

Рус.: УДК: 574.41.5:539.163

Сравнительный анализ поступления цезия-137 и калия-40 в травянистую растительность на радиоактивно загрязненной территории Тульской области

Парамонова Т. А., Романцова Н. А.

Сравнительный анализ накопления ^{137}Cs и ^{40}K в фитомассе агрофитоценозов полевого севооборота (пшеница, ячмень, картофель), а также природных луговых фитоценозов Плавского радиоактивного пятна Тульской области показал, что величины удельной активности радионуклидов составляют 40—740 Бк/кг и 205—385 Бк/кг соответственно. Для ^{137}Cs ярко выражено накопление в корнях, а ^{40}K равномерно распределен по органам растений с несколько более выраженной аккумуляцией в надземной фракции фитомассы.

Ключевые слова: ^{137}Cs , ^{40}K , радионуклиды, коэффициент накопления, радиоактивное загрязнение, чернобыльская катастрофа, Тульская область.

A comparative analysis of caesium-137 and potassium-40 accumulation in grassy vegetation of the radioactive contaminated territory of Tula region

Paramonova T. A., Romantsova N. A.

Comparative analysis of ^{137}Cs and ^{40}K accumulation in agrophitocaenosis of field crop rotation (wheat, barley, potatoes) and natural meadows of Plavsk radioactive spot (Tula region) showed that the values of the specific activity of radionuclides are 40—740 Bq/kg and 205—385 Bq/kg respectively. ^{137}Cs accumulates mostly in the roots, and ^{40}K is evenly distributed in plant organs with a somewhat larger fraction of accumulation in aboveground phytomass.

Key words: ^{137}Cs , ^{40}K , transfer factor, radioactive contamination of soil, Chernobyl assident, Tula region.

Введение

Ключевым вопросом оценки современной радиозоологической ситуации в районах европейской части России, загрязненных ^{137}Cs вследствие чернобыльской аварии 1986 года, является установление параметров перехода радионуклида в растительность, которая непосредственно употребляется человеком в пищу или используется для скармливания сельскохозяйственным животным, что в конечном итоге вызывает увеличение дозовых нагрузок на население, передаваемых по пищевым цепочкам. Прогнозные оценки показывают, что наиболее пострадавшие в ходе чернобыльской катастрофы земли в пределах Брянской, Калужской, Орловской и Тульской областей будут сохранять свой статус вплоть до середины XXI века, а наиболее пораженные участки в их пределах — до конца столетия [1].

За период, прошедший с 1986 года, в наземных травянистых экосистемах радиоактивно загрязненных территорий сформировались относительно устойчивые биогеохимические циклы ^{137}Cs . При этом перенос ^{137}Cs в системе «почва-растение» определяется рядом факторов, которые можно объединить в группы: 1) физико-химические свойства радионуклида, его кларки и время, прошедшее после его поступления в экосистему, 2) свойства почв территории и особенности их антропогенного использования, 3) биологические особенности растений и 4) общие ландшафтно-климатические особенности местности и погодные условия текущего вегетационного сезона [3, 6, 8, 10 и др.]. Множественность факторов, которые влияют на параметры корневого поглощения радионуклидов, а также сложная причинно-следственная связь между кластерами почвенного и растительного ^{137}Cs определяют трудность прогноза радиозоологического качества сельскохозяйственной продукции на загрязненных землях и важность установления фактических закономерностей перехода радиоцезия в растения.

Одним из важных факторов регуляции корневого потребления ^{137}Cs является содержание в почве доступных растениям форм калия. На антагонизме этих элементов построена система защитных мер по реабилитации пострадавших от радиации сельскохозяйственных угодий, в земли которых рекомендуется вносить повышенные дозы калийных удобрений [3]. В то же время, цезий и калий имеют сходные физико-химические свойства, благодаря чему ^{137}Cs проникает из почвы в клетки корневой системы растения по тем же ионным каналам, что и калий, поэтому эти элементы могут транспортироваться совместно [8]. В целом, доказано, что повышение содержания подвижного калия в почве снижает переход ^{137}Cs в растения, но связь не линейна, и зависит как от потребностей растений в калии, так и от соотношения цезия и калия в почве [6, 10].

Калий является одновременно биофильным, т.е. жизненно необходимым для растений элементом минерального питания, а также литофильным, т. е. преоб-

ладающим в составе минералов и горных пород элементом. Считается, что его естественный радиоизотоп ^{40}K относительно равномерно рассеян в биосфере по отношению к стабильному изотопу ^{39}K и составляет $\approx 0,012\%$ от общего пула калия в природной среде [4]. В этой связи ^{40}K может быть маркером параметров общего распределения калия в системе «почва-растение» а соотношение $^{137}\text{Cs}/^{40}\text{K}$ может характеризовать биологические особенности фитоценозов для корректировки прогноза их радиоактивного загрязнения.

Цель исследования

На основе сравнительной характеристики параметров биогеохимических циклов ^{137}Cs и ^{40}K в травянистых экосистемах европейской части территории России, загрязненной выпадениями продуктов чернобыльской аварии, выявить аналогии и специфику в поведении радионуклидов.

Материал и методы исследования

Сравнительный анализ корневого поглощения техногенного ^{137}Cs и природного ^{40}K проводили на основе натуральных исследований в пределах «Плавского радиоактивного пятна» Тульской области, где плотность поверхностного загрязнения почв радиоцезием после Чернобыльской аварии составляла 5—15 Ки/км². Определение содержания ^{137}Cs и ^{40}K производилось в почвах и растительности агрофитоценозов основных культур полевого севооборота (яровая пшеница сорта Мис, яровой ячмень сорта Нур, картофель Журавлинка), а также в природных луговых фитоценозах злаково-разнотравного суходольного луга (используемого как пастбище) и влажного разнотравно-злакового пойменного луга (травостой которого может подвергаться сенокошению). Агрофитоценозы располагались на возвышенной и относительно выположенной части водораздельной поверхности, природные луга были приурочены к нижним частям склонов и пойме р. Локна. В совокупности участки пробоотбора составляли катену геохимического сопряжения, почвенные компоненты которой были представлены черноземами выщелоченными, типичными и аллювиальными луговыми карбонатными почвами.

Надземную часть фитомассы определяли методом сплошных укусов с площадок 50×50 см, подземную отмывали из монолитов почв с площадью сечения 25×25 см и глубиной 30 см (основной корнеобитаемый слой). Одновременно на каждой площадке отбирались образцы почв с глубины 0—30 см. Все исследования проводились в 4-кратной повторности. Определение содержания ^{137}Cs и ^{40}K в почвах и растительности проводилось на сцинтилляционном гамма-спектрометре с обработкой амплитудного спектра импульсов с помощью программы ПРОГРЕСС.

Результаты исследования и их обсуждение

^{137}Cs в целинных почвах прочно фиксируется поверхностными горизонтами и редко проникает на глубину свыше 5—10 см, в пахотных почвах он относительно равномерно распределяется по мощности пахотного горизонта [3]. Современные уровни удельной активности ^{137}Cs в почвах исследованной части Плавского радиоактивного пятна составляют ~500—1100 Бк/кг, что соответствует плотности поверхностного радиоактивного загрязнения ~200—430 Бк/м² (или 5—12 Ки/км²). При этом величины удельной активности и запасов ^{137}Cs в 30-см слое луговых фитоценозов в 1,5—2 раза больше, чем в пахотных черноземах агрофитоценозов (табл. 1). Природные и полуприродные луга на целинных почвах сохранились на неудобных для сельскохозяйственной обработки участках ландшафта. Они служат конечным звеном миграции веществ, поступающих в составе эрозионного твердого стока с пахотных угодий. Таким образом почвы геохимически подчиненных позиций рельефа на территориях, пострадавших вследствие чернойбыльской аварии, аккумулируют существенно большее количество радиоцезия, и плотность их радиоактивного загрязнения в настоящее время существенно выше, чем у почв водоразделов [7].

Таблица 1 — Величины удельной активности ^{137}Cs и ^{40}K в почвах травянистых фитоценозов Плавского радиоактивного пятна

Показатель	Агрофитоценозы			Фитоценозы	
	пшеница	ячмень	картофель	суходольный луг	влажный луг
^{137}Cs	495	624	537	1121	1039
^{40}K	473	554	513	465	527

В то же время, распределение ^{40}K в системе сопряженных почв ландшафта Тульской лесостепи неспецифично и характеризуется существенно меньшим разбросом величин (89 Бк/кг против 627 Бк/кг для ^{137}Cs), что определяется равномерным рассеянием элемента по природным средам. В общем балансе гамма-излучения, создаваемого в исследуемых почвах ^{137}Cs и ^{40}K , в пахотных черноземах водоразделов соотношение радиоизотопов составляет $\approx 1:1$, а в почвах луговых фитоценозов $\approx 2:1$, что говорит о экологически выраженном участии техногенных радионуклидов в формировании внешней дозы воздействия на биологические объекты.

В условиях повышения плотности радиоактивного загрязнения почв в депрессиях рельефа произрастающая там растительность (с высокой долей участия многолетних видов растений) также отличается повышенным на порядок содержанием ^{137}Cs , но сравнительно мало различающимся уровнями накопле-

ния ^{40}K (табл.2). Диапазон колебания величин удельной активности первого составляет 698 Бк/кг, второго — 181 Бк/кг. Среди сельскохозяйственных культур средневзвешенная активность ^{137}Cs несколько больше в сообществах зерновых, в частности, ячменя, хотя потребляемые надземные части культурных злаков содержат минимальные количества радионуклида.

Таблица 2 — Величины удельной активности ^{137}Cs и ^{40}K в растительности травянистых сообществ радиоактивно загрязненной территории

Показатель	Фракция фитомассы	Агрофитоценозы			Фитоценозы	
		пшеница	ячмень	картофель	суходольный луг	влажный луг
Удельная активность ^{137}Cs , Бк/кг	Надземная	14	15	46	54	20
	Подземная	269	452	39	810	811
	Общая	73	123	40	738	642
Удельная активность ^{40}K , Бк/кг	Надземная	228	286	1024	277	249
	Подземная	153	187	254	197	210
	Общая	211	262	386	205	218

Величины удельной активности ^{137}Cs в надземной части растительности исследованных фитоценозов ранжируются по убыванию: суходольный луг (злаково-разнотравный) > картофель > влажный луг (разнотравно-злаковый) > ячмень, пшеница. Это во многом определяется составом растительных сообществ и биологическими особенностями его доминантных видов, поскольку известно, что злаки накапливают в своей надземной части наименьшее количество ^{137}Cs [3].

В то же время подземная корневая часть культурных злаков и луговой растительности характеризуется очень высокими величинами удельной активности ^{137}Cs , которые в 15—40 раз превышают уровни концентрации радионуклида в надземной части. Особенно высок контраст распределения величин удельной активности ^{137}Cs между корнями растений и их зеленой частью в природных луговых фитоценозах, где значительную долю растений составляют многолетние злаки. Факт существенно повышенной концентрации ^{137}Cs в корневой массе растений по сравнению с фракцией побега был установлен рядом зарубежных исследователей на основании лабораторных модельных экспериментов [6, 9, 10], но лишь в единичных случаях подтвержден натурными наблюдениями в вегетационных опытах [5]. Контрастное и специфическое для групп растений распределение ^{137}Cs между корнями и побегами свидетельствует о сложных физиологических механизмах транслокации радионуклида и наличии защитных барьеров, препятствующих поступлению избыточного количества ^{137}Cs в побеги. Кроме того, известно, что часть ^{137}Cs в ризосфере может оставаться в составе отмершей корневой биомассы, что замедляет его переход в минеральную

часть почвы с последующей прочной фиксацией на глинистых минералах, но благоприятствует реутилизации радионуклида в растения.

Распределение величин удельной активности ^{137}Cs по надземной и подземной фракциям агрофитоценоза картофеля практически равномерно (1:0,8 соответственно), что определяется абсолютным доминированием в подземной фракции клубней картофеля, которые являются видоизмененными побегами и, следовательно, способны накапливать ^{137}Cs в результате транслокации из корней, а не путем непосредственного поглощения. Таким образом, биологические особенности растений существенно влияют на параметры аккумуляции ^{137}Cs в фитомассе.

Специфика накопления растениями природного ^{40}K существенно отличается от биогеохимических особенностей ^{137}Cs . Во всех изученных растительных сообществах удельная активность ^{40}K в надземной фракции фитомассы в 1,2—1,4 раза выше, чем в подземной. Особенно выражена аккумуляция ^{40}K в зеленых частях картофеля (в 4 раза больше, чем в клубнях), который относится к калиефильным сельскохозяйственным культурам и в целом отличается более высокими величинами удельной активности ^{40}K . Известно, что калий составляет основную часть катионов клеточного сока и сосредоточен в молодых тканях растений с высоким уровнем обмена веществ. В травянистых растениях он концентрируется в молодых листьях, причем на свету прочность удерживания калия в растительных клетках выше, чем в темноте. В этой связи относительное накопление ^{40}K в надземной фракции фитомассы исследованных фитоценозов служит отражением подобного распределения стабильного калия по органам растений.

Анализ зависимости уровней аккумуляции радионуклидов в растительности сельскохозяйственных и природных травянистых фитоценозов от уровней их накопления в почвах (рис.) показывает, что величины удельной активности природного ^{40}K практически инвариантны, в то время как удельная активность техногенного ^{137}Cs в фитомассе тесно зависит от радиоактивного загрязнения территории (с коэффициентом детерминации $R^2 0,99$). При высоких уровнях поступления ^{137}Cs в травянистые экосистемы он может, таким образом, активно внедряться в биогеохимические циклы и даже превалировать в них над ^{40}K .

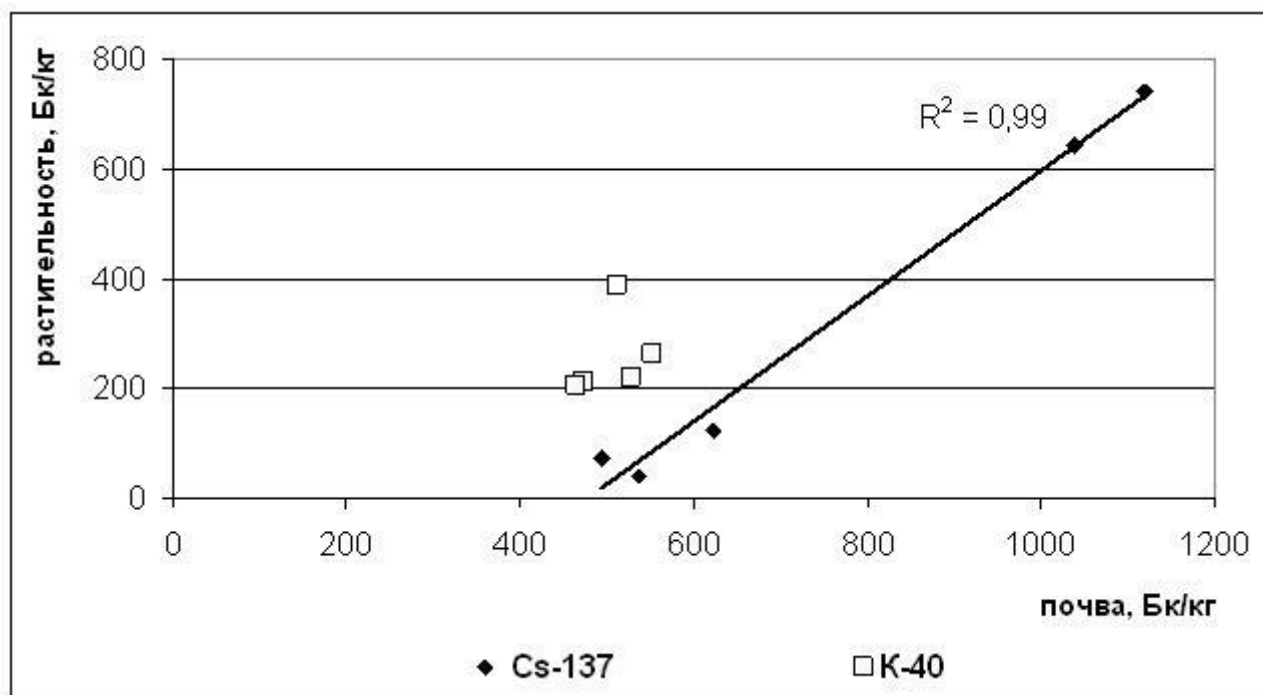


Рисунок — Зависимость величин удельной активности ^{137}Cs и ^{40}K в растительности от величин удельной активности радионуклидов в почвах

Мерой интенсивности биогеохимических циклов в радиоэкологии принято считать коэффициент накопления K_n , который рассчитывается как отношение величин удельной активности радионуклида в сухой массе растений и почвы [2, 3]. Коэффициенты накопления ^{137}Cs в фитомассе исследованных растительных сообществ составляют 0,1—0,2 для агроценозов культурной растительности и 0,6 для растительности природных лугов (табл. 3), что говорит об отсутствии избирательного поглощения радионуклида из почвы.

Таблица 3 — Коэффициенты накопления ^{137}Cs и ^{40}K в растительности травянистых сообществ радиоактивно загрязненной территории

Радионуклид	Фракция фитомассы	Агрофитоценозы			Фитоценозы	
		пшеница	ячмень	картофель	суходольный луг	влажный луг
^{137}Cs	Надземная	0,03	0,03	0,09	0,05	0,02
	Подземная	0,54	0,72	0,07	0,72	0,78
	Общая	0,15	0,20	0,08	0,66	0,62
^{40}K	Надземная	0,48	0,52	2,00	0,59	0,47
	Подземная	0,32	0,34	0,50	0,42	0,40
	Общая	0,45	0,47	0,75	0,44	0,41

При этом значения K_n ^{137}Cs в надземной фракции всех фитоценозов не превышают значения 0,1, а в подземной фракции — значения 0,8. Частные величины K_n в вегетативной и корневой фитомассе зерновых культур (агроценозы пшеницы и ячменя) и многолетних трав (фитоценозы суходольного и влажного лугов) очень близки между собой, что свидетельствует о схожести механизмов подавления транслокации ^{137}Cs и закономерной локализации основной массы поглощенного радионуклида в корнях. В агрофитоценозе картофеля распределение величин K_n , как и распределение самих величин удельной активности ^{137}Cs равномерно.

Коэффициенты накопления ^{40}K в растительной фитомассе в 2—2,5 раза выше, чем у ^{137}Cs и, за исключением агрофитоценоза картофеля, достаточно однородно распределены между надземной и подземной фракциями, составляя величину 0,3—0,6. В агрофитоценозе картофеля уровни его перехода в подземную бесхлорофилльную часть растений не уступают параметрам корневого поглощения ^{40}K в остальных растительных сообществах, но также ярко проявляется преимущественное накопление калия в зеленых вегетирующих частях растений.

Ранжированный порядок увеличения значений K_n в исследованных растительных сообществах для характеристики поглощения ^{137}Cs : картофель < ячмень, пшеница < влажный луг, суходольный луг; для ^{40}K : пшеница, ячмень, суходольный луг < картофель < влажный луг.

Таким образом, коэффициенты накопления ^{40}K в основном определяются биологическими особенностями растений, а ^{137}Cs — зависят еще и от уровня радиоактивного загрязнения территории. При этом, чем выше соотношение $^{137}\text{Cs}/^{40}\text{K}$ в почве, тем больше будет это соотношение и в фитомассе, что может негативно отразиться на физиологических процессах, протекающих в растении.

Заключение

Сопоставление величин удельной активности и распределения природного ^{40}K и техногенного ^{137}Cs по надземной и подземной фракциям фитомассы на радиоактивно загрязненной территории Тульской области выявляет существенные различия в биогеохимических циклах радионуклидов. ^{137}Cs характеризуется контрастным распределением между корнями и побегами, что свидетельствует о подавлении его транслокации в зеленые части растений, а общий объем его накопления в растительности определяется биологическими особенностями видов и плотностью радиоактивного загрязнения почв. ^{40}K равномерно распределен по органам растений с несколько большей аккумуляцией в

надземной фракции фитомассы, а величины его удельной активности сравнительно слабо зависят от уровней содержания в почвах.

Благодарности

Полевые работы проводились на средства гранта РФФИ №10-05-00976 в составе комплексной экспедиции Географического ф-та МГУ им. М. В. Ломоносова, сотрудникам которого — д. г. н. Голосову В. Н., к. г. н. Беляеву В. Р., к. г. н. Маркелову М. В. и к. г. н. Ивановой Н. Н. — авторы приносят искреннюю благодарность. Неоценимый вклад в проведение полевых работ внесен студентами ф-та Почвоведения МГУ им. М. В. Ломоносова Матвеевым Я. В. и Семенихиным А. И.

Список литературы

1. Атлас современных и прогнозных аспектов последствий аварии на Чернобыльской АЭС на пострадавших территориях России и Беларуси. – Москва-Минск, 2009. – 135 с.
2. Санжарова Н. И., Фесенко С. В., Шубина О.А., Исамов Н. Н. (мл.), Санжаров А. И. Пересмотр параметров миграции радионуклидов в агроэкосистемах // Радиационная биология. Радиэкология, 2009; Т.49, N 3. С. 268—276.
3. Сельскохозяйственная радиэкология / ред. Р. М. Алексахин, Н. А. Корнеев. – М., 1992. – 400 с.
4. Титаева Н. А. Ядерная геохимия. М., 2000. – 336 с.
5. Abu-Khadra S. A., Abdel-Sabour M. F., Abdel-Fattaah A. T., Eissa H. S. Transfer Factor of Radioactive Cs and Sr from Egyptian Soils to Roots and Leafs of Wheat Plant // IX Radiation Physics and Protection Conference. 15-19 November 2008, Nasr City-Cairo, Egypt, 185—196 p.
6. Ehlken S., Kirchner G. Environmental processes affecting plant root uptake of radioactive trace elements and variability of transfer factor data: a review // J. Environ. Radioactivity. 2002. Vol. 58, p.97—112.
7. Golosov V. N. Redistribution of sediments within small river catchments in the agricultural zone of Russia // Geomorphologie: Relief, Proc., Environ. 1998. vol. 1. P.53—64.
8. Hampton C. R, Broadley M. R, White P. J. Short review: The mechanisms of radiocaesium uptake by Arabidopsis roots // Nukleonika 2005. Vol.50. S3—S8.
9. Show G., Bell J. N. B. The Kinetics of Caesium Absorbtion by Roots of Winter Wheat and the Possible Consequences for the Derivation of soil-to-Plant transfer Factors for Radiocaesium // J. Environ. Radioactivity. 1989. Vol. 10, p.213—231.

10. Staunton S., Hinsinger P., Guivarch A., Brechignac F. Root uptake and translocation of radiocaesium from agricultural soils by various plant species // *Plant and Soil*. 2003. Vol. 254, p.443—455.