

Мамихин С.В., Никулина М.В., Манахов Д.В. Механизмы сезонной и многолетней динамики радиоактивных изотопов цезия в экосистеме дубового леса //Проблемы радиоэкологии и пограничных дисциплин /Ред. Мигунов В.И., Трапезников А.В.. Вып.6. Заречный, 2005. С. 292 – 308.

МЕХАНИЗМЫ СЕЗОННОЙ И МНОГОЛЕТНЕЙ ДИНАМИКИ РАДИОАКТИВНЫХ ИЗОТОПОВ ЦЕЗИЯ В ЭКОСИСТЕМЕ ДУБОВОГО ЛЕСА

Мамихин С.В, Никулина М.В., Манахов Д.В.

Факультет почвоведения Московского государственного университета им.М.В.Ломоносова

E-mail: Lrad@soil.msu.ru

(Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект 03-04-48495))

В статье приводятся результаты работ по изучению механизмов и параметров круговорота радиоцезия в экосистеме широколиственного леса. Уточнены предположения об аналогичности поведения калия и радиоцезия (в квазиравновесном состоянии) в древесных растениях. Исследована зависимость биологической доступности радиоцезия, содержащегося в почве, от различных почвенных факторов с использованием статистических методов. С помощью имитационной модели суточной динамики радиоцезия в снытевой дубраве рассчитана многолетняя динамика содержания радиоцезия чернобыльского происхождения в компонентах древостоя и почвой и величин потоков между ними, суммированных по годам. В ходе численных экспериментов с моделью уточнены априорные предположения о формальном механизме поведения радиоцезия в двух основных подсистемах лесной экосистемы - в почве и древесной растительности и дано предварительное определение роли их компонентов и потоков между ними в биологическом круговороте этого радионуклида.

Несмотря на многолетние интенсивные исследований поведения радионуклидов в лесных экосистемах, количественные закономерности транслокации радионуклидов в растительном и почвенном покрове экосистем на территориях, подвергшихся радиоактивному загрязнению, до сих пор изучены слабо. Имеющиеся оценки имеют весьма приблизительный характер, а объяснение механизмов поведения радионуклидов в лесных экосистемах основано в большинстве случаев на информации качественного характера.

Одной из возможностей уточнить эти механизмы и получить более надежную информацию может служить привлечение материалов по биологическому круговороту химических аналогов радионуклидов. Поскольку предметом наших исследований является радиоцезий, нас интересовало, насколько похоже ведут себя в растительном покрове этот радионуклид и его химический аналог - калий. Следует отметить, что работы по целенаправленному изучению аналогии поведения калия и радиоцезия в наземных экосистемах ранее не проводились, и однозначной оценки данной гипотезы получено не было. Различными исследователями в ряде случаев отмечалась достаточно хорошая сходимость данных по распределению в растительности калия и радиоцезия (укажем для примера: Sombre et al., 1994; Yoshida, Muramatsu, 1999), однако отмечалось и значительное расхождение (например: Сельскохозяйственная ра-

диоэкология, 1992; Bunzl et al., 2000). Таким образом, требовалось уточнить, насколько правомочно использовать накопленные сведения о поведении калия для создания алгоритма имитационной модели и объяснения закономерностей поведения радиоцезия. С этой целью нами проводилась проверка гипотезы наличия аналогии в поведении калия и радиоцезия в растениях с привлечением данных гамма-спектрометрического анализа проб растительности и результатов численных экспериментов на имитационной модели.

На первом этапе был проведен сравнительный анализ распределения калия (его стабильного и радиоактивного изотопов ^{39}K и ^{40}K) и радиоцезия (^{134}Cs и ^{137}Cs) по основным компонентам различных видов древесных растений (ассимилирующих органов – листьев и хвои, древесины и коры ствола, ветвей, корней). В качестве источников исходной информации использовались: созданная ранее по результатам собственных исследований 1986 – 1995 гг. база данных по загрязнению компонентов растительного покрова радиоцезием чернобыльского выброса, результаты дополнительных гамма-спектрометрических измерений законсервированных проб на более чувствительной аппаратуре и ряд литературных данных отечественных и зарубежных исследователей.

До начала проведения анализа исходные данные были подвергнуты предварительной отбраковке, в расчет принимались только те данные, для которых искажающее влияние наружного загрязнения было минимальным. Это были результаты измерений проб растительности, произрастающей в условиях повышенного увлажнения (аккумулятивный ландшафт) и на участке с крупнодисперсными выпадениями. В обоих случаях, определяющим путем поступления радиоцезия для рассматриваемого периода было корневое поступление, которое намного превышало остатки первоначального поверхностного загрязнения. В итоге, было отобрано и проанализировано 9 выборок объемом от 10 до 12 значений. Коэффициенты парной корреляции между содержанием ^{40}K и изотопов радиоцезия (^{137}Cs , ^{134}Cs) в компонентах древесной растительности разных видов (сосна, береза, дуб) варьируют в интервале от 0,61 до 0,88 (среднее арифметическое значение 0,75) при достоверном отличии от нуля.

Полученные нами результаты позволяют, как нам кажется, утверждать о наличии прямой аналогии в поведении в древесной растительности калия и радиоцезия (в квазиравновесном состоянии, когда абсолютное содержание радиоцезия в компонентах меняется только в результате радиоактивного распада).

Поскольку важнейшими компонентами наземных экосистем являются почва и растительный покров, перераспределение радиоцезия между ними является процессом, определяющим скорость круговорота радиоцезия в экосистеме в целом. В рамках настоящей работы был проведен анализ изученности зависимости биологической доступности радиоцезия от различных почвенных факторов и проведены собственные исследования в этом направлении

с использованием статистических методов с привлечением как собственных данных, так и опубликованных данных различных авторов. Использовались данные по травянистым растениям и сельскохозяйственным культурам. Была выявлена неоднозначность влияния этих факторов для различных типов почв. Однонаправленная линейная корреляция с биологической доступностью радиоцезия была обнаружена только для содержания в почве обменного калия, причем в большинстве случаев коэффициент корреляции недостоверно отличался от нуля.

Также был проведен анализ подходов к формальному описанию данной зависимости, который показал, что современные разработки в этой области, в первую очередь, из-за недостатка исходной информации, до сих пор находятся в начальной стадии изысканий. В связи с этим нами предложено решение задачи воспроизведения биологической доступности радиоцезия на различных уровнях детализации, в соответствии с наличием конкретной информации по данным почвам. В первом приближении биологическая доступность может описываться как функция времени, специфичная для различных типов почв, отражающая закрепление ^{137}Cs почвенно-поглощающим комплексом этих почв. Следующими шагами может быть последовательное включение в эту функцию учета интегрированных показателей, отражающих сочетанное влияние ряда почвенных факторов. Результаты наших полевых исследований в лесных экосистемах (Мамихин, Тихомиров, Щеглов, 1994; Mamikhin, Tikhomirov, Shcheglov, 1997), которые согласуются с данными ряда других исследователей, показали, что таким показателем является гидроморфность ландшафта, и биологическая доступность радиоцезия хорошо описывается двухпараметрическим уравнением вида:

$$f(t, h) = a * BT(t) * BH(h) * S(t) ,$$

где a – коэффициент максимальной биологической доступности ^{137}Cs для данного типа почв, BT – функция зависимости биологической доступности от времени, прошедшего с момента выброса, принимающая значения в интервале от 0 до 1, BH – функция зависимости биологической доступности от гидроморфности ландшафта, принимающая значения от 1 – для автоморфных ландшафтов до 4 – для гидроморфных, а S – содержание радиоцезия в почве.

Следующим шагом в наших исследованиях была попытка интерпретации с позиций формального и физиологического подходов механизмов перераспределения радионуклида внутри древесных растений в течение года на основе данных по сезонной (внутригодовой) динамике содержания радиоцезия в компонентах древостоя и потоков данного радионуклида между ними, уточнение параметров многолетней динамики радиоцезия в лесных биогеоценозах в нестационарном и квазиравновесном состояниях (когда абсолютное содержание радиоцезия в компонентах меняется только в результате радиоактивного распада) – в первую

очередь величины потоков радионуклида между почвой и растительностью, в том числе в условиях варьирования от года к году метеорологических показателей, а в последствии, и глобального изменения климата.

Для проведения численных экспериментов по изучению поведения радиоцезия в лесной экосистеме и получения информации о параметрах его круговорота была разработана и реализована программно первая версия имитационной модели поведения радиоцезия в лесной экосистеме с развитым древесным ярусом. Нами была адаптирована к целям исследования уже имеющаяся модель почасовой динамики органического вещества экосистемы широколиственного леса (Мамихин, 2003). Модель состоит из 7 блоков, воспроизводящих метеорологические условия, поступление солнечной радиации на растительный покров, гидрологический и температурный режимы почвы, динамику запасов углерода в компонентах древесного и травянистого ярусов и в почве.

Был организован расчет и передача в радиоэкологический модуль необходимых для его работы данных по запасам углерода, интенсивности опада и дыхания, по скорости прохождения фенологического цикла. Радиоэкологический модуль был разработан на базе созданных нами ранее моделей многолетней динамики радиоцезия (Мамихин, 2003) с существенным пересмотром алгоритма, с введением в него новых правил перераспределения и дополнительного потока f_{Y2SW} (вымывание радиоцезия из листьев). В частности, в данной версии полагается, что из почвы радиоцезий поступает в компоненты не напрямую, а через так называемый распределительный пул, из которого и происходит дальнейшее его перераспределение по компонентам.

Топологическая структура модуля представлена на рис. 1. В модуле воспроизводится с шагом в одни сутки динамика содержания калия и радиоцезия в компонентах древостоя и почве. Работа с моделью показала достаточность такого шага для целей исследования на данном этапе.

Алгоритм построения радиоэкологического модуля, отражающий основные составные механизма поведения радиоцезия в лесной экосистеме, характеризуется следующим:

- Предполагается, что поведение ^{137}Cs в растительном покрове подчиняется тем же закономерностям, что и поведение калия.
- Динамика радиоцезия в растительности рассматривается в связи с динамикой фитомассы.
- Содержание ^{137}Cs в растительности подразделяется на две части (наружное и внутреннее загрязнение), динамика которых рассматривается отдельно. Критерием такого разделения является путь поступления радионуклида в структурную часть растения. Внутреннее загрязнение обусловлено поступлением радионуклида в растение из почвы через корневую

систему или из других частей растения в результате перераспределения. Наружное загрязнение обусловлено только прямым попаданием радионуклида на поверхность надземной части растения.

– Ведущим фактором, обуславливающим характер поведения радионуклида в системе “почва – растительный покров”, является увлажненность экотопа.

– Радиоцезий, в силу своей подвижности, постоянно перемещается по растению в соответствии с потребностями тех или иных тканей, слагающих компоненты растения.

Функции и параметры были определены с помощью самой модели с использованием метода последовательных приближений (итераций) на основе данных по многолетней динамике содержания радиоцезия в компонентах лесных экосистем с различной степенью увлажнения (Мамихин, Тихомиров, Щеглов, 1994; Mamikhin, Tikhomirov, Shcheglov, 1997).

Проверка работы модели проводилась по данным о распределении по компонентам древостоя глобального ^{137}Cs (Van Voris et al., 1990) (табл. 1).

Табл. 1 Распределение ^{137}Cs между надземными компонентами древостоя, %

| Компонент: | Оак–Ридж (Van Voris et al., 1990) | Модель (30 лет) |
|------------|-----------------------------------|-----------------|
| листья | 2.7 | 3.3 |
| ветви | 22.6 | 29.7 |
| ствол | 74.7 | 67 |

Уточнение априорных предположений о формальном механизме поведения радиоцезия в двух основных подсистемах лесной экосистемы – в почве и древесной растительности и количественное определение роли их компонентов в круговороте этого радионуклида проводились в ходе численных экспериментов с моделью путем модификации алгоритма до достижения адекватности результатов расчетов с данными по многолетней динамике содержания радиоцезия в компонентах лесной экосистемы элювиального ландшафта, полученными в результате исследования чернобыльских выпадений, с учетом экспериментальных данных по внесению радиоцезия в растения.

На рис. 2 представлено воспроизведение моделью сезонной динамики удельной активности компонентов древостоя приводораздельной дубравы (элювиальный ландшафт) в течение первых 5 лет после выпадений, аналогичных чернобыльским (график построен по данным на конец месяца).

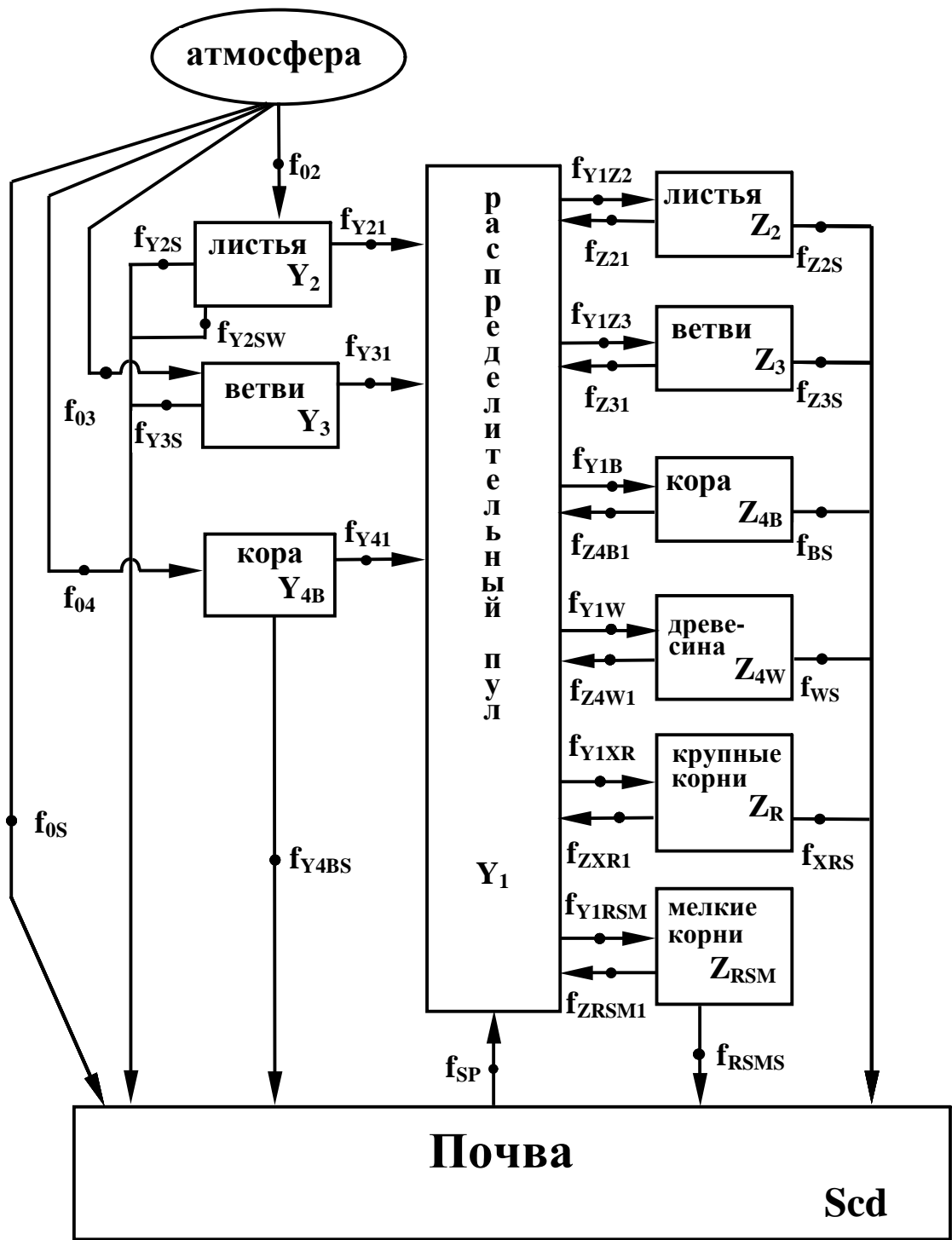


Рис. 1 Поточная диаграмма динамики ^{137}Cs в компонентах лиственного леса.

На рис. 3 приведена динамика интенсивности потоков в звене "почва - растительный покров" в течение 10 лет после выпадений. По расчетам для данной экосистемы максимальная интенсивность поступления радиоцезия в растительный покров составляет 0,53, а максимальная интенсивность выведения его из растительного покрова – 1,83 % от суммарного загрязнения в год, что в несколько раз превышает наши прежние оценки, полученные с помощью модели многолетней динамики радиоцезия в экосистеме того же типа, которые составляли 0,15 и 0,14 % соответственно (Мамихин, 2003).

В принципе этого и следовало ожидать, поскольку при шаге расчетов в 1 год, который использовался в модели многолетней динамики, эти, взаимнокомпенсирующие друг друга, процессы полностью учесть невозможно. Аналогичные показатели были получены и для других потоков перераспределения радиоцезия в рассматриваемой экосистеме.

Нами был проведен сравнительный анализ количественной информации по интенсивности потоков, полученной с помощью модели. Результаты анализа позволяют заключить, что на данном этапе наших исследований динамики радиоцезия в почве и растительном покрове экосистемы лиственного леса, подвергшейся загрязнению мелкодисперсными радиоактивными загрязнениями, можно выделить, как ведущие, следующие процессы:

- поступление радионуклида из атмосферы на наружные ткани ассимилирующих органов и коры,
- поглощение радионуклида корнями из почвы,
- естественная дезактивация надземной части фитоценоза, то есть самоочищение растительности при опадении листьев, хвои, веток, генеративных органов, отшелушивании наружных слоев коры, вымывании атмосферными осадками, стряхивании радиоактивных частиц птицами или при сильном ветре,
- транслокация радиоцезия, поступившего из атмосферы на наружные ткани ассимилирующих органов и коры или из почвы в корни, и дальнейшее его перераспределение между компонентами растительности,
- поступление радионуклида в почву в результате прижизненных корневых выделений и отмирания корней,
- абиогенная миграция радионуклида в почве при диффузии, лессиваже и с водным потоком,
- биогенная почвенная миграция радиоцезия, включающая в себя перемещение в почвенном профиле в результате жизнедеятельности грибов, корней растений и почвенной мезофауны.

На рис. 4 представлены результаты расчета динамики вклада компонентов древостоя в общее загрязнение экосистемы радиоцезием. Очевидно, что роль древостоя, как депо радио-

цезия в экосистеме широколиственного леса (в нашем случае – снытевой дубравы) имеет выраженную динамику во времени, характеризующуюся двумя тенденциями. С одной стороны, с течением времени наблюдается общее снижение вклада растительного покрова в общее загрязнение экосистемы, связанное с отставанием корневого поступления радиоцезия от процессов самоочищения растительности от наружного загрязнения. С другой стороны, со временем становится все более очевидной роль коры дуба, как более долгосрочного депо радиоцезия наружного поступления, по сравнению с другими компонентами древостоя.

В ходе численных экспериментов с моделью добиться ее устойчивого поведения и наиболее полного согласия с данными, по которым проводилась калибровка, удалось только при включении в алгоритм модели следующих правил поведения радиоцезия в растительности:

- подвижность радиоцезия в растительности, которая выражается в интенсивности его отчислений из компонентов растений в распределительный пул, тесно зависит от общей биологической активности растения, т.е. от фенологической стадии в которой находится растение;

- ежесуточное поступление радиоцезия из почвы в растения происходит пропорционально содержанию К в приросте;

- резкое падение уровня загрязнения растительности в первые 1 – 2 года обеспечивается, помимо опада, интенсивными процессами вымывания радиоцезия из листьев и корневыми выделениями.

Данные правила могут служить дополнительными характеристиками механизма поведения радиоцезия в экосистеме.

Если возвратиться к нашим исследованиям аналогии в поведении К и радиоцезия, следует отметить, что в первые 5 – 10 лет динамика содержания ^{137}Cs даже во внутренних тканях деревьев, защищенных от наружного загрязнения, отличается от динамики содержания К, поскольку радиоцезий, содержащийся в компонентах, подвергшихся наружному загрязнению, продолжает проникать во внутренние ткани и перераспределяться таким образом, что соотношения удельной активности рассматриваемых компонентов по радиоцезию, отмеченные для квазистационарного состояния, не соблюдаются.

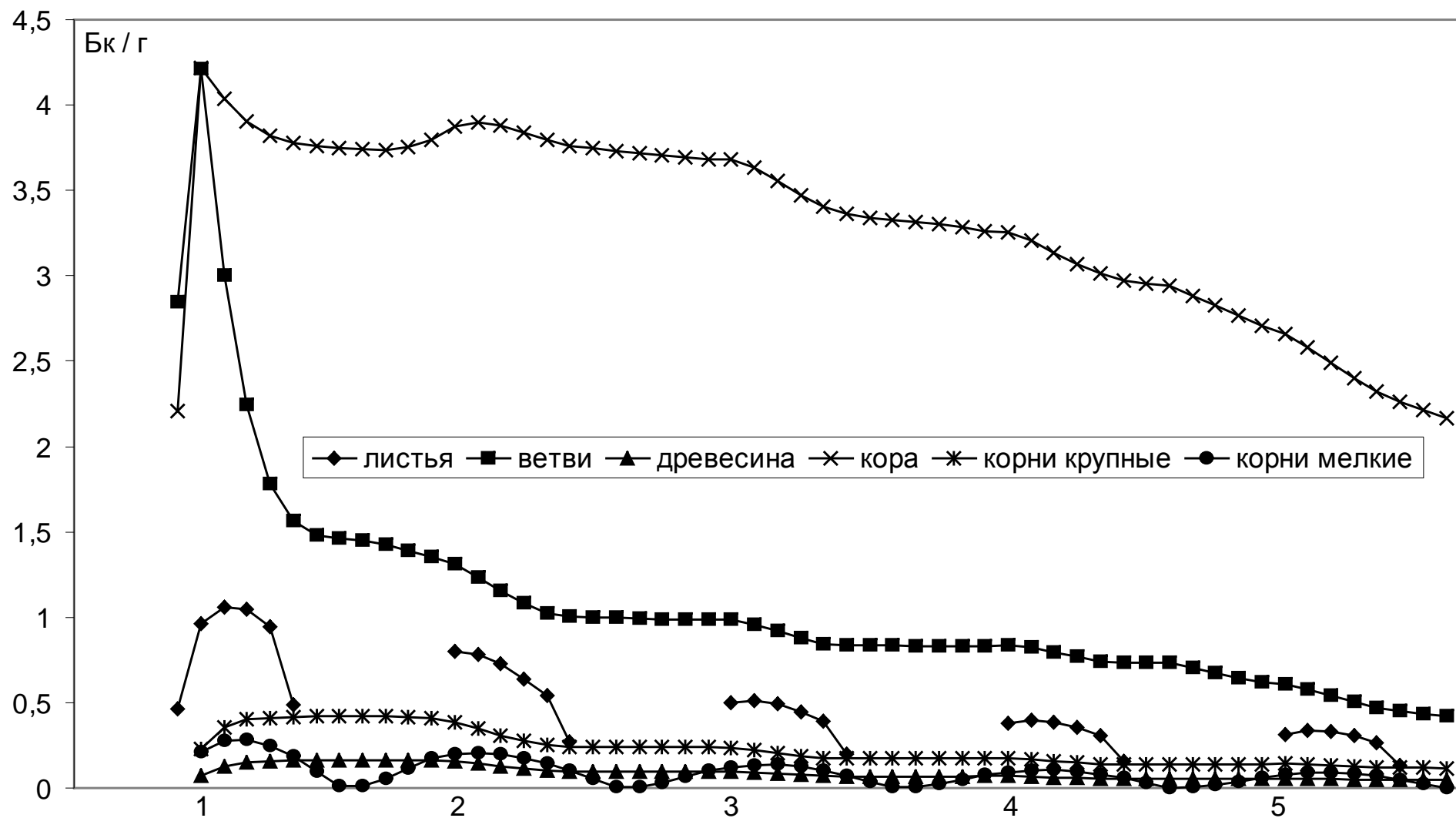


Рис. 2 Сезонная динамика удельной активности компонентов дуба в течение первых 5 лет после выпадений

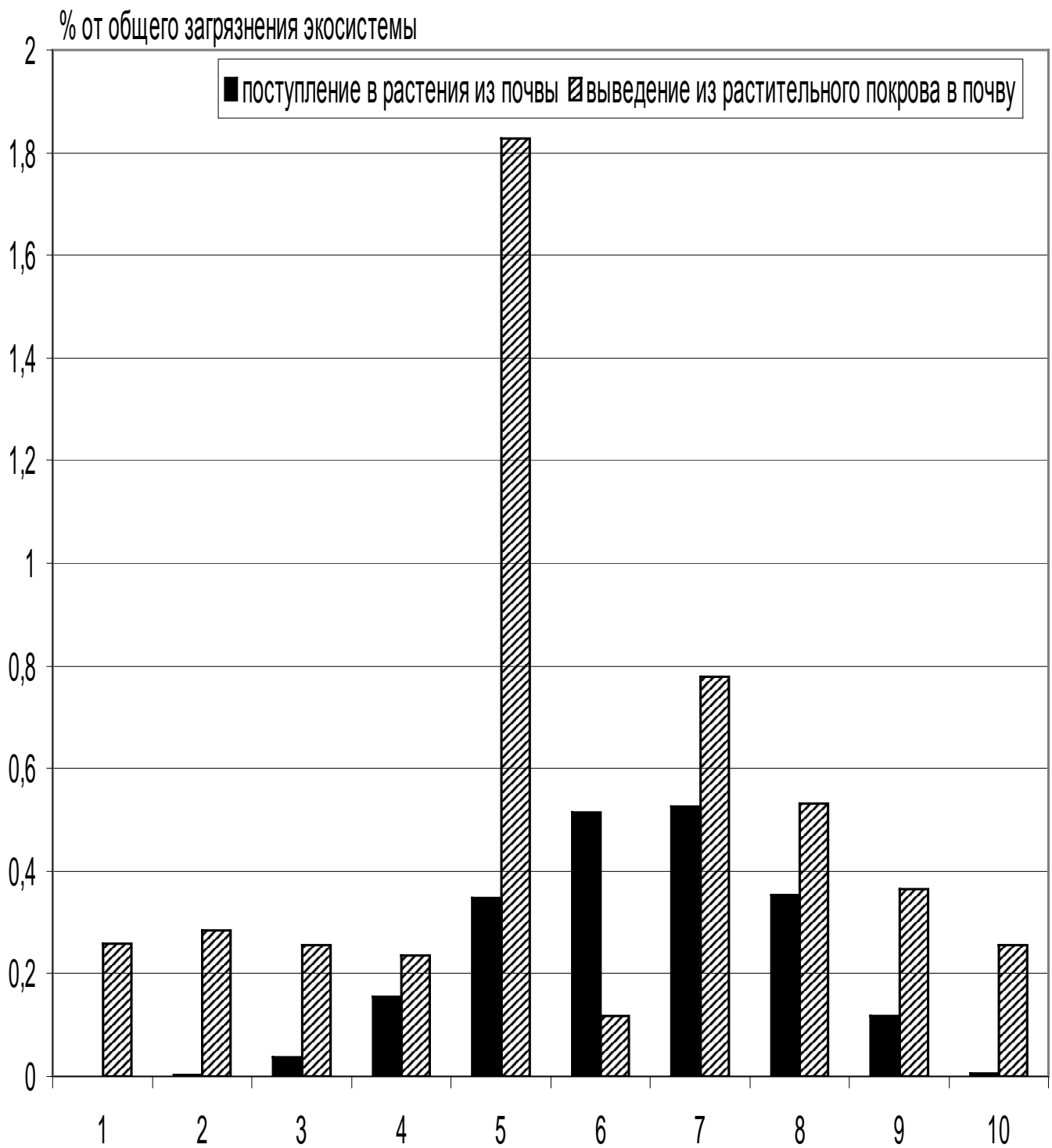


Рис. 3 Динамика интенсивности потоков в звене "почва - растительный покров" в течение 10 лет.

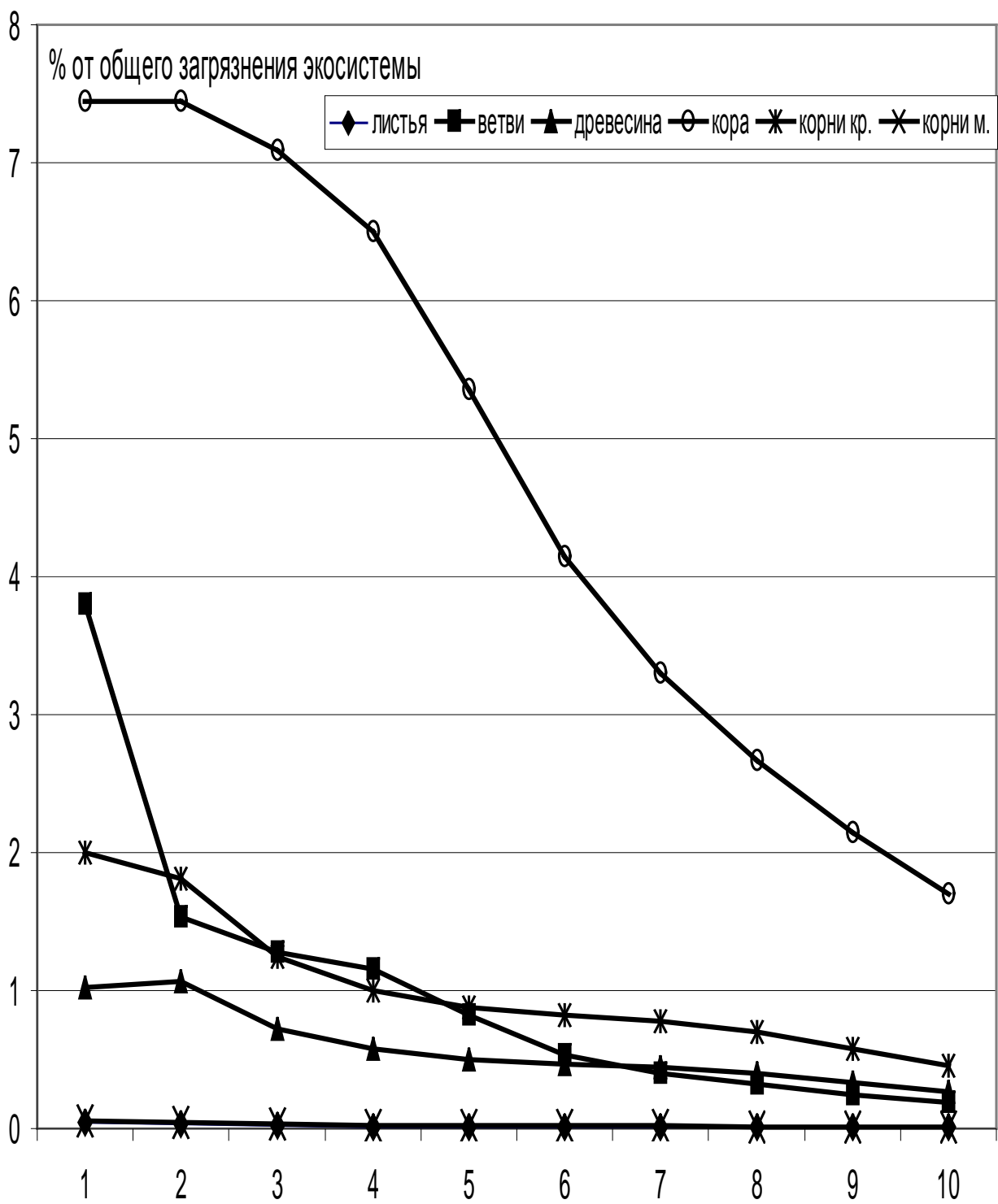


Рис. 4 Динамика содержания Cs-137 в растительности (% от общего загрязнения) в течение 10 лет.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенной работы получено количественное подтверждение гипотезы адекватности поведения калия и радиоцезия (в квазистационарном состоянии) в разных видах древесной растительности. Также получены более точные количественные характеристики круговорота радиоцезия в лесной экосистеме путем суммирования посуточных потоков радионуклида между компонентами экосистемы, в частности, дана предварительная оценка интенсивности его перераспределения между растительным покровом и почвой. На основе этих уточненных количественных характеристик предложена более адекватная, по сравнению с более ранними представлениями, интерпретация механизма поведения радиоцезия в лесной экосистеме.

Разработан принципиально новый алгоритм отображения сезонной динамики радиоцезия в наземных экосистемах. Алгоритм положен в основу имитационной модели поведения радиоцезия в лесной экосистеме широколиственного леса, которая воспроизводит посуточную динамику содержания этого радионуклида в компонентах древостоя с учетом фенологического цикла, метеопказателей, гидрологического и температурного режима почвы. Численные эксперименты с данной моделью позволили нам получить более точные оценки интенсивности потоков между компонентами лесной экосистемы и предложить на основе этих оценок более обоснованную интерпретацию формальных механизмов круговорота радиоцезия, чем предлагавшиеся ранее, с выходом на физиологический уровень. Таким образом, удалось использовать метод имитационного моделирования не только в традиционном прогностическом аспекте, но и для объяснения некоторых процессов и параметров изучаемых явлений.

Полученные результаты следует считать предварительными, поскольку в процессе отработки алгоритма модели были выявлены некоторые существенные аспекты поведения радиоцезия, по поводу которых не удалось пока найти однозначных объяснений, например, о действительной роли корневых систем в круговороте радиоцезия и о степени влияния динамики форм содержания радиоцезия в почве на его биологическую доступность. Мы надеемся получить ответ на эти и другие еще невыясненные вопросы в ходе дальнейших исследований.

Библиографический список

1. Мамихин С.В., Тихомиров Ф.А., Щеглов А.И. Динамика содержания ^{137}Cs в лесных биогеоценозах, подвергшихся радиоактивному загрязнению в результате аварии на Чернобыльской АЭС. Экология, 1994, 2, с.43 - 49.
2. 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.

3. Bunzl K., Albers B.P., Schimmack W., Belli M., Ciuffo L., Menegon S. Examination of a relationship between ^{137}Cs concentrations in soils and plants from alpine pastures // Journal of Environmental Radioactivity, 48 (2000), pp. 145- 158.

4. Mamikhin S.V., Tikhomirov F.A., Shcheglov A.I. Dynamics of ^{137}Cs in the forest of the 30-km zone around the Chernobyl nuclear power plant. //The Science of the Total Environment, 193 (1997), pp. 169 - 177.

5. Sombre L., Vanhouche M., de Brouwer S., Ronneau C., Lambotte J.M., Myttenaere C. Long-term radiocesium behaviour in spruce and oak forests //The Science of the Total Environmental, 157 (1994), pp. 59-71

6. Yoshida S., Muramatsu Y. Use of stable elements for predicting radionuclide transport. In: Contaminated Forests - Recent Developments in Risk Identification and Future Perspectives, Eds. I. Linkov and W. Schell, NATO Science Series 2. Environmental Security, Vol. 58, 1999, pp. 41 - 49.