

РАДИОЭКОЛОГИЯ

УДК 574.4+631.438.2

**СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ^{137}Cs , ^{90}Sr
И ИХ ХИМИЧЕСКИХ АНАЛОГОВ В КОМПОНЕНТАХ
НАДЗЕМНОЙ ЧАСТИ ДРЕВЕСНЫХ РАСТЕНИЙ
В КВАЗИРАВНОВЕСНОМ СОСТОЯНИИ**

© 2008 г. С. В. Мамихин*, Д. В. Манахов, А. И. Щеглов

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Факультет почвоведения, Москва

Проведены исследования распределения радиоактивных изотопов цезия и стронция и их химических аналогов в древостое лесных экосистем. По результатам исследований и анализа литературных данных подтверждено наличие аналогии в распределении этих элементов по компонентам в квазиравновесном (относительно радионуклидов) состоянии. Обсуждается вопрос о правомочности использования данных о поведении К и Са при объяснении механизмов перераспределения ^{137}Cs и ^{90}Sr в древесных растениях и для построения математических моделей поведения данных радионуклидов в наземных экосистемах.

Радиоэкология, радиоактивное загрязнение, ^{137}Cs , ^{90}Sr , калий, кальций, древостой, математические модели.

Лесные экосистемы с радиоэкологической точки зрения всегда были и остаются очень сложным объектом изучения. Хотя исследование поведения радионуклидов в лесных экосистемах с развитым древесным ярусом ведется уже много лет, количественные закономерности перераспределения радионуклидов в растительном и почвенном покрове таких экосистем на территориях, подвергшихся радиоактивному загрязнению, до сих пор изучены, по нашему мнению недостаточно, в частности, для выяснения механизмов поведения радионуклидов и построения адекватных математических моделей этих процессов. Имеющиеся оценки имеют весьма приблизительный характер, и объяснение многих аспектов поведения радионуклидов в лесных экосистемах основано на информации качественного характера. Одной из возможностей уточнить эти механизмы и получить более надежную количественную информацию может служить привлечение материалов по биологическому круговороту химических аналогов радионуклидов. Поскольку предметом наших исследований являются ^{137}Cs и ^{90}Sr и их поведение в древесных растениях, нас в первую очередь интересовало насколько похоже ведут себя в растительном покрове эти радионуклиды и их химические аналоги – калий и кальций. Априори следовало ожидать аналогий в их поведении, однако предварительное изучение литературных источников показало, что имеющиеся на момент

начала наших исследований фактические данные, полученные различными исследователями, и их точки зрения по интересующему нас вопросу не всегда совпадают.

Литературный поиск показал, что преобладают высказывания в пользу существования прямой аналогии в поведении радионуклидов и их химических аналогов в растениях [1–4]. Однако опубликованных результатов целенаправленных исследований по этому поводу с проведением статистического анализа и определением корреляционных зависимостей найти не удалось. В то же время в литературе встречались и противоречащие этому фактические данные [5] и более скептические мнения по этому поводу (см, например, [6]). В связи с этим нами были проанализированы накопленные данные предыдущих лет и проведены дополнительные исследования в данном направлении с целью получения более определенной оценки гипотез наличия или отсутствия аналогии в поведении ^{137}Cs : ^{90}Sr и их химических аналогов К и Са соответственно в древостое, а также для получения исходной информации, необходимой для построения и дальнейшего развития имитационных моделей поведения ^{137}Cs и ^{90}Sr в лесных экосистемах.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДИКА

Объектами исследований послужили деревья трех основных видов древесной растительности, а именно: березы бородавчатой (*Betula pendula* Roth, 1788, syn. *Betula verrucosa* Ehrhart, 1791), дуба

*Адресат для корреспонденции: 119992 Москва, Воробьевы Горы, МГУ им. М.В. Ломоносова, факультет почвоведения; тел.: (495) 939-50-09; e-mail: svmamikhin@mail.ru

черешчатого или обыкновенного (*Quercus robur* Linnaeus, 1753) и сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* Linnaeus, 1753), широко представленных на территории СНГ, подвергшейся радиоактивному загрязнению в результате аварии на Чернобыльской АЭС. Отбор проб проводили в Тульской, Брянской и Киевской областях. Подробное описание участков, где проводили отбор проб, методики отбора и обработки образцов приведено в монографии Щеглова [7].

Здесь укажем, что отбор проб структурных компонентов надземной фитомассы дуба проводили по оригинальной методике мониторинговых системных наблюдений за поведением радионуклидов в лесных биогеоценозах, разработанной в лаборатории радиоэкологии (с 2006 г. кафедры радиоэкологии и экотоксикологии) факультета почвоведения МГУ им. М.В. Ломоносова. Модельные деревья выбирали по результатам предварительно проведенного лесотаксационного описания. Затем их спиливали и разделяли на следующие структурные части: листва, ветви крупные и мелкие – равномерно по кроне. Кору наружную (мертвые покровные ткани, кутикула, эпидерма, пробка) и внутреннюю (флоэма или луб), древесину (в целом и с последующим разделением на заболонь и ядро) отбирали на разной высоте ствола – у комля, в середине и вершине. Пробы измельчали, высушивали до абсолютно сухого состояния при температуре 105°C и размывали на мельнице до однородной массы.

Для проведения сравнительного анализа использовали уже опубликованные ранее результаты наших предшествующих исследований 1986–1995 гг. [8–10], накопленные в базе данных радиоэкологической информационно-прогностической системы ЭКОРАД [10], данные других исследователей из литературных источников, а также материалы наших более поздних работ, представленные в настоящей статье.

Поскольку собственных исследований по изучению содержания К и Са в компонентах древостоя мы не проводили, то в качестве источника данной информации мы использовали вполне исчерпывающие материалы по древесной растительности Припятского заповедника [11], непосредственно граничащего с большинством территорий, на которых проводились наши исследования.

В связи с необходимостью получить данные для калибровки имитационной модели поведения ^{137}Cs и ^{90}Sr в экосистеме широколиственного леса дополнительным объектом исследования был выбран дуб, произрастающий в Тульской области на оподзоленном тяжелосуглинистом черноземе на территории, подвергшейся в результате аварии на Чернобыльской АЭС мелкодисперсному радиоактивному загрязнению с преобладанием газоаэрозольной составной. В данном случае при

работе с образцами, предназначенными для измерения, использовали методику, направленную на получение максимально надежной информации. В дополнение к методике более ранних исследований образцы в процессе подготовки к измерению подвергали частичному озолению для повышения активности радионуклидов в счетных образцах.

Измерение активности радионуклидов в счетных образцах проводилось на спектрометрическом комплексе “Прогресс-БГ”, выполненном на базе сцинтилляционного детектора NaI 63 × 63 (для γ -излучающих) и сцинтилляционного пластикового детектора диаметром 70 мм (для β -излучающих радионуклидов).

Статистическую обработку данных производили с помощью пакета математической статистики STADIA. Оценку гипотез осуществляли проверкой наличия линейной корреляции между парными переменными. Вычислялся коэффициент корреляции r Пирсона со статистикой Стьюдента и уровнем значимости P нулевой гипотезы “ $r = 0$ ”. При $P > 0.05$ коэффициент может быть признан незначимым. Использованный метод расчета позволяет обрабатывать парные выборки с равным объемом, содержащих не менее четырех чисел.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Для получения данных, необходимых для разработки модели поведения радионуклидов в древостое дубрав, нами были проведены исследования загрязнения компонентов дуба интересующими нас техногенными радионуклидами и ^{40}K (табл. 1).

Отметим сильное загрязнение коры наружной оболочки радионуклидами. Без сомнения, это остатки первоначального внешнего загрязнения, поскольку соотношение ^{137}Cs к ^{90}Sr составляет 6–10 к 1, что близко к их содержанию в выпадениях 1986 г. При корневом пути поступления эти радионуклиды накапливаются примерно в равном соотношении (как это видно по загрязнению листвьев и древесины) или даже баланс больше склоняется в сторону ^{90}Sr (например для коры внутренней). Это можно объяснить более высокой биологической доступностью радиостронция, содержащегося в почве.

Для того чтобы информацию по распределению радионуклидов в компонентах дерева можно было сравнить с данными по содержанию стабильных изотопов К и Са из литературных источников, непосредственные результаты измерений были усреднены (табл. 2).

Поскольку кора ствола до сих пор сохраняет остатки наружного загрязнения, данные по коре при проведении статистического анализа были

Таблица 1. Непосредственные результаты измерений, приведенные к дате отбора проб в 2001 г., на кг абс. сухого веса

Компоненты	^{137}Cs		^{40}K		^{90}Sr	
	Бк/кг	ошибка измерения, %	Бк/кг	ошибка измерения, %	Бк/кг	ошибка измерения, %
Древесина						
Комель	8.82	16.7	47.96	19.6	4.3	20.0
Середина	6.38	21.3	30	28.1	3.1	28.2
Вершина	4.09	24.6	55.9	21.2	3.0	26.0
Кора внутренняя						
Комель	14.71	21.5	96.7	12.8	97.9	12.5
Середина	18.1	25.3	143.7	12.9	84.7	12.8
Кора наружная						
Комель	508.1	10.7	76.6	13.0	81.4	12.6
Середина	2272	10.6	60.8	11.6	229.4	12.3
Прочие компоненты						
Кора, вершина	16	18.9	96.7	22.3	58.6	20.3
Ветки крупные	20.0	15.9	89.8	14.1	27.8	14.7
Ветки мелкие	12.8	18.7	83.8	15.9	25.4	19.4
Листья	33.0	19.4	254.8	27.9	23.4	26.9

Таблица 2. Усредненные данные по загрязнению компонентов надземной фитомассы дуба и удельное содержание в них стабильных К и Са

Компоненты	^{137}Cs	^{40}K	K*	^{90}Sr	Ca*
	Бк/кг	Бк/кг	% сухого вещества	Бк/кг	% сухого вещества
Древесина	6.34	44.6	0.096	3.47	0.222
Кора	474	95.2	0.205	101	2.0
Ветки крупные	19.9	120.2	0.213	27.8	1.37
Ветки мелкие	12.7	68.7	0.291	25.4	1.4
Листья	32.8	255	0.923	23.4	0.89

* Данные по Припятскому заповеднику [11].

удалены из выборки. После этого были получены следующие коэффициенты парной корреляции:

$$^{137}\text{Cs}/\text{K} = 0.96; \ ^{137}\text{Cs}/^{40}\text{K} = 0.98; \ ^{90}\text{Sr}/\text{Ca} = 0.95.$$

Для всех коэффициентов $P < 0.05$. Таким образом, налицо высокая степень корреляции между содержанием радионуклидов ^{137}Cs и ^{90}Sr и их химических аналогов К и Са соответственно в компонентах дуба черешчатого. Отметим здесь, что для пары $^{90}\text{Sr}/\text{Ca}$ столь же высокую корреляцию (0.96 при $P < 0.05$) наблюдали по нашим расчетам у деревьев дуба в данном регионе уже в 1991 г. Еще более высокую корреляцию наблюдали в данном месте у березы. В табл. 3 представлены результаты корреляционного анализа для трех

основных видов древесной растительности, произрастающей на территории, подвергшейся интенсивному загрязнению в результате аварии на ЧАЭС. В целом в 1991 г. у лиственных пород в отличие от сосны достаточно высокая корреляция для пары $^{90}\text{Sr}/\text{Ca}$ наблюдалась по всем исследованным участкам.

Добавим, что аналогичную работу мы проводили по результатам исследований загрязнения компонентов растительного покрова 30-км зоны аварии ЧАЭС в 1986–1995 гг. ^{137}Cs [12]. Был осуществлен сравнительный анализ распределения калия (его стабильного и радиоактивного изотопов ^{39}K – ^{40}K) и ^{134}Cs – ^{137}Cs по основным компонентам различных видов древесных растений. В ка-

Таблица 3. Коэффициенты корреляции между содержанием ^{90}Sr и Са в компонентах древостоя (отбор 1991 г.)

Участок	Береза		Дуб		Сосна	
	с корой	без коры	с корой	без коры	с корой	без коры
Пл1	–	–	–	–	0.83	0.95
Пл2	0.85	1.0	0.81*	0.96	–	–
Кл1	–	–	–	–	0.75*	0.9
Кл2	0.82	0.91*	0.88	0.89*	0.78	0.9
Зл1	0.56*	0.89*	0.88	0.91	0.5*	0.55
Д1	0.92	0.99	0.94	0.89*	0.5*	0.57*
Д3	0.86	0.9*	0.61*	0.99	0.6*	0.5*
К2	–	–	–	–	0.45*	0.17*
Ш1	–	–	0.67*	0.9*	0.57*	0.44*
Ш5	–	–	–	–	0.72*	0.94

* $P > 0.05$.

честве источника исходной информации также использовали созданную ранее базу данных. До начала проведения анализа исходные данные были подвергнуты предварительной отбраковке. В расчет принимали наиболее поздние данные и только те, 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) варьировали в интервале от 0.61 до 0.88 (среднее арифметическое значение 0.75) при достоверном отличии от нуля.

Для того чтобы сопоставить полученные нами результаты с независимыми данными, была предпринята попытка отыскать исходную информацию других исследователей по содержанию радиоцезия и калия, радиостронция и кальция в компонентах древесных растений и проанализировать их. К сожалению, доступных нам данных, в должной степени отвечающих целям исследований, т.е. когда присутствовали результаты анализа на удельную активность и самих радионуклидов и их химических аналогов в компонентах одного и того же объекта, оказалось мало. В качестве примера материала, наиболее отвечающего целям нашего исследования, приводим дан-

ные по радиоактивному загрязнению древостоя дубравы в Ирландии [13], которые свидетельствуют в пользу гипотезы о наличии аналогии в поведении радиоцезия и калия (табл. 4). Коэффициент корреляции между удельной активностью ^{137}Cs и ^{40}K , рассчитанный нами по этим данным, равен 0.67 при достоверном отличии от нуля. Наиболее близкие к целям исследования данные по содержанию ^{90}Sr [14], полученные в ходе исследований на Урале, характеризуют накопление этого радионуклида в 35-летних деревьях березы бородавчатой и сосны обыкновенной (табл. 5).

Коэффициенты корреляции между содержанием Са и удельной активностью ^{90}Sr , рассчитанные нами по этим данным, равны 0.98 и 0.84 для березы и сосны соответственно при достоверном отличии от нуля.

Подтверждают такую зависимость и данные экспериментов по выращиванию сеянцев древесных пород в сосудах с внесением ^{90}Sr [15] (табл. 6), (коэффициенты корреляции из-за слишком ма-

Таблица 4. Загрязнение компонентов древостоя дубрав Ирландии в 1997 г. (дуб скальный, *Quercus petraea Lieblein (Mattuschka)*, возраст – 150 лет, подзолистая почва, первичное загрязнение чернобыльским $^{137}\text{Cs} – 6.73 \text{ Бк}/\text{м}^2$)

Компоненты	^{137}Cs	^{40}K
	Бк/кг	
Почки	5	93
Листья	57	447
Черешки	20	170
Ветви	14	105
Ствол	6.6	10
Корни	58	113

Таблица 5. Накопление ^{90}Sr в компонентах древесной растительности (в расчете на плотность загрязнения почвы в 1 мКи/м²)

Компоненты	Листья, хвоя	Кора внутренняя	Древесина	Ветви мелкие	Ветви крупные	Кора наружная
Береза						
Са, мг/г в.с.в.	12	9.6	0.72	8.2	3.8	0.8
^{90}Sr , пКи/г	21.6	13	1.7	15.5	6.4	1.5
Сосна						
Са, мг/г в.с.в.	7.3	6.8	0.72	2.9	1.7	6.8
^{90}Sr , пКи/г	2.3	4	0.4	2	0.85	2.5

лой величины выборки определить не удалось). Повышенную активность корней можно объяснить задержкой в них ^{90}Sr вследствие метаболических особенностей поведения этого радионуклида в растениях и краткостью срока эксперимента.

Таким образом, если принимать все вышеприведенное, напрашивается вывод о правомочности использования данных о поведении К и Са при объяснении механизмов перераспределения ^{137}Cs и ^{90}Sr в древесных растениях и построении математических моделей поведения данных радионуклидов. Поскольку эти два вопроса во многом тесно связаны, в качестве примера рассмотрим, как можно использовать данные по биологическому круговороту К и Са при построении радиоэкологических имитационных моделей. Включив в модель модуль воспроизведения динамики, например, Са в растениях и исходя из положения об аналогичности поведения этого химического элемента и ^{90}Sr , мы получаем возможность рассчитывать потоки перераспределения ^{90}Sr на основании данных о содержании Са в компонентах, их активности по радионуклиду и относительных величинах перераспределяемого кальция. Нам удалось достаточно успешно использовать такой подход при построении модели многолетней динамики поведения ^{90}Sr в почве и древесном ярусе соснового леса [16]. Алгоритм данной модели был основан в первую очередь на известных закономерностях поведения Са. Она состояла из трех модулей, воспроизводящих динамику запасов органического вещества и кальция в компонентах фитоценоза и динамику содержания ^{90}Sr в компонентах фитоценоза и в почве. Имея два независи-

мых набора данных для калибровки модели и ее проверки, мы смогли опробовать различные подходы и наилучшим оказался именно такой алгоритм. Естественно, что подобная модель позволяет рассчитывать многие интересующие исследователя параметры поведения радионуклида в объекте моделирования, например характеристики его круговорота, интенсивность накопления в компонентах, представленных в модели, интенсивность потоков перераспределения. А на основании таких данных можно формулировать и представления о механизмах поведения радионуклида.

ВЫВОДЫ

С течением времени корреляция между содержанием К и ^{137}Cs в компонентах древесной растительности становится, как правило, все более очевидной вследствие ее очищения от остатков наружного загрязнения.

Представленные в статье данные позволяют оценить специфику поведения ^{137}Cs и ^{90}Sr в дубовом древостое при мелкодисперсных выпадениях. Подтверждена высокая адсорбционная способность наружной части коры дуба (мертвой флоэмы и перидермы) в отношении обоих рассматриваемых радионуклидов при таких условиях выпадения. На загрязненность компонентов дуба черешчатого данными радионуклидами помимо путей их поступления оказывают влияние биологическая доступность радионуклидов и метаболические особенности их распределения в растениях этого вида.

Из результатов исследования можно, как нам кажется, заключить, что с наступлением состояния квазиравновесия в древесных растениях поведение рассмотренных радионуклидов и их химических аналогов имеет очень схожий характер. Это позволяет использовать информацию о поведении К и Са для объяснения механизмов поведения ^{137}Cs и ^{90}Sr соответственно в лесных экосистемах с развитым древесным ярусом и при построении радиоэкологических математических моделей.

Таблица 6. Накопление ^{90}Sr в компонентах сеянцев сосны

Компоненты	^{90}Sr (10^{-3} КИ/г. в.с.в.)	Са (%)	Sr (10^{-3} %)
Хвоя	1.2	0.41	2.7
Стволик	0.31	0.32	2.4
Корни	0.47	0.28	2.2

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Myttenaere C., Schell W.R., Thiry Y. et al.* // Sci. Total Environ. 1993. V. 136. P. 77–91.
2. *Sombre L., Vanhouche M., de Brouwer S. et al.* // Sci. Total Environ. 1994. V. 157. P. 59–71.
3. *Yoshida S., Muramatsu Y.* // Contaminated Forests – Recent Developments in Risk Identification and Future Perspectives / Eds I. Linkov, W. Schell, NATO Science. Series 2: Environmental Security. 1999. V. 58. P. 41–49.
4. *Апплби Л.Дж., Девелл. Л., Мишра Ю.К. и др.* Пути миграции искусственных радионуклидов окружающей среды: Радиоэкология после Чернобыля. М.: Мир, 1999. 512 с.
5. *Нарышкин М.А., Алексахин Р.М., Молчанов А.А. и др.* // Лесоведение. 1975. № 4. С. 104–106.
6. *Bunzl K., Albers B.P., Schimmack W., Belli M. et al.* // J. Environ. Radioact. 2000. V. 48. P. 145–158.
7. *Щеглов А.И.* Биогеохимия техногенных радионуклидов в лесных экосистемах: по материалам 10-летних исследований в зоне влияния аварии на ЧАЭС. М.: Наука, 1999. 268 с.
8. *Мамихин С.В., Тихомиров Ф.А., Щеглов А.И.* // Экология. 1994. Т. 2. С. 43–49.
9. *Mamikhin S.V., Tikhomirov F.A., Shcheglov A.I.* // Sci. Total Environ., 1997. V. 193. P. 169–177.
10. *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.
11. Экспериментальные исследования ландшафтов Припятского заповедника. Минск: Наука и техника, 1976. 304 с.
12. *Мамихин С.В., Никулина М.В., Манахов Д.В.* // Проблемы радиоэкологии и пограничных дисциплин / Ред. В.И. Мигунов, А.В. Трапезников. Вып. 6. Заречный, 2005. С. 292–308.
13. *Seymour E.M., Mitchell P.J., Leon Vintro L., Little D.J.* // Contaminated Forests – Recent Developments in Risk Identification and Future Perspectives / Eds I. Linkov, W. Schell, NATO Science: Series 2. Environmental Security. 1999. V. 58. P. 203–215.
14. *Тихомиров Ф.А.* // Проблемы радиоэкологии и биологического действия малых доз ионизирующей радиации. Сыктывкар, 1976. С. 70–85.
15. *Мишенков Н.Н., Алексахин Р.М., Нарышкин М.А., Юланов В.П.* // Лесоведение. 1971. № 2. С. 85–89.
16. *Мамихин С.В., Никулина М.В.* // Радиац. биология. Радиоэкология. 2005. Т. 45. № 4. С. 218–226.

Поступила в редакцию
5.06.2008

The Comparative Analysis of ^{137}Cs , ^{40}K , K, ^{90}Sr and Ca in Allocation Builders of an Ground Part of Wood Plants in a Quasi-Equilibrium Condition

S. V. Mamikhin, D. V. Manakhov, A. I. Shcheglov

Soil Science Faculty, Moscow State University, Moscow, 119992 Russia;
e-mail: svmamikhin@mail.ru

The examinations of allocation of radioactive isotopes of caesium and of strontium and of their chemical analogs in a stand of forest ecosystems are carried out. By results of examinations and analysis of literary data the presence of analogy in allocation of these elements on builders in quasi-balanced (concerning radionuclides) state was confirmed. The question about the opportunity of use of data about behaviour of K and of Ca is considered at an explanation of the mechanisms of redistribution of ^{137}Cs and ^{90}Sr in wood plants and for build-up of mathematical models of behaviour of data of radionuclides in ground ecosystems.