

**Compartmental model of radionuclides migration in the system «soil – crops»  
Perevolockaja T.<sup>1</sup>, Perevolockij A.<sup>2</sup>, Spiridonov S.<sup>3</sup>, Anisimov V.<sup>4</sup> (Russian Federation)  
Компартментная модель миграции радионуклидов в системе  
«почва - сельскохозяйственные растения»  
Переволоцкая Т. В.<sup>1</sup>, Переволоцкий А. Н.<sup>2</sup>, Спиридонов С. И.<sup>3</sup>, Анисимов В. С.<sup>4</sup>  
(Российская Федерация)**

<sup>1</sup>Переволоцкая Татьяна Витальевна / Perevolotskaya Tatiana - кандидат биологических наук, доцент, старший научный сотрудник;

<sup>2</sup>Переволоцкий Александр Николаевич / Perevolotsky Aleksander - доктор биологических наук, ведущий научный сотрудник;

<sup>3</sup>Спиридонов Сергей Иннокентьевич / Spiridonov Sergey – доктор биологических наук, профессор;

<sup>4</sup>Анисимов Вячеслав Сергеевич / Anisimov Vjacheslav – кандидат биологических наук,

заведующий лабораторией,

лаборатория математического моделирования,

Федеральное государственное бюджетное научное учреждение

Всероссийский научно-исследовательский институт радиологии и агроэкологии, г. Обнинск, Калужская область

**Аннотация:** прогнозные расчеты распределения радионуклидов выполнены с помощью компартментной модели миграции, основанной на методе системного анализа для типичных сельскохозяйственных растений. Были применены следующие допущения: после радиоактивных выпадений радионуклиды больше не поступают в экосистему; основным механизмом миграции в растения является корневое поступление; внескорневое загрязнение учтено в коэффициентах переноса радионуклидов в фитомассу; происходит «старение» радионуклидов в почве и связанное с ним снижение корневого поступления в растения.

**Abstract:** prognostic calculation of distribution the radionuclides was done using compartmental mathematical models, based on the method of system analysis for typical representatives of agro-ecosystems. The following key assumptions were applied: after accidental contamination radionuclides no longer enter the ecosystem; the basic mechanism of radionuclides intake by agricultural crops is root absorption; foliar radioactive contamination is considered in the constants of radionuclide transfer from soil to biomass elements; «aging» of radionuclides from accidental fallouts takes place in soil and occurs in gradual reduction of root uptake.

**Ключевые слова:** радионуклиды, коэффициент перехода, удельная активность, модель миграции, сельскохозяйственные растения.

**Keywords:** radionuclides, transfer factor, specific activity, migration model, agricultural plant.

### Введение

Актуальной задачей обеспечения радиационной защиты населения в зоне расположения объектов ядерного топливного цикла является соответствие содержания техногенных радионуклидов в сельскохозяйственных растениях допустимым гигиеническим нормативам. Одним из эффективных методов оценок радиоактивного загрязнения сельскохозяйственных растений является математическое моделирование [1]. Таким образом, целью исследований является разработка модели миграции радионуклидов в системе «почва - сельскохозяйственные растения», позволяющая определить величину потока радионуклидов между компонентами агроэкосистемы и удельную активность хозяйственно-ценных частей растений.

### Материалы и методы

В основу разработанной модели миграции был положен компартментный подход, основанный на методе системного анализа [1, 2]. Были выделены основные компартменты агроэкосистемы: пахотный слой почвы (0-20 см), подпахотный слой почвы (глубже 20 см), надземная фитомасса и подземная фитомасса (рисунок 1).

Динамика обмена радионуклидов между отдельными компартментами описывалась системой линейных дифференциальных уравнений [2]:

$$\frac{dA_i}{dt} = A_i^0 + \sum_{i=1}^n k_{ij} \cdot A_n - \sum_{j=1}^m k_{ji} \cdot A_m, \quad (1)$$

где  $A_i$ ,  $A_m$ ,  $A_n$  – содержание радионуклида в звеньях, Бк,  $A_i^0$  – величина поступления радионуклида извне, Бк·с<sup>-1</sup>,  $k_{ij}$  и  $k_{ji}$  – константы переноса радионуклида между соответствующими компартментами.

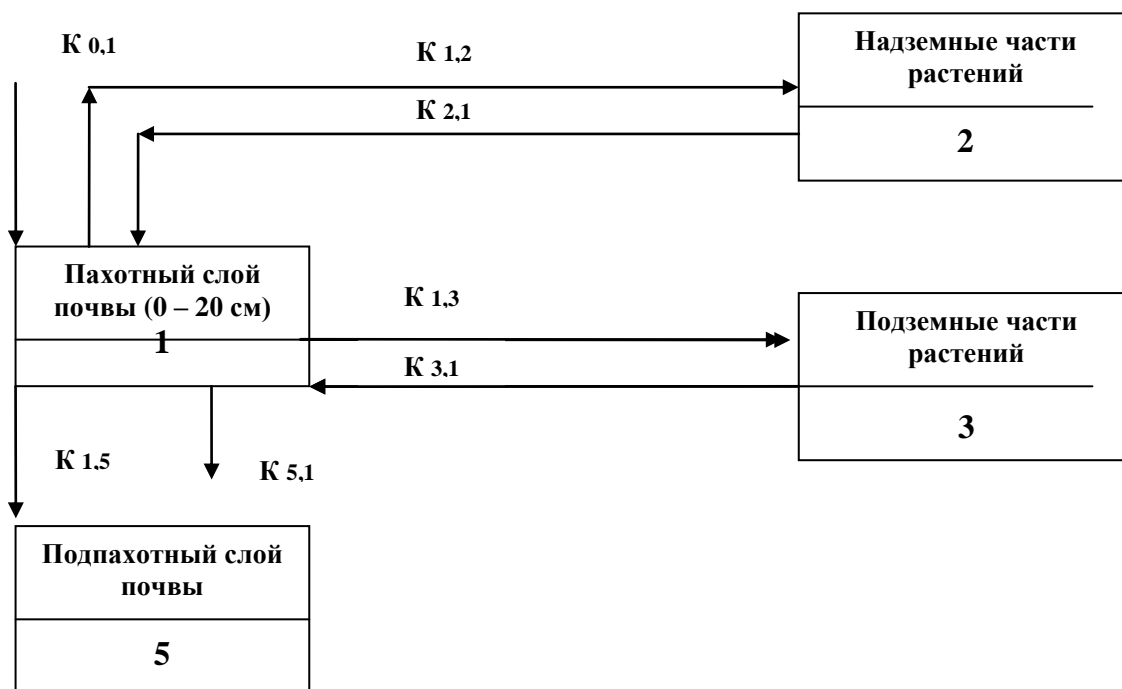


Рис. 1. Модель миграции радионуклидов в агроэкосистемах

Решение системы уравнений осуществлено путем замены дифференциалов на конечно-разностные аналоги с шагом дифференцирования  $\Delta t = 1$ .

$$\frac{dA_1}{dt} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta A_1}{\Delta t} \approx \frac{A_{1,t+\Delta t} - A_{1,t}}{\Delta t} \Big|_{\text{при } \Delta t=1} = A_{1,t+1} - A_{1,t} \quad (2)$$

В модели применены следующие допущения и предположения:

- применен консервативный подход о максимально возможном накоплении радионуклидов сельскохозяйственными растениями;
- имеют место одноразовые радиоактивные выпадения, после которых поступление радионуклидов в агроэкосистему не происходит;
- надземная и подземная биомасса растений достигает максимальных значений к моменту уборки урожая. Расчет удельной активности хозяйственно ценных компонент проводили исходя из их доли в биомассе растения (надземной части для зерновых и трав, подземной – для корне- и клубнеплодов);
- корневое поступление радионуклидов является основным фактором путем их перехода в растения;
- внекорневое радиоактивное загрязнение вследствие ресуспензии учтено в константах переноса;
- константы переноса учитывают переход радионуклидов из растения в почву вследствие удаления радионуклидов с поверхности растений, корневыми выделениями и другими процессами;
- начальное условие – в момент времени  $t=0$  начинается поступление радионуклидов между компартаментами агроэкосистемы. До этого момента радиоактивное загрязнение надземной фитомассы отсутствует;
- опосредованы многие процессы, происходящих в агроэкосистеме. Прежде всего, усреднена сезонная динамика в содержании минеральных и радиоактивных веществ в растениях, условия микросреды, изменение подвижности радионуклидов в почве во времени, перераспределение их по формам нахождения и т. д.;
- накопление радионуклидов сельскохозяйственными растениями происходит только во время сезона вегетации. До его наступления и после завершения «работает» только миграция радионуклидов в подпахотный слой почвы;
- при расчете учтен радиоактивный распад – сумма запаса радионуклидов во всех компонентах в текущем году должна была быть меньше по сравнению с прошлым на величину постоянной

радиоактивного распада  $\sum_{n=1}^j A_{n,t+1} / \sum_{n=1}^j A_{n,t}$ .

- предполагается «старение» радионуклидов в почве – увеличение энергии их связи с почвенным поглощающим комплексом с соответствующим снижением констант переноса в соответствии с экспоненциальным законом.

Для учета экспоненциального снижения параметров перехода в системе «почва - растение» некоторые константы переноса были представлены в следующем виде:

- для подземной фитомассы (корне- и клубнеплоды) :

$$k_{13} = k_{113} \cdot e^{-\lambda_{113}t} + k_{1113} \cdot e^{-\lambda_{1113}t} \quad (4)$$

- для надземной фитомассы (зерно и биомасса трав) :

$$k_{12} = k_{112} \cdot e^{-\lambda_{112}t} + k_{1112} \cdot e^{-\lambda_{1112}t} \quad (5)$$

Константы переноса определяли методом подбора таким образом, чтобы они максимально соответствовали данным по динамике удельной активности радионуклидов в хозяйственно ценных частях растений [3].

Верификация удельной активности радионуклидов, нормированная на величину плотности загрязнения им почвы (коэффициент перехода), проводилась по независимым данным [4].

#### Результаты и обсуждение

На рисунке 2 представлен пример прогнозной динамики удельной активности  $^{137}\text{Cs}$  в зерне озимой пшеницы, произрастающей на дерново-подзолистых песчаных почвах, нормированной на плотность загрязнения  $1 \text{ Бк} \cdot \text{м}^{-2}$  в сравнении с данными по накоплению этой сельскохозяйственной культурой [4]. Как следует из представленных результатов, установлена удовлетворительная сходимость между расчетными и экспериментальными данными, что позволяет делать на основе результатов прогнозных расчетов корректные выводы и использовать их для прогнозирования радиоактивного загрязнения сельскохозяйственной продукции на любом этапе после радиоактивных выпадений.

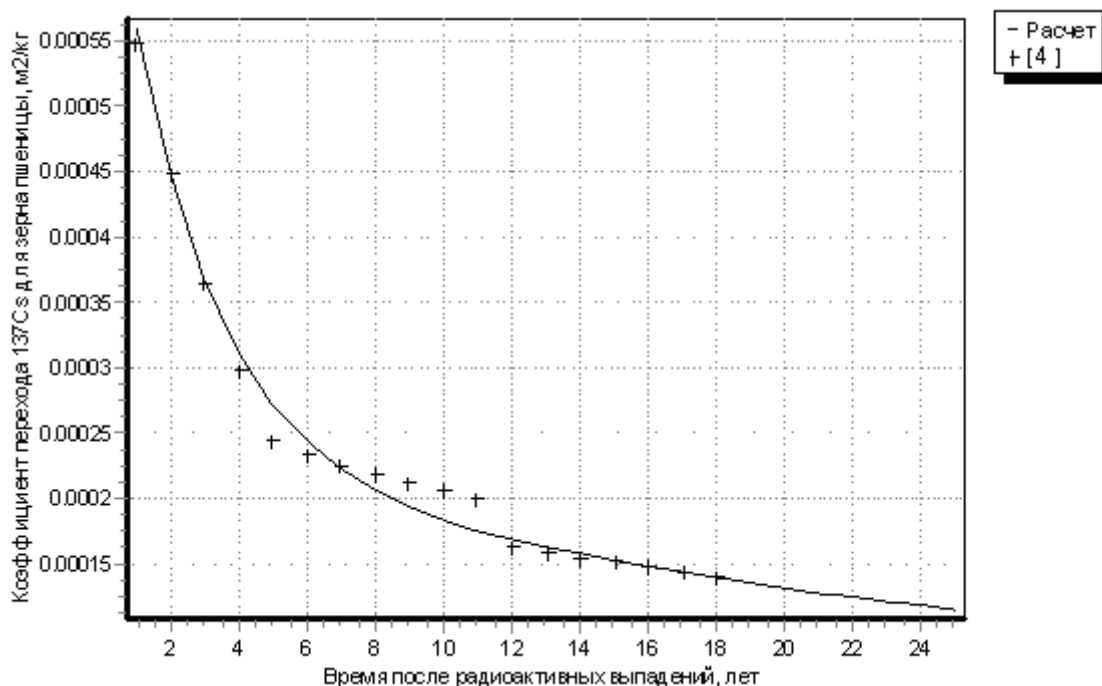


Рис. 2

Динамика коэффициентов перехода  $^{137}\text{Cs}$  для зерна пшеницы на дерново-подзолистых песчаных и супесчаных почвах

#### Литература

1. Сельскохозяйственная радиоэкологии. Под ред. Р. М. Алексахина, Н. А. Корнеева. М.: Экология, 1992.
2. Гусев Н. Г., Беляев В. А. Радиоактивные выбросы в биосфере: Справочник. М.: Энергоатомиздат, 1991.

3. *Мошаров О. В.* Прогнозирование накопления долгоживущих радионуклидов в сельскохозяйственных растениях. Дисс. на соискание ученой степени канд. наук. Обнинск, ВНИИСХРАЭ, 2006.
4. Quantification of radionuclide transfer in terrestrial and freshwater environments for radiological assessments (IAEA-TECDOC-1616). Vienna, 2009. 680 p.