}. \tag{7}$$

Кроме того, в качестве следующего приближения будем считать, что поступление минеральных веществ равномерно по всей длине корневой системы. Тогда функция $R(x, t)$ будет иметь вид

$$R(x, t) = \begin{cases} v_0/l(t), & x \leq l(t), \\ 0, & x > l(t) \end{cases} \tag{8}$$

В графическом виде данная функция показана на рис. 2. В качестве модели для зависимости длины корневой системы растений от времени используем степенную функцию в виде

$$l(t) = l_0 \left(\frac{t}{t_0} \right)^\delta. \tag{9}$$

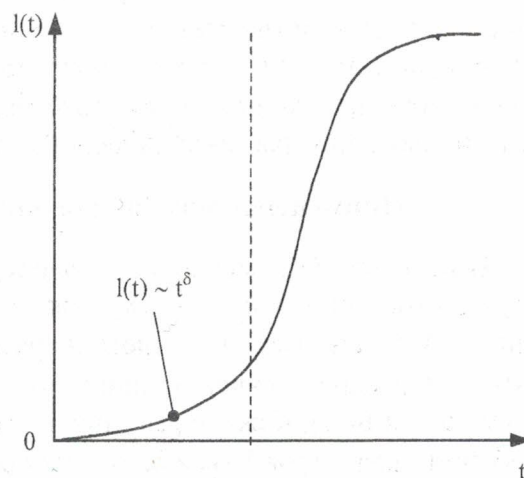
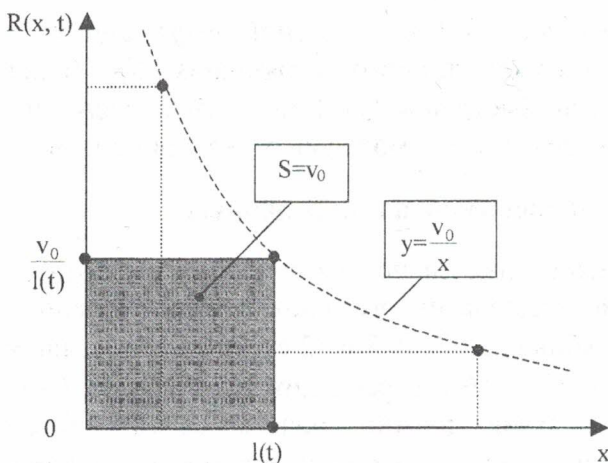


Рис. 2. Вид функции распределения скорости поступления минеральных веществ по длине корневой системы в использованной модели.

Рис. 3. S-образная кривая, описывающая зависимость длины растения от времени, и ее параметризация на начальной фазе роста.

Данная функция описывает форму нижней ветви S-образной кривой (рис. 3), что соответствует рассматриваемой стадии развития растений. Заметим, что значения параметра $\delta > 1$ соответствуют типичной форме нижней ветви S-образной кривой.

Используя описанную для функции распределения $R(x, t)$ модель, нетрудно отыскать выражение для количества минеральных веществ, поступивших со слоя (h, Δ) за время наблюдения t_0 :

$$m_m(t_0; h, \Delta) = \int_0^{t_0} v_m(t; h, \Delta) dt = \int_0^{t_0} \int_h^{h+\Delta} R(x, t) dx dt = v_0 t_0 F(\delta; h, \Delta). \quad (10)$$

Здесь функция $F(\delta; h, \Delta)$ дается выражением

$$F(\delta; h, \Delta) = \frac{\delta}{\delta - 1} \cdot \left\{ \left(\frac{h + \Delta}{l_0} \right)^{\frac{1}{\delta}} - \left(\frac{h}{l_0} \right)^{\frac{1}{\delta}} - \frac{\Delta}{l_0 \delta} \right\} \quad (11)$$

и описывает отклонение рассматриваемой ситуации от случая равномерного радиоактивного загрязнения почвы по вертикальному профилю. Поскольку $F(\delta; 0, l_0) = 1$ и $m_m(t_0; h, l_0) = v_0 t_0$, из формулы (5) получаем окончательное выражение для коэффициента накопления:

$$KH = KH_0 \cdot F(\delta; h, \Delta). \quad (12)$$

Теперь найдем выражение для коэффициента накопления растений, выращенных на почве, имеющей произвольный профиль распределения активности по глубине $A(x)$, см^{-1} . Для этого в формуле (11) перейдем к бесконечно тонкому слою $\Delta \rightarrow 0$, который обозначим через dx , а также введем обозначение $h = x$ для глубины расположения этого слоя. Тогда

$$F(\delta; h, \Delta) \xrightarrow{\Delta \rightarrow 0} \frac{1}{l_0} \cdot f(\delta; x) \cdot dx = \frac{1}{l_0} \cdot \frac{1}{(\delta - 1)} \left[\left(\frac{x}{l_0} \right)^{\frac{1}{\delta} - 1} - 1 \right] \cdot dx \quad (13)$$

и для KH при произвольном профиле загрязнения почвы будем иметь

$$KH = KH_0 \cdot \int_0^{l_0} A(x) \cdot f(\delta; x) dx. \quad (14)$$

Данное выражение позволяет прогнозировать величины KH для растений, выращенных на почве с произвольным вертикальным профилем радиоактивного загрязнения. Как будет показано ниже, необходимые для этого величины параметров KH_0 и δ могут быть получены для различных видов растений на основе описания результатов модельных экспериментов.

Применение модели для описания экспериментальных данных

Выражение (12) может быть непосредственно применено для описания результатов экспериментов, описанных в [8] как в случае радиоактивного слоя с фиксированной толщиной $\Delta = 4$ см, расположенного на разных глубинах $h = 0, 4, 8$ и 12 см (серия № 1), так и в случае слоя нарастающей толщины $\Delta = 0, 4, 8, 12$ и 16 см, расположенного на глубине $h = 0$ см (серия № 2). Каждое растение в этих двух случаях должно описываться одним и тем же набором параметров KH_0 и δ , что дает возможность определять значения этих параметров при подгонке одного набора данных и применять их при построении кривой для другого набора, тестируя таким образом вместе с правильностью выбранной модели также и взаимную согласованность экспериментальных результатов.

Результаты определения параметров модели для разных типов растений приведены в табл. 1, а полученные аппроксимирующие зависимости в виде графиков показаны на рис. 4.

Таблица 1. Определенные при описании экспериментальных данных значения параметров модели для разных видов культурных растений

Растение		KN_0	δ
Кукуруза		$0,28 \pm 0,07$	$2,35 \pm 0,50$
Пшеница		$1,45 \pm 0,13$	$0,48 \pm 0,27$
Рожь	набор № 1	$1,08 \pm 0,07$	$1,70 \pm 0,80$
	набор № 2	$1,73 \pm 0,05$	$0,59 \pm 0,04$
Фасоль		$0,353 \pm 0,009$	$3,00 \pm 0,30$
Горох		$0,66 \pm 0,06$	$0,58 \pm 0,32$
Соя		$0,085 \pm 0,003$	$2,85 \pm 0,80$

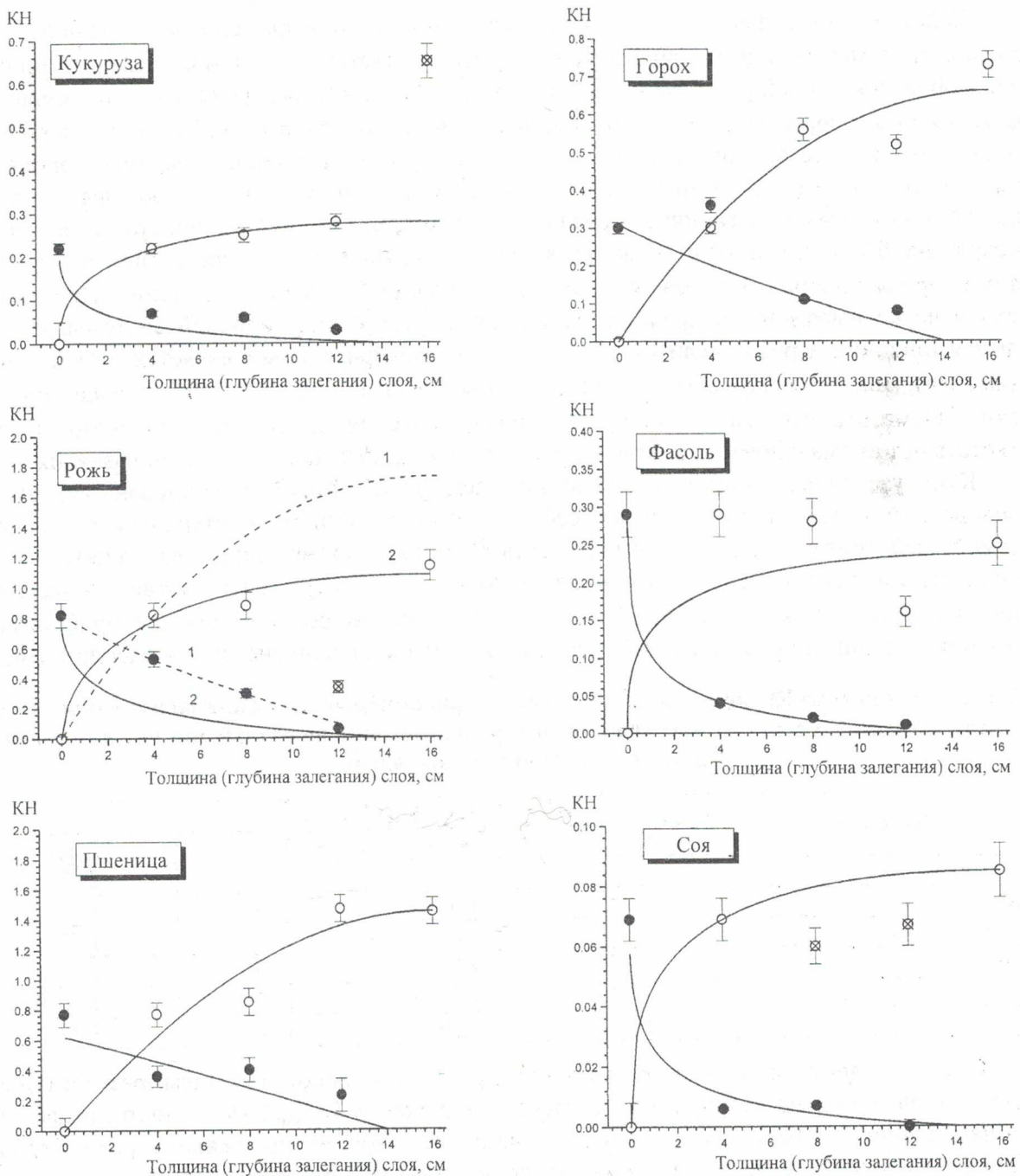


Рис. 4. Результаты описания экспериментальных данных [8] с использованием разработанной модели.

В связи с отмеченной выше эквивалентностью наборов экспериментальных данных определение параметров модели проводили при подгонке того из них, который, на наш взгляд, характеризовался наибольшей регулярностью и надежностью. Так, для кукурузы, гороха и пшеницы оценка параметров производилась при подгонке данных второй серии измерений, при этом заведомо неверные точки (помечены на рис. 4 крестиками) игнорировались. Для сои и фасоли параметры модели определялись при аппроксимации данных первой серии измерений. А в случае ржи, где наблюдается сильное несоответствие наборов данных между собой, были определены два набора параметров при подгонке данных первой и второй серий. Построенные с использованием этих наборов кривые показаны соответственно штриховыми и сплошными линиями.

Как видно, в целом модель удовлетворительно описывает всю совокупность экспериментальных данных, полученных для растений с существенно различающимися типами корневых систем и характеризующихся значительными вариациями КН. При этом величина параметра δ оказывается чувствительной к структуре корневой системы растений.

Действительно, для фасоли и сои, имеющих четко выраженный стержневой тип корневой системы, величина параметра $\delta \approx 3$, что соответствует типичной форме нижней ветви S-образной кривой роста растений. В то же самое время для гороха, тоже относящегося к растениям со стержневым типом корней, величина параметра $\delta \approx 0.6$. Такое существенное отличие, скорее всего, объясняется тем, что структура корневой системы гороха на рассматриваемой стадии развития характеризуется наличием мощных боковых корней, существенно отличаясь от типично стержневого характера, который приобретает корневая система на более поздних стадиях развития. На данной же стадии развития корневая система гороха подобна мочковатой, что подтверждается близостью значения параметра δ гороха и четко выраженных представителей мочковатого типа корневой системы, какими являются пшеница и рожь (если принять, что для ржи правильным является второй набор параметров). Значения параметра δ для пшеницы и ржи составляют $\approx 0,5$ и $\approx 0,6$ соответственно. Отметим, что, как и в случае гороха, значения параметра δ пшеницы и ржи соответствуют аномальному ходу кривой роста растений на начальной стадии развития.

Кукуруза, являясь типичным представителем мочковатого типа корневой системы, на исследованной стадии развития ведет себя подобно растениям со стержневой корневой системой. Действительно, в ходе эксперимента растение пускало один - два мощных корня, которые быстро достигали дна сосуда, что по условиям эксперимента соответствовало его окончанию. Значение параметра $\delta \approx 2,4$ для кукурузы заметно больше единицы, приближаясь к значению типичных представителей стержневого типа корневой системы – фасоли и сои.

Таблица 2. Отношение КН при экспоненциальном и равномерном профиле загрязнения почвы радионуклидом ^{137}Cs для разных видов культурных растений на разные моменты времени после радиоактивного выпадения

Растение	КН _{exp} /КН ₀			
	5 лет	10 лет	15 лет	20 лет
Кукуруза	4,72	3,73	3,24	2,93
Пшеница	1,72	1,64	1,58	1,53
Рожь (набор № 2)	1,95	1,82	1,74	1,67
Фасоль	5,25	4,06	3,49	3,13
Горох	1,93	1,81	1,72	1,66
Соя	5,14	4,00	3,44	3,09

С целью демонстрации возможностей прогноза с использованием разработанной модели в табл. 2 приведены результаты расчета отношения КН_{exp}/КН₀ величин коэффициентов накопления для растений, выращенных на почве с экспоненциальным и равномерным профилями радиоактивного загрязнения. Экспоненциальный профиль загрязнения брался в виде суммы медленной и быстрой компонент:

$$A(x) = \frac{f_1}{\sqrt{\pi M_1 t}} \exp\left(-\frac{x^2}{4M_1 t}\right) + \frac{f_2}{\sqrt{\pi M_2 t}} \exp\left(-\frac{x^2}{4M_2 t}\right). \quad (15)$$

Здесь $M_1 = 0,5 \cdot 10^{-8} \text{ см}^2 \cdot \text{с}^{-1}$ и $M_2 = 11 \cdot 10^{-8} \text{ см}^2 \cdot \text{с}^{-1}$ – коэффициенты миграции для медленного и быстрого типов переноса, а $f_1 = 0,76$ и $f_2 = 0,23$ – их доли соответственно, t – время, прошедшее с момента радиоактивного выпадения. В таблице приведены результаты расчетов на моменты времени 5, 10, 15 и 20 лет после выпадения ¹³⁷Cs на поверхность почвы. Для малых интервалов времени величины отношений максимальны ввиду существенного отличия распределения (15) от равномерного. При этом у растений, для которых на рассматриваемой стадии развития структура корневой системы носит стержневой характер (кукуруза, фасоль, соя), величины отношений заметно больше, что объясняется большим вкладом более глубоких слоев почвы в накопление радионуклидов надземной частью этих растений.

Выводы

С использованием достаточно очевидных предположений удалось построить математическую модель, которая на основе единого подхода позволила удовлетворительно описать экспериментальные данные по коэффициентам накопления ¹³⁷Cs надземной фитомассой культурных растений, имеющих разные типы корневых систем и выращенных в условиях сильно отличающегося характера радиоактивного загрязнения корнеобитаемого слоя почвы.

Модель представляет результаты прогноза величин коэффициентов накопления в аналитическом виде и содержит всего два параметра, имеющих четкую интерпретацию: KH_0 – коэффициент накопления для равномерно загрязненного корнеобитаемого слоя почвы и δ – параметр, описывающий ход кривой роста $l(t) \sim t^\delta$ на начальной стадии развития растений. Параметр δ оказывается чувствительным к структуре корневой системы растений, типичной для рассматриваемой стадии их развития. В частности, величины параметра оказываются большими и меньшими единицы для стержневого и мочковатого характера корневой системы соответственно. В последнем случае ход кривой роста растений на начальной стадии развития оказывается не соответствующим типичному S-образному закону.

Определенные при описании экспериментальных данных значения параметров модели позволяют прогнозировать величины коэффициентов накопления на начальной стадии развития исследованных видов культурных растений – кукурузы, пшеницы, ржи, фасоли, гороха и сои – для условий произвольного вертикального профиля радиоактивного загрязнения почвы. Это является важным для получения достоверных прогнозов величин аккумуляции радиоактивности надземной частью растений для реальных условий произрастания, а также проведения корректного сравнения коэффициентов накопления растений, выращенных в разных условиях радиоактивного загрязнения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Fuhrmann M., Lasat M., Ebbs E, et al. Uptake and Release of Cesium-137 by five plant species as influenced by soil amendments in field experiments // J. Environmental Quality. - 2003. - № 32(6). - P. 2272 - 2279.
2. Chamard P., Velasco R. H., Belli M. et al. Caesium-137 and strontium-90 distribution in a soil profile // The Science of the Total Environment. - 1992. - Vol. 136. - P. 251 - 258.
3. Коноплев А. В., Коноплева И. В. Параметризация перехода ¹³⁷Cs из почвы в растения на основе ключевых почвенных характеристик // Радиационная биология. Радиоэкология. - 1999. - Т. 39, № 4. - С. 455 - 461.
4. Bobovnikova Ts. I., Virchenko Ye. P., Konoplev A. V. et al. Chemical forms of occurrence of long-lived radionuclides and their alteration in soils near the Chernobyl nuclear power station // Soviet Soil Science. - 1991. - Vol. 23, No. 5. - P. 52 - 57.
5. Bulgakov A. A., Konoplev A. V., Popov V. Ye. et al. Mechanisms of the vertical migration of long-lived radionuclides in soils within 30 kilometers of the Chernobyl nuclear power station // Soviet Soil Science. - 1991. - Vol. 23, No. 5. - P. 46 - 51.

6. *Frissel M.J.* FAO/IAEA/IUR Protocol for experimental studies on the uptake of radionuclides from soils by plants // Annual review "Soil-Plant-Relationship", Seibersdorf, Austria, 1998. - P. 128 - 138.
7. *Bysirzejewska-Piotrowska G., Urban P. L.* Accumulation and translocation of cesium-137 in onion plants (*Allium cepa*) // Environmental and Experimental Botany. - 2004. - Vol. 51, No. 1. - P. 3 - 7.
8. Берлизов А. Н., Гродзинский Д. М., Рашидов Н. М и др. Влияние толщины и глубины залегания загрязненного ^{137}Cs слоя почвы на коэффициент накопления у растений // Зб. наук. праць Ін-ту ядерних досл. - 2003. - № 3 (11). - С. 88 - 94.

МОДЕЛЬ КОРЕНЕВОГО НАДХОДЖЕННЯ ^{137}Cs НА ПОЧАТКОВІЙ СТАДІЇ ОНТОГЕНЕЗУ ДЕЯКИХ КУЛЬТУРНИХ РОСЛИН

А. М. Берлизов, Д. М. Гродзинський, Н. М. Рашидов, В. В. Тришин, В. В. Бережна

На основі даних, отриманих в умовах лабораторного експерименту, розроблено феноменологічну двопараметричну модель кореневого надходження ^{137}Cs в надземну частину культурних рослин – пшениці, жита, кукурудзи, гороху, квасолі та сої – на початковій стадії їх розвитку. На основі єдиного підходу модель описує закономірності накопичення радіонуклідів рослинами з різним типом корневих систем в умовах, що суттєво відрізняються характером вертикального розподілу активності у шарі ґрунту. Параметри моделі мають адекватну інтерпретацію. Визначені при описі експериментальних даних значення параметрів дають можливість прогнозувати величини коефіцієнтів накопичення для досліджених видів культурних рослин при довільному вертикальному профілі радіоактивного забруднення ґрунту. Крім того, модель дає інформацію про особливості кореневого надходження мінеральних речовин у рослини на початковій стадії їх онтогенезу.

A MODEL OF ^{137}Cs ROOT UPTAKE AT THE INITIAL STAGE OF ONTOGENESIS OF SOME CULTIVATED PLANTS

A. N. Berlizov, D. M. Grodzynsky, N. M. Rashydov, V. V. Tryshyn, V. V. Berezhna

On the basis of the data, obtained in the laboratory experiments, a phenomenological two-parameter model was developed for ^{137}Cs root uptake at the initial stage of ontogenesis of some cultivated plants - wheat, rye, maize, pea, bean, and soybean. Within the framework of the common approach the model describes the radionuclide accumulation by the plants with different types of the root system grown on soil with significantly different character of radionuclide contamination vertical profiles of the soil. The model parameters have adequate interpretation. The parameter values, defined as a result of the experimental data fitting, allow predicting values of the uptake coefficients for the investigated cultivated plants for an arbitrary vertical profile of radioactive contamination. Besides, the model provides the information about peculiarities of the mineral substance uptake by plants at the initial stage of their ontogenesis.

Поступила в редакцію 28.12.04,
после доработки – 17.02.05.