

ПОСТУПЛЕНИЕ ^{137}Cs В ПОЧВУ ИЗ ЛУГОВЫХ РАСТЕНИЙ ПРИ АЭРАЛЬНОМ ЗАГРЯЗНЕНИИ И ФОРМИРОВАНИЕ ПЕРВИЧНЫХ ГРАДИЕНТОВ КОНЦЕНТРАЦИЙ ЭТОГО ПОЛЛЮТАНТА В ПОЧВЕ НА АГРЕГАТНОМ УРОВНЕ

С.П. ТОРШИН, Г.А. СМОЛИНА, Ю.Е. ГУСЕВА

(Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева)

*В модельных опытах в полевых условиях Александровского района Владимирской области изучали поступление ^{137}Cs из различных луговых растений в дерново-подзолистую тяжелосуглинистую почву. Радионуклид в виде водного раствора нитрата цезия наносили на поверхность листа среднего яруса, предотвращая попадание ^{137}Cs на почву. В качестве опытных растений были использованы представители разных семейств: манжетка обыкновенная (*Alchemilla vulgaris* L.), семейство розоцветные; дудник лесной (*Angelica sylvestris* L.), семейство сельдерейные; лютик едкий (*Ranunculus acer* L.), семейство лютиковые; пижма обыкновенная (*Tanacetum vulgare* L.), семейство астровые; тимофеевка луговая (*Phleum pratense* L.), семейство мятликовые. Результаты опытов показали, что 2,7–6,9% от внесенного радиоцезия может попадать в почву через корневые выделения, причем наибольшее количество поллютанта было обнаружено в почве вариантов с дудником лесным, наименьшее – с пижмой обыкновенной. ^{137}Cs , поступивший в почву, накапливался преимущественно в самом верхнем (0–4 см) горизонте; в нижележащих слоях (4–12 см) радиоцезия было найдено в 1,2–6,7 раза меньше. На агрегатном уровне ^{137}Cs концентрировался в основном на поверхности самых мелких почвенных частиц, размер которых составлял <0,5 и 0,5–1 мм.*

Ключевые слова: радиоцезий, луговые растения, дерново-подзолистая почва, почвенные агрегаты, корневые выделения.

Работа выполнена за счет средств Программы развития университета в рамках Программы стратегического академического лидерства «Приоритет-2030».

Введение

Несмотря на то, что радиационная авария на ЧАЭС (Чернобыльская атомная электростанция) насчитывает более 35 лет, радионуклидное загрязнение обширных территорий нашей страны остается актуальным ввиду присутствия в составе выбросов долгоживущих радиоактивных поллютантов – в частности, радиоцезия. До настоящего времени остаются неясными некоторые вопросы загрязнения ^{137}Cs компонентов наземных экосистем. Изучение поведения радионуклидов-поллютантов в почвах обычно сводится к исследованию путей их поступления и распределения по профилю и по почвенным агрегатам. Такой подход применяется как к опытным, так и к прогнозным оценкам, а также при создании моделей миграции радиоизотопов в почвах.

Установлено, что радионуклиды, выпавшие на листья растений из атмосферы, могут попадать внутрь растения и перемещаться по нему, причем из наиболее экологически значимых радионуклидов-загрязнителей – радиоцезия и радиостронция – последний практически не передвигается по растению, тогда как ^{137}Cs отличается мобильностью, перемещаясь как в верхнюю часть растения до точки роста, так и с нисходящим флоэмным током, попадая в почву посредством корневых выделений [3–6]. Однако до настоящего времени не установлены количественные размеры

такого поступления, а также влияние видовой и родовой принадлежности растений на величину этого процесса, особенно для дикорастущей растительности.

Кроме того, малоизученным остается характер распределения искусственных радиоактивных изотопов-загрязнителей окружающей среды по почвенным агрегатам. Предыдущими исследованиями со структурированными почвами было показано, что почвенный агрегат в разных его частях неравномерен по химическим свойствам [8, 9]. Аналогичные различия были обнаружены и в распределении внутри агрегата радионуклидных загрязнений. Показано, что ^{137}Cs локализуется в основном на поверхности почвенного агрегата, в слое толщиной в несколько миллиметров, не проникая во внутриведную массу (ВПМ). Существенным барьером на пути миграции радиоцезия являются многослойные вторичные глинистые минералы, прочно сорбирующие радионуклид в межпакетном пространстве [10]. Однако способ попадания поллютанта в почву не обсуждался.

При механическом вмешательстве (вспашка, боронование и т.д.) происходит нарушение сложившегося градиента концентраций, поэтому стойкая дифференциация концентраций радиоцезия в почвенных агрегатах в системе «Поверхность-ВПМ» в течение ряда лет наблюдается только на ненарушенных тяжелых почвах нативного сложения [1, 2, 7].

Цель исследований: изучение возможности и размеров поступления ^{137}Cs в почву через корни из луговых растений и сорбции этого поллютанта почвенными агрегатами различного размера.

Материал и методы исследований

В работе приводятся результаты натуральных экспериментов, проведенных в Александровском районе Владимирской области, с естественными луговыми растениями. Опыты проводили на дерново-подзолистой почве, сформированной на покровном суглинке. Гранулометрический состав почвы – тяжелый суглинок. Некоторые агрохимические характеристики почвы представлены в таблице 1.

Таблица 1

Некоторые агрохимические свойства опытной почвы

Гумус, %	pH _{KCl}	Hг	S	V, %	P ₂ O ₅	K ₂ O
		мг×экв/100 г			по Кирсанову, мг/кг	
2,9±0,1	6,3±0,2	1,7±0,2	13,3±1,4	88,7	140±15	170±10

Для опытов брали наиболее распространенные на этой территории лугово-пастбищные растения разных семейств: манжетку обыкновенную (*Alchemilla vulgaris* L.), семейство розоцветных; дудник лесной (*Angelica sylvestris* L.), семейство сельдерейных; лютик едкий (*Ranunculus acer* L.), семейство лютиковых; пижму обыкновенную (*Tanacetum vulgare* L.), семейство астровых; тимopheевку луговую (*Phleum pratense* L.), семейство мятликовых. Водный раствор нитрата радиоцезия (активность ^{137}Cs в объеме 1 мл – 42 кБк) посредством микропипетки в натуральных условиях наносили на листья вегетирующих растений в конце мая. Поверхность почвы под растениями тщательно экранировали во избежание попадания радионуклида в почву. По истечении 30 суток отбирали образцы почвы под каждым растением с квадратной площадки площадью 900 см² до глубины 12 см в трехкратной повторности. Образцы

почвы высушивали, разделяли по размеру на фракции системой сит и определяли активность радионуклида. Отдельно в почве измеряли содержание радиоцезия в растительных остатках. Активность ^{137}Cs определяли на сцинтиляционном спектрометре 2480 Wizard (Perkin Elmer, Wallac, США, Финляндия). Ошибка при радиометрических измерениях не превышала 5%.

Результаты и их обсуждение

Радиоцезий, нанесенный на листья растений, в разных количествах поступал в почву (рис. 1). Во всех изученных вариантах опыта ^{137}Cs концентрировался в основном в верхнем слое почвы 0–4 см в большей степени в агрегатах размером менее 5 мм. Однако удельная активность радиоцезия под разными растениями существенно различалась. Наибольшая удельная активность ^{137}Cs (23,6 Бк/кг) была обнаружена в почве под лютиком едким, наименьшая (6,5 Бк/кг) – под тимофеевкой луговой. В почве под остальными видами растений были получены средние значения удельной активности ^{137}Cs .

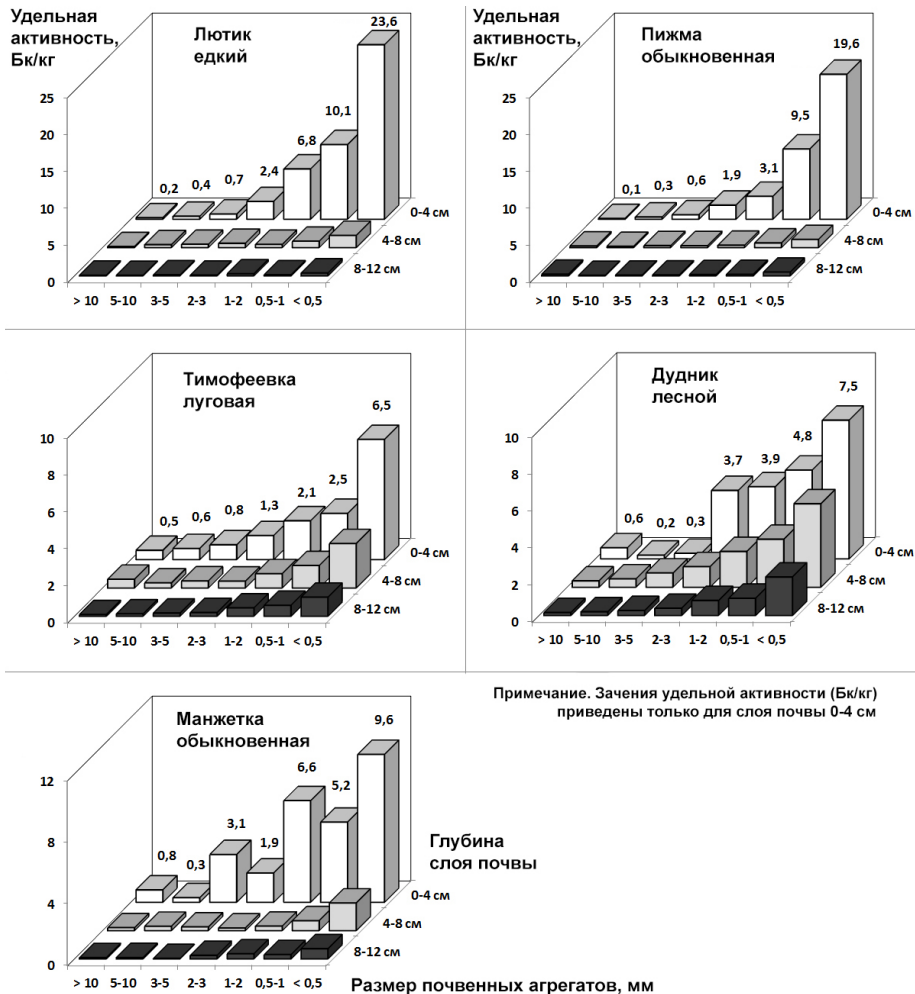


Рис. 1. Удельная активность ^{137}Cs почвенных агрегатов разного размера (радионуклид мигрировал в почву из растений)

Следует отметить, что наибольшая активность радиоцезия отмечалась в самых верхних слоях профиля почвы. По мере увеличения глубины количество радионуклида снижалось, причем наиболее интенсивно – в вариантах с пижмой и лютиком, менее резко – под дудником и тимофеевкой. Наименьшие по размеру агрегаты (0,5 мм) концентрировали значительно больше ^{137}Cs по сравнению с крупными (10 мм), причем такая закономерность наблюдалась на разных глубинах почвенного профиля.

Для оценки видовой способности каждого растения выделять в почву радиоцезий все его количества по фракциям и горизонтам были суммированы. Данные таких операций представлены в таблице 2 и на рисунке 2. Оказалось, что больше всего ^{137}Cs (почти 7% от нанесенного на растение) поступило в почву из дудника лесного, а наименьшее (2,7%) – из пижмы обыкновенной.

Таблица 2

Поступление ^{137}Cs в почву и корни растений из различных луговых растений, % от активности, нанесенной на растение

Глубина слоя, см	Лютик		Пижма		Манжетка		Тимофеевка		Дудник	
	почва	корни	почва	корни	почва	корни	почва	корни	почва	корни
0–4	3,06± 0,21	0,16± 0,02	2,31± 0,03	0,12± 0,02	3,28± 0,41	2,49± 0,19	2,68± 0,31	1,49± 0,12	3,78± 0,33	2,62± 0,25
4–8	0,24± 0,03	0,01± 0,00	0,20± 0,01	0,02± 0,01	0,65± 0,07	0,04± 0,01	0,85± 0,09	0,29± 0,03	2,54± 0,35	0,31± 0,04
8–12	0,22± 0,03	0,01± 0,00	0,20± 0,01	0,01± 0,00	0,52± 0,07	0,07± 0,01	0,26± 0,03	0,03± 0,00	0,54± 0,07	0,10± 0,03
Всего	3,52	0,18	2,71	0,15	4,45	2,60	3,79	1,81	6,86	3,03
	3,70		2,86		7,05		5,60		9,89	

Дудник лесной отличается мощной стержневой корневой системой, которая могла доставить ^{137}Cs в более глубокие слои почвы.

В корнях растений, находящихся в слое почвы 0–4 см, было обнаружено 0,12, 2,62%, в слое 4–8 см – 0,01, 0,31%, а в слое 8–12 см – лишь 0,01, 0,10% радиоактивного цезия от количества, нанесенного на растения. Минимальные значения содержания ^{137}Cs в корнях лютика и пижмы объясняются, по-видимому, более интенсивным оттоком его из корней в почву.

Для оценки эффекта формирования на поверхности почвенных агрегатов градиентов концентраций ^{137}Cs предлагается ввести показатель, называемый фактором аккумуляции (F), который вычисляется как отношение количества радиоцезия или удельной его активности в данной компоненте почвы (поверхностный слой агрегата, фракция агрегатов определенного размера, корневые остатки и пр.) к средневзвешенному содержанию или удельной активности той части почвы, из которой выделена данная компонента.

Фактор аккумуляции по отношению к средневзвешенному содержанию ^{137}Cs наблюдается, когда величина F составляет более 1.

На рисунке 3 показано, что значения F, превышающие 1, соответствовали наименьшим – 1 мм и менее диаметром почвенным агрегатам, то есть микроагрегатам. Такой эффект накопления, когда $F > 1$, наблюдался независимо от глубины почвенного профиля. Для дудника лесного и частично для тимофеевки луговой эффект концентрирования проявлялся несколько шире – и для агрегатов диаметром 1–2 и 2–3 мм.

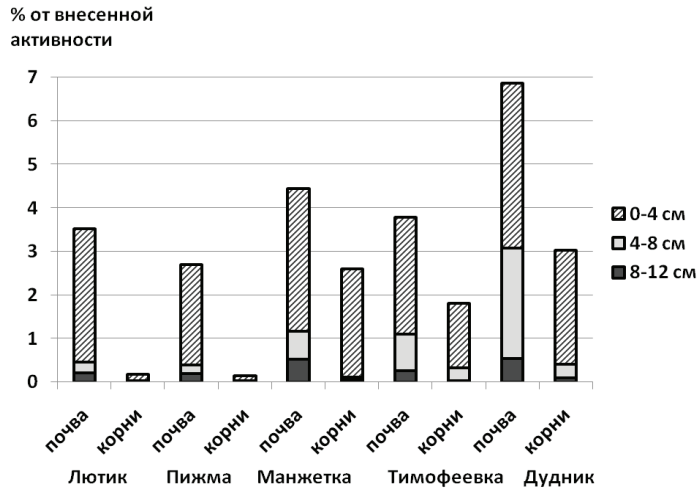


Рис. 2. Распределение ^{137}Cs в почве на агрегатном уровне под различными растениями на разной глубине

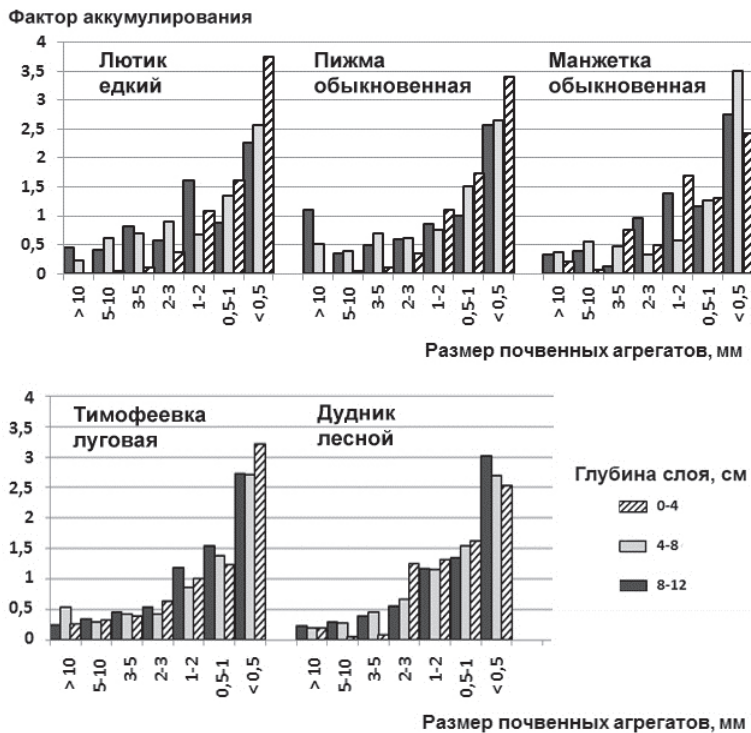


Рис. 3. Размеры факторов аккумуляции радиоцезия в зависимости от размеров почвенных агрегатов

Выводы

Таким образом, установлена возможность поступления радиоцезия в почву из аэралью загрязненных растений. Массоперенос ^{137}Cs из дикорастущих растений в почву составил 2,7–6,9% от нанесенного на листья количества. Наибольшие количества поллютанта поступали из корневых выделений дудника лесного. В большей

степени почва загрязнялась в самом верхнем (0–4 см) слое почвенного горизонта. С увеличением глубины размеры поступления радиоцезия в почву снижались.

Цезий, поступивший в почву, неравномерно распределялся по ее структурным компонентам. На агрегатном уровне ^{137}Cs сорбировался преимущественно на поверхности почвенных агрегатов, не диффундируя во внутриведную массу.

Библиографический список

1. Серегина И.И., Торшин С.П., Новиков Н.Н. и др. Агробиотехнологии XXI века: монография. – М.: Мегapolis, 2022. – 516 с.
2. Гусев Д.В., Торшин С.П., Гусева Ю.Е., Смолина Г.А. Оценка устойчивости почвенных агрегатов с использованием ^{137}Cs // Радиоэкологические последствия радиационных аварий: к 35-й годовщине аварии на ЧАЭС: Сборник докладов Международной научно-практической конференции. – Обнинск, 2021. – С. 248–251.
3. Кловская Ю.М., Торшин С.П. Распределение ^{137}Cs в почве на агрегатном и профильном уровнях при поступлении из луговых растений // Вестник Международной общественной академии экологической безопасности и природопользования. – 2014. – Вып. 18 (25). – С. 4–8.
4. Самбурова Л.И., Пельтцер А.С., Торшин С.П. Поступление ^{137}Cs в почву из растений при листовом загрязнении и распределение его в почве на профильном и агрегатном уровнях // Проблемы охраны и экологического мониторинга природных ландшафтов и биоразнообразия: Сборник статей IV Всероссийской научно-практической конференции. – Пенза: МНИЦ, 2006. – С. 83–85.
5. Торшин С.П., Фокин А.Д. Поступление радиоцезия в почву из растений при аэральном их загрязнении // Доклады ТСХА. – 2012. – Вып. 284. – Ч. 1. – С. 190–192.
6. Фокин А.Д. Роль растений в перераспределении вещества по почвенному профилю // Почвоведение. – 1999. – № 1. – С. 125–133.
7. Фокин А.Д., Торшин С.П., Самбурова Л.И. Влияние почвенных агрегатов на состояние и поведение радионуклидов // Радиоэкология: современное состояние и перспективы: Материалы Международной конференции, г. Москва, 2008. – 2008. – С. 55–59.
8. Horn R. Die bedeutung der aggregierung fur die nahrungssorption in boden // Z. Pflanzenerenahr. Bodenk. – 1987. – Vol. 150. – Pp. 13–16.
9. Kayser A.T., Wilcke W., Kaupenjohann M., Joslin J.D. Small scale heterogeneity of soil chemical properties. I. A technique for rapid aggregate fractionation // Z. Pflanzenerenahr. Bodenk. – 1994. – Vol. 157. – Pp. 453–458. DOI: 10.1002/JPLN.19941570610.
10. Fokin A.D., Torshin S.P., Kaupenjohann M. The formation of initial gradients of ^{137}Cs concentrations in soils at the aggregate level // Eurasian Soil Science. – 2003. – Vol. 36, № 8. – Pp. 826–832.

INTAKE OF ^{137}CS FROM MEADOW PLANTS INTO SOIL UNDER AERAL POLLUTION AND FORMATION OF PRIMARY GRADIENTS OF THIS POLLUTANT CONCENTRATIONS IN SOIL AT THE AGGREGATE LEVEL

S.P. TORSHIN, G.A. SMOLINA, YU.E. GUSEVA

(Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy)

In model experiments under field conditions in the Aleksandrovsky district of the Vladimir region, the intake of ^{137}Cs from various meadow plants into soddy-podzolic heavy loamy soil was studied. The radionuclide in the form of an aqueous solution of cesium nitrate was applied

to the leaf surface of the middle tier; which prevented ^{137}Cs from entering the soil. Representatives of different families were used as experimental plants: common cuff (*Alchemilla vulgaris* L.), rosaceae family; forest angelica (*Angelica sylvestris* L.), celery family; caustic buttercup (*Ranunculus acer* L.), ranunculaceae family; common tansy (*Tanacetum vulgare* L.), aster family and meadow timothy (*Phleum pratense* L.), bluegrass family. The experimental results showed that 2.7 to 6.9% of the applied radiocesium can enter the soil through root secretions, and the largest amount of the pollutant was found in the soil of varieties with forest angelica, the smallest – with common tansy. ^{137}Cs entering the soil accumulated mainly in the uppermost 0 to 4 cm horizon; in the underlying layers of 4 to 12 cm radiocesium was found 1.2 to 6.7 times less. At the aggregate level, ^{137}Cs concentrated mainly on the surface of the smallest soil particles, which were <0.5 and 0.5 to 1 mm in size.

Keywords: radiocesium, meadow plants, soddy-podzolic soil, soil aggregates, root secretions.

References

1. Seregina I.I., Torshin S.P., Novikov N.N. et al. *Agrobiotechnologies of the XXI century*. Moscow, Russia: OOO “Megapolis”, 2022:516. (In Russ.)
2. Gusev D.V., Torshin S.P., Guseva Yu.E., Smolina G.A. Assessing the stability of soil aggregates using ^{137}Cs . *Mezhdunarodnaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya “Radioekologicheskie posledstviya radiatsionnykh avariy: k 35-oy godovshchine avarii na ChAES”, Obninsk, April 22–23, 2021*. Obninsk, Russia: Russian Institute of Radiology and Agroecology of National Research Centre “Kurchatov Institute”, 2021:248–251. (In Russ.)
3. Klovskaia Yu.M., Torshin S.P. Distribution of ^{137}Cs in soil at aggregate and profile levels when coming from meadow plants. *Vestnik mezhdunarodnoy i obshchestvennoy akademii ekologicheskoy bezopasnosti i prirodopol’zovaniya*. 2014;18(25):4–8. (In Russ.)
4. Samburova L.I., Peltzer A.S., Torshin S.P. The entry of ^{137}Cs into the soil from plants during leaf contamination and its distribution in the soil at the profile and aggregate levels. *IV Vserossiyskaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya “Problemy okhrany i ekologicheskogo monitoringa prirodnykh landshaftov i bioraznoobraziya”*. Penza: MNITs, 2006:83–85. (In Russ.)
5. Torshin S.P., Fokin A.D. The entry of radiocesium into the soil from plants during aerial contamination. *Konferentsiya “Problemy razvitiya APK i sel’skikh territoriy v XXI veke”, Moscow, January 01 – December 31, 2012*. In: *Doklady TSKhA*. Moscow, Russia: Russian State Agrarian University-Moscow Agricultural Academy named after K.A. Timiryazev, 2012;284(1):190–192. (In Russ.)
6. Fokin A.D. Role of plants in the redistribution of matter along the soil profile. *Pochvovedenie*. 1999;1:125–133. (In Russ.)
7. Fokin A.D., Torshin S.P., Samburova L.I. Effect of soil aggregates on the state and behavior of radionuclides. *Mezhdunarodnaya Konferentsiya “Radioekologiya: sovremennoye sostoyaniye i perspektivy”*. Moscow, Russia, 2008:55–59. (In Russ.)
8. Horn R. Die bedeutung der aggregierung fur die nahrungssorption in boden. *Z. Pflanzenerenahr. Bodenk.* 1987;150:13–16. (In Germ.)
9. Kayser A.T., Wilcke W., Kaupenjohann M., Joslin J.D. Small scale heterogeneity of soil chemical properties. I. A technique for rapid aggregate fractionation. *Z. Pflanzenerenahr. Bodenk.* 1994;157:453–458. <https://doi.org/10.1002/JPLN.19941570610>
10. Fokin A.D., Torshin S.P., Kaupenjohann M. The formation of initial gradients of ^{137}Cs concentrations in soils at the aggregate level. *Eurasian Soil Science*. 2003;36(8):826–832.

Сведения об авторах

Торшин Сергей Порфирьевич, д-р биол. наук, профессор кафедры агрономической, биологической химии и радиологии РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева; 127550, г. Москва, ул. Тимирязевская, 49; тел.: (499) 976-40-24; e-mail: sptorshin@rambler.ru

Смолина Галина Алексеевна, канд. биол. наук, доцент кафедры агрономической, биологической химии и радиологии РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева; 127550, г. Москва, ул. Тимирязевская, 49; тел.: (499) 976-40-24; e-mail: gsmolina@rgau-msha.ru

Гусева Юлия Евгеньевна, канд. биол. наук, доцент кафедры агрономической, биологической химии и радиологии РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева; 127550, г. Москва, ул. Тимирязевская, 49; тел.: (499) 976-40-24; e-mail: uguseva@rgau-msha.ru

Information about the authors

Sergey P. Torshin, DSc (Bio), Professor at the Department of Agrochemistry, Biochemistry and Radiology, Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy (49 Timiryazevskaya St., Moscow, 127550, Russian Federation; phone: (499) 976-40-24; e-mail: sptorshin@rambler.ru)

Galina A. Smolina, CSc (Bio), Associate Professor at the Department of Agrochemistry, Biochemistry and Radiology, Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy (49 Timiryazevskaya St., Moscow, 127550, Russian Federation; phone: (499) 976-40-24; e-mail: gsmolina@rgau-msha.ru)

Yulia E. Guseva, CSc (Bio), Associate Professor at the Department of Agrochemistry, Biochemistry and Radiology, Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy (49 Timiryazevskaya St., Moscow, 127550, Russian Federation; phone: (499) 976-40-24; e-mail: uguseva@rgau-msha.ru)