Научная статья
УДК 631.41:539.1.04

ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ПОЧВ И РАСТЕНИЙ В РАЙОНАХ С РАЗНЫМ УРОВНЕМ РАДИАЦИОННОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ

[1]Ольга Анатольевна Пчеленок, [1]Наталья Михайловна Козлова, [2]Андрей Леонидович Силаев
[1]ФГБОУ ВО ОГУ имени И.С. Тургенева, Орловская область, г. Орел, Россия
[2]ФГБОУ ВО Брянский ГАУ, Брянская область, Кокино, Россия

Аннотация. В статье приведены результаты исследований закономерностей содержания радионуклида ^{137}Cs в почвах с повышенным радиационным загрязнением, а также сравнительной характеристики поступления радиоцезия в растения фасоли и рапса, выращенных на вышеуказанных почвах. Исследования проводились на протяжении длительного периода времени. Для анализа были выбраны результаты исследований, проводимых в течение вегетационных периодов 2010 и 2011 годов, сильно отличавшихся гидрометеорологическим условиями: 2011 год характеризовался более благоприятными для возделывания сельскохозяйственных культур условиями, чем 2010 год. На опытных участках трех районов Брянской области, характеризующихся повышенным радиоактивным загрязнением, были произведены посевы растений фасоли и рапса. Во время агроэкологического исследования проведен мониторинг содержания валовых и подвижных форм ^{137}Cs в почвенных образцах до посева культур, а также накопления радионуклидов в различных органах растений фасоли и рапса. Результаты исследования показали, что на содержание подвижного радионуклида в почве большее влияние, по сравнению с гидротермическими показателями окружающей среды, оказывает количество валовых форм ^{137}Cs. Для динамики накопления ^{137}Cs и в рапсе и фасоли в засушливый период характерна тесная корреляционная зависимость между содержанием валовых и подвижных форм и концентрацией его в плодах и вегетативных органах и отсутствие таковой в корнях. В более влажных погодных условиях корреляционная связь ниже, чем в засушливых условиях, особенно для вегетационных органов. Общее количество поступившего радионуклида в растения фасоли меньше, чем в рапсе.

Ключевые слова: радиоактивное загрязнение, ^{137}Cs, фасоль, рапс, коэффициент накопления.

Для цитирования: Пчеленок О.А., Козлова Н.М., Силаев А.Л. Экологическая оценка почв и растений в районах с разным уровнем радиационного загрязнения // Вестник Брянской ГСХА. 2024. № 1 (101). С. 9-14.

Original article

ECOLOGICAL EVALUATION OF SOILS AND PLANTS IN THE AREAS WITH DIFFERENT LEVEL OF RADIATIVE CONTAMINATION

[1]Ol'ga A. Pchelenok, [1]Natal'ya M. Kozlova, [2] Andrey L. Silaev
[1]OSU named after I.S. Turgenev, Oryol region, Oryol, Russia
[2]Bryansk State Agrarian University, Bryansk region, Kokino, Russia

Abstract. The article presents the results of researches in ^{137}Cs radionuclide content of the patterns in soils with increased radiative contamination, as well as comparative characteristics of radiocesium intake into bean and rape plants grown on the above soils. The researches were carried out over a long period of time. The results of researches conducted during the growing seasons of 2010 and 2011 were selected for analysis. These seasons differed greatly in hydrometeorological conditions: 2011 was characterized by more favourable conditions for the cultivation of agricultural crops than 2010. Bean and rape were sown in experimental plots of three districts of the Bryansk region, characterized by increased radiative contamination. The content of bulk and mobile forms of ^{137}Cs in soil samples before sowing crops, as well as the accumulation of radionuclides in various organs of bean and rape plants were monitored during the agroecological test. The results of the researches showed that the content of mobile radionuclide in the soil was more influenced, compared to hydrothermal indicators of the environment, by the amount of bulk forms of ^{137}Cs. The dynamics of ^{137}Cs accumulation both in rape and beans during the dry period is characterized by a close correlation between the content of bulk and mobile forms and its concentration in fruits and vegetative organs and the absence of such in the roots. In wetter weather conditions, the correlation is lower than in dry conditions, especially for vegetative organs. The total amount of radionuclide intaken into the bean plants is less than that of the rape.

Keywords: radiative contamination, ^{137}Cs, beans, rape, accumulation coefficient.

For citation: O.A. Pchelenok, N.M. Kozlova, A.L. Silaev. Ecological evaluation of soils and plants in the areas with different level of radiative contamination. Vestnik of the Bryansk State Agricultural Academy. 2024; (1): 9-14 (In Russ.).

Введение. Антропогенное загрязнение радионуклидами почвенно-растительного покрова обусловлено поступлением в почву радиоактивных изотопов, образующихся в результате испытаний ядерного оружия, в виде отходов атомной промышленности, применения искусственных радиоизотопов в различных отраслях науки и производства [1]. Авария на Чернобыльской АЭС в апреле 1986 года увеличила уровень активности в почве основного дозообразующего радионуклида ^{137}Cs, обладающего высокой энергией излучения и способного накапливаться в живых организмах [2]. Разброс значений ^{137}Cs в почвах разных районов Брянской области значительный и колеблется от 5 до 40 и более Ки/км^2. На территориях с уровнем радиоактивного загрязнения свыше 15 Ки/км^2 установлена зона жесткого контроля [3].

Существует сложная межвидовая зависимость степени накопления радионуклидов от почвенно-метеорологических характеристик и уровня загрязнения почвы. Для выявления зависимости, определяющей ответ вида растения на уровень радиации в почве, необходимо проведение исследований не только в идентичных почвенно-метеорологических условиях, но и с разным уровнем радиационного загрязнения [4]. Проведение таких исследований позволит более обоснованно подойти к решению очистки почвы от радионуклидов.

Цель – исследование закономерностей содержания радионуклида ^{137}Cs в почвах с повышенным радиационным загрязнением, а также сравнительный анализ поступления ^{137}Cs в растения фасоли и рапса, выращенных на загрязненных почвах.

Материалы и методика исследования. В качестве объектов исследований послужили образцы:

- почвы с реперных участков некоторых районов Брянской области, характеризующихся различным уровнем радиоактивного загрязнения;
- сельскохозяйственных культур - рапса и фасоли.

Научные исследования по данной проблеме проводятся на протяжении многих лет. В данной статье представлены результаты исследований за период 2010 – 2011 годы, сильно отличавшихся гидрометеорологическим условиями. Значения гидротермических коэффициентов (ГТК) за вегетационный период составили: в 2010 году – 1,6, в 2011 году – 2,2. Таким образом, 2011 год характеризовался более благоприятными для возделывания сельскохозяйственных культур условиями, чем 2010 год.

Исследования проводились в Клинцовском (участок № 1, фон), Новозыбковском (участок № 2) и Красногорском (участок № 3) районах Брянской области. Средневзвешенный уровень радиоактивного загрязнения почвы в этих районах составлял, соответственно, 350 Бк/кг, 790 Бк/кг, 3000 Бк/кг. В соответствии с методикой полевых опытов, в каждом районе закладывались реперные участки. Площадь участка – 8 м^2. Перед посевом семян исследуемых культур в соответствии с общепринятой методикой с каждого участка отбирались почвенные образцы с целью определения удельной активности ^{137}Cs до посева культуры. Отбор растительного материала производился методом равномерного прореживания. В фазу полного созревания растения извлекались из почвы целиком для последующего анализа плодов, надземной части (листья+стебли) и корней. Подготовка растительных образцов к анализу проводилась по общепринятым методам [5].

Радиоактивность в почвенных и растительных образцах определяли методом методом гамма-спектрометрии.

Результаты исследования. В период исследований удельная активность ^{137}Cs в почве сильно колебалась, достигая максимальных значений в 2011 году. Количество подвижных форм радионуклидов в почве так же увеличивалось в период с более высоким количеством осадков. Это объясняется известной зависимостью от влажности почвы [6]. В таблице 1 приведены значения коэффициента подвижности в почве участков при различных погодных условиях.

Таблица 1 – Коэффициент подвижности ^{137}Cs в почве, Бк/кг

№ участка/период	Участок №1/период		Участок № 2/период		Участок № 3/период	
	2010год	2011год	2010 год	2011 год	2010 год	2011 год
Коэффициент подвижности, $К_п$	0,08	0,14	0,12	0,31	0,18	0,34

Анализ полученных результатов показал, что в вегетационный период 2011 года, характеризующийся более высоким количеством выпадающих осадков по сравнению с 2010 годом, количество подвижных форм ^{137}Cs увеличилось на участке № 1 в 2,2 раза, на участке № 2 – 2,9 раз, на участке №3 – 2,1 раз.

Увеличение гидротермических показателей способствует увеличению и коэффициента подвижности. При этом первом участке это увеличение составляет в 2,3 раза, на втором – в 2,6 раз, на третьем – в 1,9 раз. Анализ приведенных данных показал так же, что независимо от погодных условий количество подвижного ^{137}Cs в почве подчиняется следующей закономерности: на участке № 3 > чем на участке № 2 > чем на участке № 1. Полученные данные отражают наличие зависимости количества подвижных форм ^{137}Cs от общего содержания его в почве. В таблице 2 приведены данные расчета отношений активности ^{137}Cs в почве разных участков.

Таблица 2 – Соотношение различных форм ^{137}Cs в почве экспериментальных участков

Отношение активности ^{137}Cs в почве	Валовые формы ^{137}Cs		Подвижные формы ^{137}Cs	
	2010 год	2011 год	2010 год	2011 год
Участок № 2/ Участок № 1	2,35	2,21	3,67	4,72
Участок № 3/ Участок № 1	9,43	8,22	20,64	19,34
Участок № 3/ Участок № 2	4,02	3,7	5,63	4,09

Сопоставление отношений активности разных форм ^{137}Cs показало, что наиболее разительные отличия наблюдается между участком № 1 (фоном) и участком № 3: при превышении валовых форм ^{137}Cs примерно в 9 раз на участке № 3 происходит двукратное увеличение превышения подвижного ^{137}Cs. В то же время, при увеличении валовых форм радионуклида в 2,4 раза (участок №2/участок № 1) и в 4,0 раза (участок №3/участок № 2) увеличение превышения количества подвижных форм радионуклида составляет всего 1,6-1,3 раза и 1,4-1,3 раза, соответственно.

Таким образом, чем значительнее отличия в количестве валовых форм ^{137}Cs, тем значительнее отличия в количестве подвижных форм ^{137}Cs. Полученные данные позволяют предположить, что на содержание подвижных форм радионуклида большее влияние, по сравнению с гидротермическими показателями окружающей среды, оказывает количество валовых форм ^{137}Cs в почве.

Произрастание растений на радиационно-загрязненной почве неизбежно приводит к накоплению радионуклидов в различных органах растений. Как известно, распределение ^{137}Cs по органам растений подчиняется следующей закономерности: корни > вегетативные органы > семена [7]. Согласно нашим данным в растениях фасоли и рапса прослеживается вышеуказанная закономерность. Значения коэффициента накопления по органам растений представлены в таблице 3.

Таблица 3 – Значения коэффициента накопления ($К_н$)

Органы растений	Участок № 1		Участок № 2		Участок № 3	
	2010 год	2011 год	2010 год	2011 год	2010 год	2011 год
	Фасоль					
Плоды	0,06	0,09	0,03	0,04	0,01	0,01
Вегетативные органы	0,12	0,37	0,14	0,17	0,05	0,08
Корни	0,65	0,48	0,54	0,34	0,09	0,17
Рапс						
Плоды	0,18	0,15	0,09	0,07	0,03	0,02
Вегетативные органы	0,24	0,34	0,20	0,22	0,03	0,07
Корни	0,60	0,52	0,41	0,33	0,08	0,16

Анализ приведенных данных позволяет заключить, что в растении фасоли накапливается меньше ^{137}Cs, чем в рапсе. На фоновом участке в засушливый период в плодах и вегетативных органах снижение составляет в 3 и 2 раза соответственно. Различия в уровне накопления ^{137}Cs в корнях этих растений малосущественны и составляют 8,8 %. В более благоприятных погодных условиях наблюдается значительное увеличение ^{137}Cs в вегетативных органах фасоли – на 89,2 %, в семенах – на 77 %. В корневой системе накопление ^{137}Cs не происходит, напротив, наблюдается малосущественное снижение - на 9 %.

В растении рапса закономерности накопления ^{137}Cs иные. Об этом свидетельствуют и значения коэффициента накопления ($К_н$), который выше, чем у фасоли. На участке № 1 количество цезия в плодах, в отличие от фасоли, при изменении погодных условий в 2011 году не изменилось. Увеличилось количество ^{137}Cs в вегетативных органах - на 74 %, и в корнях - на 20,3 %.

На экспериментальных участках № 2 и № 3, с более высоким уровнем радиационного загрязнения, во всех органах растений фасоли и рапса отмечается соответствующее увеличение концентрации ^{137}Cs. При увеличении гидротермических показателей поступление радионуклида в растения возрастает.

Зависимость накопления ^{137}Cs в различных органах фасоли от уровня его в почве неоднозначна (рис. 1, 2). В засушливый период накопление ^{137}Cs в вегетативных органах и семенах подчиняется линейной зависимости, в корнях полиномиальной, т.к. на участке № 3 количество ^{137}Cs в корнях меньше, чем на участке № 2 с более низкой удельной активностью ^{137}Cs почвы (рис. 1).

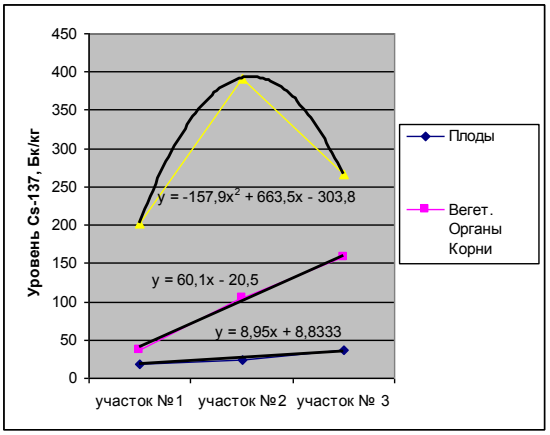

Рисунок 1 – Динамика накопления ^{137}Cs в органах фасоли в засушливый период (2010 год)

В более влажный период 2011 года на участке № 2, по сравнению с фоновым участком, происходит увеличение количества ^{137}Cs только в семенах фасоли, в то время, как и в вегетативных органах и в корнях удельная активность ^{137}Cs, по сравнению с засушливым периодом снижается. На участке № 3, при наиболее высокой плотности радиоактивного загрязнения, уменьшается удельная активность ^{137}Cs в плодах и вегетативных органах и значительно увеличивается в корневой системе. Снижение удельной активности ^{137}Cs в семенах фасоли при высокой плотности радиоактивного загрязнения почвы в благоприятных погодных условиях, возможно, обусловлено действием защитных механизмов растения, препятствующих накоплению высоких количеств ^{137}Cs в генеративных органах растения. Накопление ^{137}Cs в этот период подчиняется линейной зависимости (рис. 2).

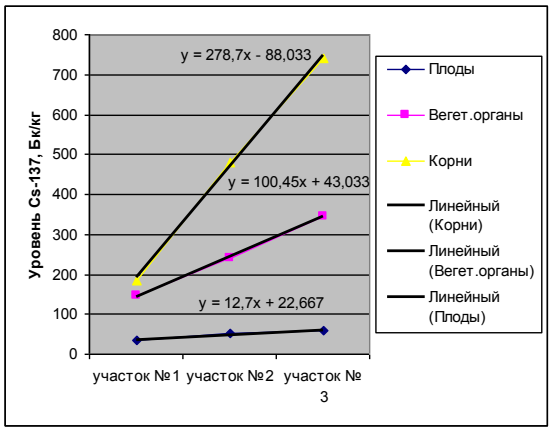

Рисунок 2– Динамика накопления ^{137}Cs в органах фасоли во влажный период (2011 год)

Из данных представленных видно, что эта зависимость характерна и для корневой системы. Из этого можно заключить, что в более влажных условиях вегетации защитная роль корневой системы растений от поступления в них радионуклидов ослаблена, она менее эффективна, по сравнению с засушливыми условиями.

Для рапса на участке № 2, как показал анализ данных, приведенных в таблице 3, так же как и для фасоли, в 2010 году наиболее значительное увеличение интенсивности накопления ^{137}Cs, по сравнению с фоном, характерно для вегетативных органов и корней. На участке № 3, при наиболее высокой плотности радиоактивного загрязнения, в засушливых условиях отмечается значительное увеличение ^{137}Cs в семенах (в 1,4 раз). В вегетативных органах и корнях это увеличение, по сравнению с фоном, не значительно. При улучшении погодных условий в 2011 году интенсивность накопления радионуклида возрастает во всех органах растения и более значительно, чем в органах фасоли. Наиболее значительное накопление отмечается в корневой системе растения.

Зависимость накопления ^{137}Cs в органах рапса в засушливый период, в отличие от фасоли, в основном подчиняется полиномиальной зависимости, лишь для семян сохраняется линейная зависимость (рис. 3). При выращивании растений в более влажных условиях (2011 год), когда отмечается более высокая концентрация валового и подвижных форм ^{137}Cs, для вегетативных органов и семян отмечается полиномиальная, а для корней линейная зависимость уровня накопления радионуклида от содержания его удельной активности в почве (рис. 4).

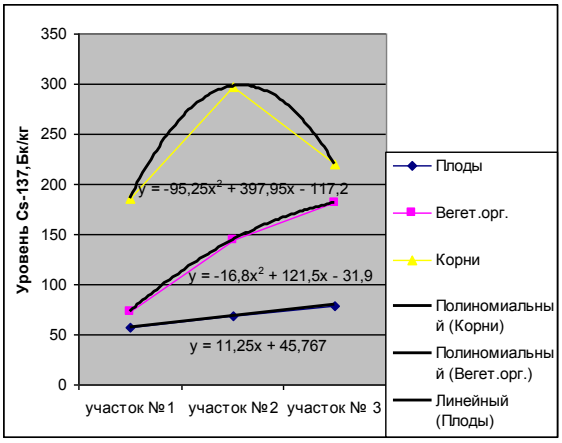

Рисунок 3 – Динамика накопления ^{137}Cs в органах рапса в засушливый период (2010 год)

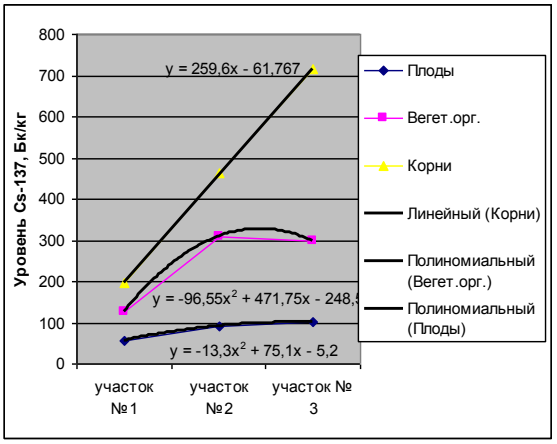

Рисунок 4 – Динамика накопления ^{137}Cs в органах рапса во влажный период (2011 год)

Вероятно, эта способность корневой системы рапса накапливать значительное количество ^{137}Cs предотвратила его поступление в наземные органы [8]. Очевидно, что кроме этого действуют и другие механизмы защиты, свойственные этому виду растения. У фасоли, как это видно на рисунке 2, во влажный период также корневая система накапливает значительное количество ^{137}Cs, но это не предотвратило линейное накопление его в наземных органах.

На участках, в меньшей степени отличающихся по уровню удельной активности ^{137}Cs в почве (участок № 2 и участок № 3), различия в количестве радионуклида в растениях менее значительны. На участке № 3, по сравнению с участком № 2, в засушливый период наблюдается некоторое накопление ^{137}Cs в семенах рапса, а во влажный период – в корнях. Очевидно, с некоторого предельного уровня удельной активности ^{137}Cs в почве интенсивность поступления его в растения рапса снижается. Этот факт характерен и для фасоли, но в меньшей степени. В более влажных условиях возрастает защитная роль корневой системы. Из приведенных данных видно, что на участке № 3, по сравнению с участком № 2, в 2011 году концентрация ^{137}Cs в корнях рапса и фасоли увеличилась в 2 раза.

Из данных, приведенных в литературе известно, что наиболее активно в растения поступают подвижные формы радионуклидов [9]. Сопоставление приведенных данных позволяет предположить, что существует прямая зависимость между увеличением валовых и подвижных форм радионуклида в почве и поглощением их растениями. Результаты расчета корреляционной зависимости между удельной активностью ^{137}Cs в почве и концентрацией его в растениях приведен в таблице 4.

Таблица 4 - Значения R между уровнем удельной активности ^{137}Cs в почве и концентрацией его в различных органах растений фасоли и рапса

Органы растений	Фасоль		Рапс	
	2010 год	2011 год	2010 год	2011 год
Плоды	0,99/0,99	0,88/0,99	0,91/0,89	0,82/0,78
Вегетативные органы	0,90/0,89	0,81/0,95	0,85/0,84	0,66/0,62
Корни	0,06/-0,06	0,95/0,93	-0,07/-0,1	0,96/0,94
Примечание: в числителе R между валовым содержанием ^{137}Cs в почве и концентрацией в растениях, в знаменателе – R между подвижным ^{137}Cs и концентрацией в органах растений.				

Анализ приведенных данных показывает, что в засушливый год для растения фасоли существует тесная положительная зависимость между разными формами ^{137}Cs в почве и концентрацией его в плодах и вегетативных органах. Для корневой системы корреляционная зависимость отсутствует. В 2011 году, при увеличении количества осадков, резко возрастает зависимость удельной активности ^{137}Cs в корнях от валового содержания и подвижных форм (R>0,90). В семенах вегетативных органах уменьшается роль валового ^{137}Cs и возрастает роль его подвижных форм.

Для рапса в засушливый период, отмечается тесная положительная зависимость между удельной активностью ^{137}Cs в почве и концентрацией его в плодах и вегетативных органах. Но зависимость эта менее тесная, по сравнению с фасолью. Так же отсутствует корреляционная связь между удельной активностью ^{137}Cs в почве и концентрацией его в корнях - R имеет отрицательное значение. При более благоприятных условиях увлажнения, так же как и в случае с фасолью, резко увеличивается связь между концентрацией радионуклида в почве и активностью его в корнях - R > 0,90. В то же время, снижается корреляционная зависимость между всеми формами ^{137}Cs в почве и накоплением в семенах и вегетативных органах. Наименее выражена зависимость для вегетативных органов. Корреляционная зависимость для валовых и подвижных форм ^{137}Cs практически идентична.

Выводы. Проведенные исследования показали, что уровень удельной активностью ^{137}Cs в почве экспериментальных участков значительно разнится. Максимальные значения определяются во влажный 2011 год. В этот период увеличивается количество и подвижных форм ^{137}Cs. В то же время, на содержание подвижных форм радионуклида большее влияние, по сравнению с гидротермическими показателями окружающей среды, оказывает количество валовых форм ^{137}Cs в почве.

Накопление радионуклидов в различных органах растений фасоли и рапса подчиняется известной закономерности: корни > вегетативные органы > семена. Увеличение удельной активности ^{137}Cs в почве однозначно приводит к увеличению концентрации радионуклида во всех органах растений. При более благоприятных погодных условиях количество поглощенного растениями ^{137}Cs увеличивается. Общее количество поступившего радионуклида в растения фасоли меньше, чем в рапсе.

Для динамики накопления ^{137}Cs и в рапсе и фасоли в засушливый период характерна тесная корреляционная зависимость между содержанием валовых и подвижных форм и концентрацией его в плодах и вегетативных органах и отсутствие таковой в корнях. В более влажных погодных условиях корреляционная связь ниже, чем в засушливых условиях, особенно для вегетационных органов.

Список источников

1. Бакунов Н.А., Архипов Н.П. Поведение стронция-90 и цезия-137 бомбового и реакторного происхождения в системе почва-растение // Почвоведение. 1994. № 6. С. 41-47.
2. Bilgiç E., Gündüz O. Dose and risk estimation of Cs-137 and I-131 released from a hypothetical accident in Akkuyu Nuclear Power Plant // Journal of Environmental Radioactivity. 2020. № 211. P. 14.
3. Пакшина С.М., Белоус Н.М. Биовынос из почвы цезия-137 продукцией растениеводства. Брянск: Изд-во Брянский ГАУ, 2019. 125 с.
4. Влияние весенне-летнего дефицита почвенной влаги на удельную активность ^{137}Cs воздушно-сухой массы кормовых культур / С.М. Пакшина, Н.М. Белоус, Г.П. Малявко и др. // Вестник Брянской ГСХА. 2023. № 4 (98). С. 14-18.
5. Доспехов Б.А. Методика полевого опыта (с основами статистической обработки результатов исследований). М.: Альянс, 2014. 351 с.
6. Черников В.А., Алексахин А.М., Голубев А.В. Агроэкология. М., 2000. 536 с.
7. Клековкина Г.В. Радиоэкология. Ижевск, 2004. 257 с.
8. Пчеленок О.А., Козлова Н.М. Экологические аспекты снижения поступления радионуклидов в растительную продукцию // Технология и товароведение инновационных пищевых продуктов. 2010. №1. С. 78-81.
9. Громова В.С. Влияние повышенного уровня радиационного загрязнения почвы на содержание в растениях ^{137}Cs и биогенных элементов // Гигиена и санитария. 2010. № 2. С. 42-44.

Информация об авторах:

О.А. Пчеленок – кандидат сельскохозяйственных наук, доцент, заведующий кафедрой техносферной безопасности, ФГБОУ ВО ОГУ имени И.С. Тургенева, bgdgtu@mail.ru

Н.М. Козлова – старший преподаватель кафедры техносферной безопасности, ФГБОУ ВО ОГУ имени И.С. Тургенева, bgdgtu@mail.ru.

А.Л. Силаев – кандидат сельскохозяйственных наук, доцент кафедры агрохимии, почвоведения и экологии, ФГБОУ ВО Брянский ГАУ, kafeap@bgsha.com.

Information about the authors:

O.A. Pchelenok – Candidate of Agricultural Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Technosphere Safety, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education OSU named after I.S. Turgeneva, bgdgtu@mail.ru

N.M. Kozlova – senior lecturer at the Department of Technosphere Safety, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education OSU named after I.S. Turgeneva, bgdgtu@mail.ru.

A.L. Silaev – Candidate of Agricultural Sciences, Associate Professor of the Department of Agrochemistry, Soil Science and Ecology, Bryansk SAU, kafeap@bgsha.com.

Все авторы несут ответственность за свою работу и представленные данные. Все авторы внесли равный вклад в эту научную работу. Авторы в равной степени участвовали в написании рукописи и несут равную ответственность за плагиат. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

All authors are responsible for their work and the data provided. All authors have made an equal contribution to this scientific work. The authors were equally involved in writing the manuscript and are equally responsible for plagiarism. The authors declare that there is no conflict of interest.

Статья поступила в редакцию 28.11.2023; одобрена после рецензирования 26.01.2024, принята к публикации 31.01.2024.

The article was submitted 28.11.2024; approved after rewiewing 26.01.2024; accepted for publication 31.01.2024.

© Пчеленок О.А., Козлова Н.М., Силаев А.Л.