



УДК 631.4:539.1

**Т.Л. КУШНЕР, А.Н. КУКСИН**

*УО «Брестский государственный технический университет», г. Брест*

### **РАССМОТРЕНИЕ МОДЕЛЕЙ МИГРАЦИИ РАДИОНУКЛИДОВ В КУРСЕ «РАДИАЦИОННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ»**

В результате аварии на Чернобыльской АЭС имеется несколько регионов в Республике Беларусь, загрязненных долгоживущими радионуклидами. Изотопы цезия вносят наибольший вклад в дозу внешнего облучения человека, проживающего на загрязненной территории, и участвуют также в процессах переноса по «пищевым цепочкам». Этот естественный перенос особенно высок в лесных регионах и на территориях, в которых верхний слой почвы состоит в основном из органических образований (например, болотистые почвы, торфяники, пойменные луга и пастбища). В данных видах почв цезий не имел первоначального соединения с глиноземными минеральными частицами, следовательно, его содержание в органической субстанции должно быть наибольшим [1]. Вышеперечисленные земли используются в растениеводстве, животноводстве, при заготовке кормов и расположены по всей территории Беларуси.

Для прогнозирования кинетики изменения радиационного состояния территорий, загрязненных в результате аварии на ЧАЭС, важно установить характер и механизмы миграции радионуклидов в различных типах почв. Поскольку поведение радионуклидов существенным образом зависит от форм их выпадения и физико-химических характеристик почвы, возникает потребность исследовать механизмы миграции и, по возможности, прогнозировать временной характер этих процессов. С течением времени происходит естественная миграция радиоизотопов из верхних слоев почвы в глубинные. Причиной такого перемещения является диффузия и перенос с талой и дождевой водой. Концентрация радионуклидов в почве на различной глубине зависит от множества факторов и представляет большой интерес для исследования, поскольку влияет на перенос Cs-137 из почвы в растения [2].

Наиболее эффективным методом исследования распределения радионуклида в почве является определение удельной активности проб грунта, взятых с различной глубины. Каждая проба представляет собой пласт определенной толщины. Количество пластов может варьироваться в зависимости от поставленной задачи и возможностей ее решения. В однородных по своему составу почвах толщина пластов может быть одинакова и составлять примерно 2-3 см. Таким образом, взяв слой почвы в 20 см, можно получить 7-10 проб. В лесных почвах имеется ярко выраженная неоднородность. Поэтому удобнее вести послойное взятие проб с неравной толщиной. При этом границы между слоями (горизонтами) будут выражены достаточно четко. На основе измеренной удельной активности образцов почвы по Cs-137, отобранных с малым шагом, можно построить профили вертикального распределения радионуклида по глубине и смоделировать процесс его миграции [3].

Целью данной работы является сравнительная характеристика математических моделей, описывающих процессы миграции радионуклидов. Данные мо-



дели кратко рассматриваются на лекциях курса «Радиационная безопасность» для студентов специальностей «Природоохранная деятельность», «Мелиорация и водное хозяйство».

Первой рассмотрим модель «черного ящика» [4,5]. В данной модели каждый слой почвы представляется как вещество, обладающее определенной активностью за счет содержащегося в нем радионуклида. Изменение активности со временем в каждом слое определяется следующими факторами: поступление радионуклида из предыдущего слоя; перемещение радиоизотопа в последующий слой; естественный радиоактивный распад.

Блок-схема, описывающая данную модель, представлена на рисунке 1.

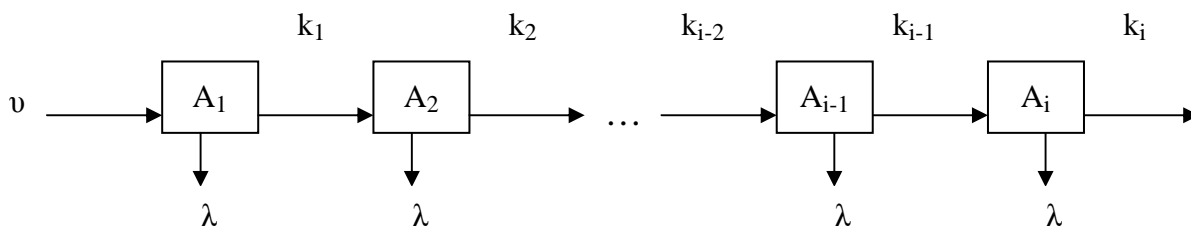


Рисунок 1 – Модель миграции радионуклидов «Черный ящик»

Изменение активности с течением времени в каждом из горизонтов описывается следующими дифференциальными уравнениями:

$$\frac{dA_1}{dt} = v - (k_1 + \lambda) \cdot A_1, \quad (1)$$

где  $A_1$  – активность радионуклида в первом горизонте;  $k_1$  – коэффициент переноса радионуклида из первого слоя во второй;  $\lambda$  – постоянная радиоактивного распада;  $v$  – скорость осаждения радионуклида на поверхность почвы.

Из выражения (1) следует, что

$$\frac{dA_1}{dt} + (k_1 + \lambda) \cdot A_1 = v. \quad (2)$$

Для последующих горизонтов с активностью  $A_i$  и коэффициентом переноса  $k_i$  имеем:

$$\frac{dA_i}{dt} = k_{i-1} \cdot A_{i-1} - (k_i + \lambda) \cdot A_i, \quad (3)$$

$$\frac{dA_i}{dt} + (k_i + \lambda) \cdot A_i = k_{i-1} \cdot A_{i-1}. \quad (4)$$

Данная модель отличается сравнительной простотой. В качестве  $i$ -го горизонта можно рассматривать однородный по своему составу слой почвы, но существенно отличающийся от соседнего. Примером могут служить почвы лесов.

Решением рассматриваемых дифференциальных уравнений являются следующие равенства:

$$A_1(t) = A_1(0) \cdot e^{-(k_1 + \lambda)t} + \frac{v}{k_1 + \lambda} \cdot (1 - e^{-(k_1 + \lambda)t}), \quad (5)$$

$$A_i(t) = A_i(0) \cdot e^{-(k_i + \lambda)t} + \frac{k_{i-1} \cdot A_{i-1}}{k_i + \lambda} \cdot (1 - e^{-(k_i + \lambda)t}). \quad (6)$$

Наряду с вышеизложенными преимуществами у данной модели есть определенные недостатки. Во-первых, перенос радионуклидов рассматривается только вглубь почвы, хотя существует и обратный процесс. Например, цезий,



растворенный в воде, перемещается вместе с ней по капиллярам. Во-вторых, скорость осаждения радионуклида на поверхность почвы должна быть строго определена (что не всегда возможно). Но факты измерений, которые дали бы зависимость осаждения Cs-137 как функцию времени, есть. В Германии в апреле-мае 1986 года измеряли активность дождевых осадков, выпавших на единицу площади в лесах Баварии под Мюнхеном [6]. В-третьих, для получения корректных с математической точки зрения решений коэффициенты переноса в последних двух горизонтах должны быть одинаковыми. В лесных почвах такими могут быть только В-горизонты, начиная с глубины 10-15 см.

Для сравнения рассмотрим другой подход к моделированию миграции радионуклидов – диффузионно-сорбционную модель [7]. Согласно данной модели миграция радионуклидов по вертикальному профилю почвы может обуславливаться многими факторами. Определяющие из них:

- диффузия свободных ионов в почвенном растворе;
- диффузия частиц почвы, на которых сорбирован радионуклид;
- конвекционный перенос вещества.

В случае только диффузионного переноса вещества изменение активности  $A$  почвы с глубиной  $z$  описывается гауссовой функцией, а зависимость  $\ln A$  от глубины  $z$  определяется формулой:

$$\ln A = \ln \frac{C}{\sqrt{\pi Dt}} - \frac{z^2}{4Dt}, \quad (7)$$

где  $D$  – коэффициент диффузии радионуклида в почве;  $t$  – время, отсчитываемое с момента аварии на ЧАЭС;  $C$  – постоянная, определяющая активность выпавшего радионуклида.

Если почву представить состоящей из двух фаз [8]: почвенный раствор и твердая фаза, то можно полагать, что в почвенном растворе происходят процессы диффузии и конвекционного переноса радионуклида, а твердая фаза сорбирует его необратимо. Тогда процесс вертикальной миграции будет описываться уравнением:

$$\frac{\partial C_1}{\partial t} = D \cdot \frac{\partial^2 C_1}{\partial z^2} - \alpha \cdot \frac{\partial C_1}{\partial z} - \beta \cdot C_1, \quad (8)$$

где  $C_1$  – концентрация радионуклида в почвенном растворе на глубине  $z$ ;  $D$  – эффективный коэффициент диффузии;  $\alpha$  – скорость конвекционного переноса радионуклида;  $\beta$  – скорость сорбции радионуклида в твердой фазе. Скорость конвекции  $\alpha$  будет соответственно положительной или отрицательной в зависимости от направления потока вглубь почвы или к поверхности.

Дополнительно к (8) необходимо записать уравнение баланса, имеющего место при переносе и сорбции вещества из почвенного раствора к твердой фазе:

$$v_2 \cdot \frac{\partial C_2}{\partial t} = \beta \cdot C_1 \cdot v_1, \quad (9)$$

где  $C_2$  – концентрация радионуклида в твердой фазе в момент времени  $t$  на глубине  $z$ ;  $v_1$  и  $v_2$  – обменные доли жидкой и твердой фаз, зависящие от глубины.

Суммарная удельная активность почвы описывается тогда следующим образом:

$$A = (C_1 v_1 + C_2 v_2) / \rho, \quad (10)$$

где  $\rho$  – средняя плотность почвы.



Решения уравнений (8) и (9) находятся при начальных и граничных условиях:

$$D \cdot \frac{\partial C_1}{\partial z} \Big|_{z=0} - \alpha \cdot C_1 \Big|_{z=0} = 0, \quad (11)$$

$$C_1(z, 0) = C \delta(z, 0), \quad (12)$$

$$C_1(z, t) \Big|_{z \rightarrow \infty} = 0, \quad (13)$$

где  $C$  – количество радиоактивных атомов, выпавших на единицу площади, в момент аварии;  $\delta(z, 0)$  – дельта-функция.

Решение уравнения (8) примет вид:

$$C_1(z, t) = C \left\{ \frac{1}{\sqrt{\pi D \cdot t}} \exp \left[ -\beta \cdot t - \frac{(z - \alpha \cdot t)^2}{4D \cdot t} \right] - \frac{\alpha}{2D} \exp \left( -\beta \cdot t + \frac{\alpha \cdot z}{D} \right) \operatorname{erfc} \left( \frac{z}{2\sqrt{D \cdot t}} + \frac{\alpha}{2} \sqrt{\frac{t}{D}} \right) \right\} \quad (14)$$

Из (9) следует, что

$$C_2(z, t) = \beta \frac{V_1}{V_2} \int_0^t C_1(z, t) dt. \quad (15)$$

Подставив (14), (15) в (10) получаем выражение (16):

$$A(z, t) = A_0 \left\{ \frac{1}{\sqrt{\pi D \cdot t}} \exp \left[ -\beta \cdot t - \frac{(z - \alpha \cdot t)^2}{4D \cdot t} \right] - \frac{\alpha}{2D} \exp \left( -\beta \cdot t + \frac{\alpha \cdot z}{D} \right) \operatorname{erfc} \left( \frac{z}{2\sqrt{D \cdot t}} + \frac{\alpha}{2} \sqrt{\frac{t}{D}} \right) \right\} + \\ + A_0 \beta \cdot \int_0^t \left\{ \frac{1}{\sqrt{\pi D \cdot t}} \exp \left[ -\beta \cdot t - \frac{(z - \alpha \cdot t)^2}{4D \cdot t} \right] - \frac{\alpha}{2D} \exp \left( -\beta \cdot t + \frac{\alpha \cdot z}{D} \right) \operatorname{erfc} \left( \frac{z}{2\sqrt{D \cdot t}} + \frac{\alpha}{2} \sqrt{\frac{t}{D}} \right) \right\} dt \quad (16)$$

где  $A_0 = C \cdot v_1 \cdot e^{-\lambda t} / \rho$ ,  $\lambda$  – постоянная радиоактивного распада рассматриваемого изотопа.

Вертикальный перенос Cs-137 в целинных почвах адекватно описывается в рамках рассмотренной модели, учитывающей процессы диффузии и конвекции радионуклида в почвенном растворе, а также его сорбции твердой фазой почвы.

Сравнивая две модели, можно утверждать, что вторая намного сложнее, чем первая. Но студенты, имеющие достаточные навыки в работе с программными продуктами, могут сделать расчеты в ходе их научно-исследовательской работы, используя программные продукты «Excel», «Mathematica» и др. Полезно отметить, что курс «Радиационная безопасность» читается в том же семестре, что и дисциплины «Мелиоративное почвоведение» и «Основы природопользования». Полученные сведения о моделях миграции радионуклидов в почве помогут студентам при изучении специальных дисциплин, а также будут использованы в научно-исследовательской работе студентов в текущем учебном году.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Коноплев, А.В. Распределение радионуклидов, выпавших в результате аварии на Чернобыльской АЭС в системе «почва-вода» / А.В. Коноплев [и др.] // Метеорология и гидрология. – 1988. – № 12. – С. 63-74.
2. Буравлев, Е.П. Миграция Cs-137 и Se-144 в почвенном покрове зоны отселения Чернобыльской АЭС / Е.П. Буравлев, М.Н. Лебединский, С.К. Дрич // Агрохимия. – 1991. – № 6. – С. 70-73.
3. Прохоров, В.М. Миграция радиоактивных загрязнений в почвах: физико-химические механизмы и моделирование. – М.: Агропромиздат, 1981. – 160 с.
4. Bürmann, W. Migration of cesium radionuclides in the soil of spruce forest / W. Bürmann, J. Drissner, R. Miller, R. Heider, T. Kuschner // The Fourt Int. Conf. on the Chemistry and migra-



tion Behaviour of the Actinides and Fission Product in the Geosphere, Charleston, 12-17 December 1993. – Charleston, 1993. – P. 122-129.

5. Bürmann, W. Migration of  $^{134}\text{Cs}$ ,  $^{137}\text{Cs}$  Radionuclides in the Soil and Uptake by Plants in German Spruce Forests / W.Bürmann, J.Drissner, R.Miller, G.Lindner, R.Heider, T.Kuschner // *Radiochimica Acta*. – 1994. – № 66-67. – München: Oldenbourg Verlag, 1994. – P. 405-412.

6. Bunzl, K. Die Ausbreitung von Fallout Cs-134, Cs-137 und Ru-106 aus Tschernobyl / K. Bunzl, K. Kreutzer, R. Schierl // *Zeit. Pflanz. Bodenk.* – 1989. – № 152. – S. 39-44.

7. Олехнович, Н.М. Вертикальный перенос в торфяниках  $^{137}\text{Cs}$ , выпавшего в результате аварии на ЧАЭС / Н.М. Олехнович [и др.] // *ИФЖ*. 1995. – Т. 68, № 1. – С. 33-38.

8. Фрид, Ф.С. Диффузия цезия в почвах / Ф.С. Фрид, В.Г. Граковский // *Почвоведение*. – 1988. – № 2. – С.78-86.

УДК 547.9(075.8)

**М.А. КУШНЕР, Т.С. СЕЛИВЕРСТОВА, В.С. БЕЗБОРОДОВ**

*УО «Белорусский государственный технологический университет»,  
г. Минск*

### **ЗНАЧЕНИЕ И МЕСТО ХИМИИ ПРИРОДНЫХ СОЕДИНЕНИЙ В ОБЩЕМ КУРСЕ ДИСЦИПЛИНЫ «ОРГАНИЧЕСКАЯ ХИМИЯ» И РЕШЕНИЕ ПРОБЛЕМЫ ФОРМИРОВАНИЯ УМК**

В настоящее время в учебно-методическом комплексе по дисциплине «Органическая химия» в БГТУ при подготовке ряда специалистов для химико-технологических отраслей промышленности используются учебные пособия, например [1-4], которые включают, как правило, только те классы органических соединений, которые составляют основу для формирования стержневой структуры химического мышления будущего химика-технолога. Однако обучение студентов ряда специальностей Белорусского государственного технологического университета, таких как «Биотехнология», «Биоэкология», «Охрана окружающей среды и рациональное использование природных ресурсов», «Химическая технология переработки древесины» и др. неразрывно связано с необходимостью изучения некоторых специальных разделов, касающихся особенностей строения, химических свойств, способов получения и использования гетерофункциональных органических веществ, относящихся к группе природных и биологически активных соединений, которые зачастую не включаются в основные учебники, либо представлены в них слишком кратко или упрощенно. Акцент на эти вопросы дисциплины приобретает особую важность в контексте насущной необходимости диверсификации знаний, которая предполагает межпредметную интеграцию – т.е. взаимодействие знаний, результатом которого является получение нового знания. Осуществление такой интеграции должно быть основано на системном подходе к организации обучения специалиста, целостности его подготовки, которая достигается посредством взаимосвязей ее основных компонентов. В целом обучение должно характеризоваться единой целевой направленностью на конечные результаты с учетом специализации будущих выпускников.

Природные соединения продолжают занимать достойное место в современной органической химии, несмотря на то, что уже в XX веке научно оформились такие отрасли химической науки, как «Химия природных соединений»,