

МОНИТОРИНГ СОДЕРЖАНИЯ РАДИОНУКЛИДОВ И ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ В АГРОЭКОСИСТЕМАХ ЛЕСОСТЕПНОЙ ЗОНЫ ЦЕНТРАЛЬНОГО ЧЕРНОЗЕМЬЯ РОССИИ

Сергей Викторович Лукин^{1,2}, доктор сельскохозяйственных наук, ORCID: 0000-0003-0986-9995

¹Центр агрохимической службы «Белгородский», г. Белгород, Россия

²Белгородский государственный национальный исследовательский университет, г. Белгород, Россия

E-mail: serg.lukin2010@yandex.ru

Аннотация. Исследования проводили в рамках программы государственного агроэкологического мониторинга в юго-западной части Центрального Черноземья на территории Белгородской области. Почвенный покров лесостепной зоны представлен черноземами типичными. Образцы почвы и зерна анализировали в аккредитованной испытательной лаборатории по общепринятым методикам. Территория области после аварии на Чернобыльской АЭС в 1986 году подверглась радиоактивному загрязнению. Установлено, что по среднему валовому содержанию в пахотных черноземах типичных тяжелые металлы образуют убывающий ряд (мг/кг): Mn (345) > Zn (36,5) > Cu (13,9) > Pb (10,3) > Co (8,48) > As (4,18) > Cd (0,23) > Hg (0,022), по содержанию подвижных форм закономерность иная: Mn (16,7) > Pb (0,40) > Zn (0,39) > Cu (0,09) > Co (0,08) > Cd (0,05). По удельной активности радионуклиды образуют ряд (Бк/кг): ⁴⁰K (530,2) > ²³²Th (38,1) > ²²⁶Ra (23,8) > ¹³⁷Cs (17,3). Превышений нормативов ориентировочно и предельно допустимых концентраций изучаемых элементов в пахотных почвах не наблюдали. Обеспеченность пахотных почв подвижными формами Zn, Cu и Co низкая, для повышения урожайности сельскохозяйственных культур рекомендуется вносить микроудобрения с этими элементами. В зерне озимой пшеницы содержание изучаемых элементов и удельная активность ¹³⁷Cs были существенно ниже предельно допустимых уровней.

Ключевые слова: мониторинг, тяжелые металлы, радионуклиды, чернозем, агроэкосистема, предельно-допустимая концентрация, удельная активность

MONITORING OF THE RADIONUCLIDES AND HEAVY METALS CONTENT IN THE AGROECOSYSTEMS OF THE FOREST-STEPPE ZONE OF THE CENTRAL CHERNOZEM REGION OF RUSSIA

S.V. Lukin^{1,2}, *Grand PhD in Agricultural Sciences*, ORCID: 0000-0003-0986-9995

¹Belgorod Center for Agrochemical Service, Belgorod, Russia

²Belgorod State National Research University, Belgorod, Russia

E-mail: serg.lukin2010@yandex.ru

Abstract. The research was carried out as part of the state agroecological monitoring program in the southwestern part of the Central Chernozem region in the Belgorod region. The soil cover of the forest-steppe zone was represented by typical chernozems. All analytical studies were carried out in an accredited testing laboratory according to generally accepted methods. The territory of the region after the accident at the Chernobyl NPP in 1986 was subjected to radioactive pollution. As a result of the studies, it was found that the average gross content of typical heavy metals in arable chernozems forms the following decreasing series (mg/kg): Mn (345) > Zn (36.5) > Cu (13.9) > Pb (10.3) > Co (8.48) > As (4.18) > Cd (0.23) > Hg (0.022). In terms of the content of mobile forms of heavy metals, the pattern is slightly different: Mn (16.7) > Pb (0.40) > Zn (0.39) > Cu (0.09) > Co (0.08) > Cd (0.05). According to the specific activity of radionuclides, they form a series (Bc/kg): ⁴⁰K (530.2) > ²³²Th (38.1) > ²²⁶Ra (23.8) > ¹³⁷Cs (17.3). There was no excess of the standards of the approximate permissible and maximum permissible concentrations of the studied elements in the studied arable soils. The availability of arable soils with mobile forms of Zn, Cu and Co is assessed as low, in which microfertilization containing these elements is recommended to increase crop yield. In winter wheat grains, the content of the studied elements and the specific activity of the ¹³⁷Cs were significantly lower than the maximum permissible levels.

Keywords: monitoring, heavy metals, radionuclides, chernozem, agroecosystem, maximum allowable concentration, specific activity

В связи с широким применением тяжелых металлов (ТМ) в промышленности и радионуклидов в ядерной энергетике возрастает риск загрязнения агроэкосистем этими поллютантами. Термин «тяжелые металлы» используют для большой группы металлов с атомной массой более 40, к ней же часто относят мышьяк (металлоид). Некоторые ТМ (Mn, Zn, Cu, Co) участвуют в физиологических процессах растений и человека, их называют микроэлементами. Основные естественные радионуклиды, удельная активность которых периодически контролируется в почвах, — ²²⁶Ra, ²³²Th и ⁴⁰K, искусственные — ¹³⁷Cs

и ⁹⁰Sr. Они попадают в агроэкосистемы с атмосферными осадками и на долгое время депонируются в почвах. [1, 13]

Главные антропогенные источники поступления ТМ в почвы — предприятия цветной металлургии и машиностроения, тепловые электростанции, транспорт. В результате антропогенной эмиссии ТМ их концентрации в промышленно развитых районах превышают фоновые значения в десятки раз. Большое количество их попадает в почву с осадками сточных вод (ОСВ). [13, 14] При высоких дозах внесения важный источник

поступления ТМ в почвы – органические удобрения. [9]

После аварии на Чернобыльской АЭС в 1986 году большая часть Центральной России подверглась радиоактивному загрязнению. В Белгородской области искусственные радионуклиды ¹³⁷Cs и ⁹⁰Sr обнаружены практически на всей территории, но сильнее всего пострадали восточные районы, где около 140 тыс. га пашни были загрязнены радиоцезием (критический радионуклид) в пределах 1...5 Ки/км².

Определение содержания ТМ и радионуклидов в почвах включено в программу государственного мониторинга земель. В рамках локального агроэкологического мониторинга агрохимической службой России периодически анализируется содержание этих токсикантов в растениеводческой продукции. [15]

Для корректной агроэкологической оценки уровня загрязнения почвенного покрова необходимо знать содержание ТМ и естественных радионуклидов в фоновых, не используемых в сельскохозяйственном производстве почвах. Фоновый мониторинг проводят на землях особо охраняемых природных территорий (ООПТ). Для фоновых почв характерна высокая пространственная вариабельность содержания ТМ и радионуклидов, обусловленная взаимодействием факторов: особенности водного, кислотного, окислительно-восстановительного режимов, гранулометрического, химического и минералогического составов. [2]

Цель работы – проанализировать и обобщить данные мониторинга по содержанию основных ТМ и радионуклидов в почвах и растениеводческой продукции агроэкосистем лесостепной зоны Центрально-Черноземного района России.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Исследования проводили в 2016–2022 годах в лесостепной зоне Белгородской области, расположенной на юго-западе Центрально-Черноземного района (ЦЧР). Самые распространенные в лесостепной зоне почвы – черноземы типичные, которые в структуре пашни занимают 3,52 млн га (32,9%). [11]

На пахотных почвах было заложено 22 разреза чернозема типичного тяжелосуглинистого. В заповеднике «Белогорье» (участок «Ямская степь») на целинном черноземе типичном – один разрез. В пахотных почвах среднее содержание в слое 0...25 см физической глины – 56,8%, органического вещества по Тюрину – 5,6%, рН_{вод} – 6,7, в целинной почве – 57,3, 10,1 и 7,0% соответственно.

Образцы почвы и зерна анализировали в аккредитованной испытательной лаборатории. Удельную активность радионуклидов ²²⁶Ra, ²³²Th, ⁴⁰K, ¹³⁷Cs в почве и зерне озимой пшеницы определяли методом γ-спектрометрии на спектрометре-радиометре гамма-бета-излучений МКГБ-01 «РАДЭК». Валовое содержание элементов (экстрагент 5М HNO₃) и концентрацию их подвижных форм в почве, извлекаемых ацетатно-аммонийным буферным (ААБ) раствором с рН – 4,8, определяли методом атомно-эмиссионной спектрометрии. [6]

Тестовая культура – озимая пшеница, которая в структуре посевных площадей Белгородской обла-

сти в 2016–2020 годах занимала 26,8%. Анализировали 30 проб зерна. Валовое содержание элементов в зерне определяли по общепринятым методикам. [6]

В качестве метода графического представления распределения ТМ и радионуклидов в почве использовали изображение в виде «ящика с усами» (Box-Plot): арифметическое среднее, доверительный интервал к среднему значению ($\bar{x} \pm t_{0,5} s_{\bar{x}}$) – «ящик», размах варьирования – «усы».

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

По валовому содержанию в слое 0...25 см чернозема типичного участка «Ямская степь» государственного заповедника «Белогорье» (фоновая почва) элементы образуют убывающий ряд (мг/кг): Mn (416) > Zn (43,6) > Cu (12,7) > Pb (10,6) > Co (8,8) > As (4,41) > Cd (0,22) > Hg (0,018).

Среднее валовое содержание Co, As, Cd и Pb в пахотных черноземах типичных было сопоставимо с концентрацией этих элементов в фоновой почве. Валовое содержание Hg в целинной почве соответствовало нижнему пределу варьирования концентрации элемента в пахотной почве. Фоновое валовое содержание Zn и Cu было выше, чем их средняя концентрация, но в пределах варьирования этих параметров в пахотных почвах. Фоновая концентрация Mn – немного выше верхнего значения содержания элемента в пахотных почвах (рис. 1).

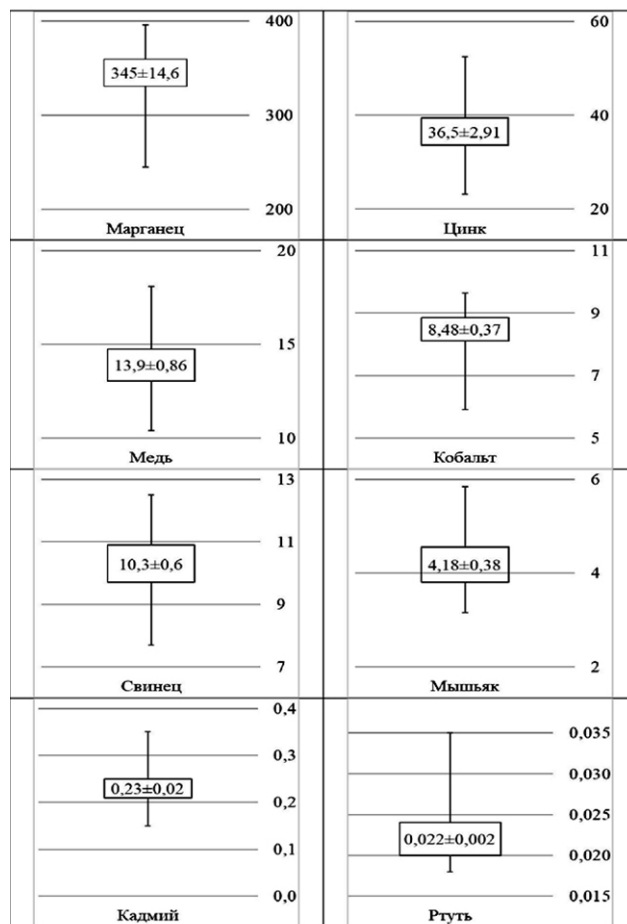


Рис. 1. Валовое содержание ТМ в пахотном слое чернозема типичного, мг/кг.

Таблица 1.

Содержание подвижных форм тяжелых металлов в пахотном черноземе типичном, мг/кг

Элемент	Содержание в фоновой почве	Предельно допустимая концентрация	Уровень низкой обеспеченности	Вариационно-статистические показатели содержания элементов в почве		
				$\bar{x} \pm t_{0,95} s\bar{x}$	lim	V, %
Mn	19,7	140	<10	16,7±2,68	9,30...30,2	36,2
Pb	0,62	6	—	0,44±0,04	0,25...0,59	19,9
Zn	0,69	23	<2	0,39±0,05	0,24...0,68	29,3
Cu	0,10	3	<0,2	0,09±0,01	0,05...0,16	31,9
Co	0,10	5	<0,15	0,08±0,01	0,04...0,15	31,1
Cd	0,05	—	—	0,05±0,01	0,01...0,07	25,9

Превышения уровней предельно-допустимых концентраций (ПДК), установленных для Hg (2,1 мг/кг) и Mn (1500 мг/кг) не наблюдали. Не выявлено превышения уровней ориентировочно-допустимых концентраций (ОДК) в тяжелосуглинистых почвах с рН > 5,5 для Zn (220 мг/кг), Cu (132), Pb (130), As (10) и Cd (2 мг/кг). [8]

Исследуемые черноземы типичные лесостепной зоны характеризуются более низким валовым содержанием ТМ по сравнению с черноземами обыкновенными степной зоны ЦЧР. Это связано, в первую очередь, с более тяжелым гранулометрическим составом почвы и низким выщелачиванием ТМ из пахотного слоя в степной зоне. Например, среднее валовое содержание в пахотных черноземах обыкновенных Mn, Zn, As, Co, Pb и Cd выше, чем в типичных на 52, 6,4, 1,3, 1,03, 0,9 и 0,12 мг/кг соответственно. [7,9,15]

Основной антропогенный источник поступления ТМ в почвы агроэкосистем Белгородской области – органические удобрения. За 2010–2014 годы с ними в почву вносили: Pb – 76,3, Cd – 74,0, Hg – 76,2, As – 41,2% общего поступления. Баланс ТМ был отрицательным. [9]

В 2015–2018 годах с органическими удобрениями в пахотные почвы вносили Mn – 79,3, Zn – 86,3 и Co – 66,6% общего поступления. Баланс Mn и Co – отрицательный, Zn – положительный. [15]

Для прогнозирования накопления ТМ в растениеводческой продукции необходимо иметь ин-

формацию не только об их валовом содержании, но и концентрации подвижных форм в почве. [15] На содержание подвижных форм ТМ сильно влияет кислотность почв. При подщелачивании реакции почвенной среды подвижность большинства ТМ снижается. Для черноземов типичных лесостепной зоны ЦЧР в процессе сельскохозяйственного использования характерно систематическое подкисление в отличие от черноземов обыкновенных степной зоны, которым свойственно подщелачивание. Поэтому содержание подвижных форм большинства ТМ в черноземах типичных несколько выше, чем в обыкновенных. [7, 9, 15]

Среднее содержание подвижных форм Mn, Zn, Cu, Pb и Co в пахотном черноземе типичном было ниже, а Cd соответствовало их концентрации в фоновой почве. Фоновое содержание подвижных соединений Zn и Pb было немного выше верхнего предела варьирования концентраций этих элементов в пахотной почве. Содержание подвижных форм ТМ в пахотных черноземах типичных было значительно ниже значений ПДК (табл. 1). Обеспеченность почв пашни подвижными формами Zn, Cu и Co низкая, что обуславливает целесообразность применения в агротехнологиях микроудобрений, содержащих дефицитные элементы. [15]

Черноземы ЦЧР, несмотря на высокий уровень потенциального плодородия, характеризуются низким уровнем обеспеченности подвижными формами многих микроэлементов. В Липецкой области к категории низкообеспеченных по содержанию подвижных форм относятся Mn – 19,0, Zn – 95,0, Co – 23,0% обследованной пашни. [10] В Воронежской области в группу низкообеспеченных по содержанию подвижных форм Zn, Cu, Co и Mn входят соответственно 99,7, 96,5, 94,7 и 61,0% пахотных почв. [5]

В фоновой почве по удельной активности естественные радионуклиды образуют ряд (Бк/кг): ^{40}K (523) > ^{232}Th (38,2) > ^{226}Ra (18,2). В пахотных почвах средняя удельная активность ^{40}K (530,2 Бк/кг) и ^{232}Th (38,1 Бк/кг) практически совпадала с фоновыми значениями, а ^{226}Ra (23,8) была несколько выше (рис. 2). Удельная активность искусственного радионуклида ^{137}Cs в фоновой почве составляла 22,1 Бк/кг, пахотной – 17,3. С момента Чернобыльской катастрофы большая часть ^{137}Cs уже распалась, поскольку его период полураспада ($T_{1/2}$) – 30,17 года. Определенная часть ^{137}Cs выносятся из почвы с растениеводческой продукцией. Размеры миграции ^{137}Cs за пределы пахотного слоя незначительны.

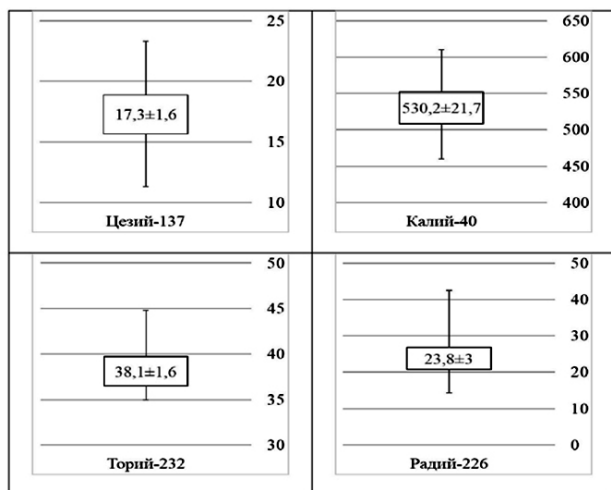


Рис. 2. Удельная активность радионуклидов в пахотном слое чернозема типичного, Бк/кг.

В исследованиях, проведенных спустя 26 лет после выпадений ³⁷Cs, на пахотных дерново-подзолистых песчаных почвах в слое 0...20 см обнаружено 92,2, 20...30 – 7,6, 30...60 см – 0,2% общего количества этого радионуклида. [3]

Очень близкие к нашим результаты по удельной активности ²³²Th и ²²⁶Ra получены в исследованиях по Волгоградской области на пахотных черноземах южных. В слое 0...20 см удельная активность ²³²Th в среднем составляла 40,2 (29,0...52,6 Бк/кг), ²²⁶Ra – 21,1 (13,1...39,8 Бк/кг). Средняя удельная активность ⁴⁰K в данной работе была выше, чем установленная в Белгородской области – 625 (523...798 Бк/кг). [2]

Содержание ТМ и удельная активность радионуклидов в растениеводческой продукции – важнейшие показатели, характеризующие экологическое состояние агроэкосистем. Величины данных параметров сильно варьируют в зависимости от химических особенностей элементов, вида растений, свойств почвы и агротехники возделывания культур. В полевых опытах, проведенных на дерново-подзолистых почвах в Новозыбковском районе Брянской области, в зависимости от применения средств химизации, в зерне озимой ржи содержание Cd изменялось от 0,0073 до 0,0105, Zn – 20,2...30,1 мг/кг, удельная активность ¹³⁷Cs – 15...84 Бк/кг. [3]

По содержанию в зерне озимой пшеницы ТМ образуют убывающий ряд: Mn > Zn > Cu > Pb > Co > Cd > As > Hg. Среднее количество наиболее токсичных элементов Hg, As, Cd и Pb было соответственно в 10,0, 12,5, 2,7 и 1,7 раза ниже допустимых уровней, установленных для продовольственного зерна. Содержание Zn, Cu и Co было соответственно в 2,3, 7,4 и 9,5 раза ниже временных максимально допустимых уровней (ВМДУ) для зерна, поставляемого на кормовые цели (табл. 2).

Таблица 2.

Содержание тяжелых металлов и удельная активность радионуклидов в зерне озимой пшеницы (влажность 14%)

Элемент	Предельно допустимые уровни [12] для зерна, поставляемого на		Вариационно-статистические показатели		
	пищевые цели	кормовые цели	$\bar{x} \pm t_{05} \bar{Sx}$	lim	V, %
Содержание ТМ, мг/кг					
Mn	–	–	23,3±1,47	14,6...32,0	16,3
Zn	–	50*	21,9±2,15	12,4...33,7	26,3
Cu	–	30*	4,08±0,41	2,06...5,4	24,8
Co	–	1,0*	0,105±0,01	0,07...013	15,4
Pb	0,5	5,0	0,298±0,026	0,163...0,378	22,5
Cd	0,1	0,3	0,037±0,0043	0,020...0,052	30,0
As	0,2	0,5	0,016±0,0015	0,011...0,025	24,1
Hg	0,03	0,1	0,003±0,0003	0,002...0,004	22,1
Удельная активность радионуклидов, Бк/кг					
⁴⁰ K	–	–	37,3±1,86	30,1...48,2	11,8
²²⁶ Ra	–	–	6,48±0,50	4,3...10,2	20,3
²³² Th	–	–	5,63±0,37	3,5...6,9	17,4
¹³⁷ Cs	60	180	2,89±0,22	1,6...3,6	20,0

Примечание. *ВМДУ–87 [4].

По величине удельной активности радионуклиды образуют ряд: ⁴⁰K > ²²⁶Ra > ²³²Th > ¹³⁷Cs. Средняя удельная активность искусственного радионуклида ¹³⁷Cs была в 20,7 раза ниже допустимого уровня для продовольственного зерна. Средняя удельная активность естественных радионуклидов ⁴⁰K, ²²⁶Ra и ²³²Th превышала величину данного показателя, установленного для ¹³⁷Cs, соответственно в 12,9, 2,2 и 1,9 раза.

Выводы. Установлено, что по среднему валовому содержанию в пахотных черноземах типичных ТМ выстроены по убыванию (мг/кг) – Mn (345) > Zn (36,5) > Cu (13,9) > Pb (10,3) > Co (8,48) > As (4,18) > Cd (0,23) > Hg (0,022), по содержанию подвижных форм закономерность иная – Mn (16,7) > Pb (0,40) > Zn (0,39) > Cu (0,09) > Co (0,08) > Cd (0,05). По удельной активности радионуклиды образуют ряд (Бк/кг): ⁴⁰K (530,2) > ²³²Th (38,1) > ²²⁶Ra (23,8) > ¹³⁷Cs (17,3). Превышения нормативов ОДК и ПДК изучаемых ТМ в исследуемых пахотных почвах не наблюдали. Обеспеченность пахотных почв подвижными формами Zn, Cu и Co низкая, поэтому для повышения урожайности сельскохозяйственных культур рекомендуется вносить микроудобрения, содержащие эти элементы. В зерне озимой пшеницы количество изучаемых ТМ и удельная активность ¹³⁷Cs были существенно ниже предельно допустимых уровней.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Алексеев Ю. В. Тяжелые металлы в агроландшафте. СПб.: Изд-во ПИЯФ РАН, 2008. 216 с. ISBN: 978-5-86763-213-7.
2. Апарин Б.Ф., Мингареева Е.В., Санжарова Н.И., Сухачева Е.Ю. Содержание радионуклидов (²²⁶Ra, ²³²Th, ⁴⁰K, ¹³⁷Cs) в черноземах Волгоградской области разных сроков отбора образцов // Почвоведение. 2017. № 12. С. 1457–1467.
3. Белоус И.Н. Научное обоснование систем удобрения озимой ржи в условиях радиоактивного загрязнения дерново-подзолистых песчаных почв юго-запада Центральной России. Автореф. дис. ...докт. с.-х. наук. М.: ВНИА имени Д.Н. Прянишникова, 2022. 50 с.
4. ВМДУ–87 «Временный максимально допустимый уровень содержания некоторых химических элементов и госсипола в кормах для сельскохозяйственных животных и кормовых добавках», 1987.
5. Корчагин В.И. Эколого-агрохимическая оценка плодородия почв Воронежской области. Автореф. дис.... канд. с.-х. наук. Воронеж, 2017. 28 с.
6. Методические указания по определению тяжелых металлов в почвах сельхозугодий и продукции растениеводства. М.: Типография Московской с.-х. академии им. К.А. Тимирязева, 1992. 61 с.
7. Протасова Н.А., Щербаков А.П. Микроэлементы (Cr, V, Ni, Mn, Zn, Cu, Co, Ti, Zr, Ga, Be, Sr, Ba, B, I, Mo) в черноземах и серых лесных почвах Центрального Черноземья. Воронеж: Изд-во Воронежского государственного университета, 2003. 368 с.
8. СанПиН 1.2.3685-21 «Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания». Утверждены Постановлением Главного государственного санитарного врача РФ от 28.01.2021. № 2.

9. Селюкова С.В. Экологическая оценка содержания свинца, кадмия, ртути и мышьяка в агроэкосистемах юго-западной части Центрально-Черноземного района России. Автореф. дис. ... канд. биол. наук. М.: РГАУ – МСХА имени К.А. Тимирязева, 2019. 25 с.
10. Сискевич Ю.И., Никоноренков В.А., Долгих О.В. и др. Почвы Липецкой области / Липецк: Изд-во ООО «Позитив Л», 2018. 209 с. ISBN 978-5-6041045-9-0.
11. Соловichenко В.Д., Тютюнов С.И., Уваров Г.И. Воспроизводство плодородия почв и рост продуктивности сельскохозяйственных культур Центрально-Черноземного региона. Белгород: «Отчий край», 2012. 256 с.
12. ТРТС015/2011 Технический регламент Таможенного союза «О безопасности зерна» (с изменениями на 15 сентября 2017 года) Технический регламент Таможенного союза от 09.12.2011 N015/2011. Режим доступа docs.cntd.ru/document/902320395 (дата обращения 10.11.2022).
13. Черных Н.А., Овчаренко М.М. Тяжелые металлы и радионуклиды в биогеносах. М.: Агроконсалт, 2003. 200 с.
14. Kabata-Pendias A. Trace Elements in Soils and Plants, 2011. P. 41.
15. Lukin S.V., Zhuikov D.V. Monitoring of the Contents of Manganese, Zinc, and Copper in Soils and Plants of the Central Chernozemic Region of Russia // Eurasian Soil Science. 2021. Vol. 54. No 1. P. 63–71. DOI: 10.1134/S1064229321010099.
5. Korchagin V.I. Ekologo-agrohimicheskaya ocenka plodorodiya pochv Voronezhskoj oblasti. Avtoref. dis. ...kand. s.-h. nauk. Voronezh, 2017. 28 s.
6. Metodicheskie ukazaniya po opredeleniyu tyazhyolyh metallov v pochvah sel'hozugodij i produkcii rastenievodstva. M.: Tipografiya Moskovskoj s.-h. akademii im. K.A. Timiryazeva, 1992. 61 s.
7. Protasova N.A., Shcherbakov A.P. Mikroelementy (Cr, V, Ni, Mn, Zn, Cu, Co, Ti, Zr, Ga, Be, Sr, Ba, B, I, Mo) v chernozyomah i seryh lesnyh pochvah Central'nogo Chernozem'ya. Voronezh: Izd-vo Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta, 2003. 368 s.
8. SanPiN 1.2.3685-21 “Gigienicheskie normativy i trebovaniya k obespecheniyu bezopasnosti i (ili) bezvrednosti dlya cheloveka faktorov sredy obitaniya”. Utverzhdeny Postanovleniem Glavnogo gosudarstvennogo sanitarnogo vracha RF ot 28.01.2021. № 2.
9. Selyukova S.V. Ekologicheskaya ocenka soderzhaniya svinca, kadmiya, rtuti i mysh'yaka v agroekosistemah yugo-zapadnoj chasti Central'no-Chernozemnogo rajona Rossii. Avtoref. dis. ... kand. biol. nauk. M.: RGAU – MSKHA imeni K.A. Timiryazeva, 2019. 25 s.
10. Siskevich Yu.I., Nikonorenkov V.A., Dolgih O.V. i dr. Pochvy Lipeckoj oblasti / Lipeck: Izd-vo ООО “Pozitiv L”, 2018. 209 s. ISBN 978-5-6041045-9-0.
11. Solovichenko V.D., Tyutyunov S.I., Uvarov G.I. Vosproizvodstvo plodorodiya pochv i rost produktivnosti sel'skohozyajstvennyh kul'tur Central'no-Chernozemnogo regiona. Belgorod: “Otchij kraj”, 2012. 256 s.
12. TRTS015/2011 Tekhnicheskij reglament Tamozhennogo soyuza “O bezopasnosti zerna” (s izmeneniyami na 15 sentyabrya 2017 goda) Tekhnicheskij reglament Tamozhennogo soyuza ot 09.12.2011 N015/2011. Rezhim dostupa docs.cntd.ru/document/902320395 (data obrashcheniya 10.11.2022).
13. Chernykh N.A., Ovcharenko M.M. Tyazhelye metally i radionuklidy v biogeocenoazah. M.: Agrokonsalt, 2003. 200 s.
14. Kabata-Pendias A. Trace Elements in Soils and Plants, 2011. R. 41.
15. Lukin S.V., Zhuikov D.V. Monitoring of the Contents of Manganese, Zinc, and Copper in Soils and Plants of the Central Chernozemic Region of Russia // Eurasian Soil Science. 2021. Vol. 54. No 1. P. 63–71. DOI: 10.1134/S1064229321010099.

REFERENCES

1. Alekseev Yu. V. Tyazhelye metally v agrolandshafte. SPb.: Izd-vo PIYAF RAN, 2008. 216 s. ISBN: 978-5-86763-213-7.
2. Aparin B.F., Mingareeva E.V., Sanzharova N.I., Suhacheva E.Yu. Soderzhanie radionuklidov (²²⁶Ra, ²³²Th, ⁴⁰K, ¹³⁷Cs) v chernozemah Volgogradskoj oblasti raznyh srokov otbora obrazcov // Pochvovedenie. 2017. № 12. S. 1457–1467.
3. Belous I.N. Nauchnoe obosnovanie sistem udobreniya ozimnoj rzhii v usloviyah radioaktivnogo zagryazneniya derno-vo-podzolistykh peschannyh pochv yugo-zapada Central'noj Rossii. Avtoref. dis. ...dokt. s.-h. nauk. M.: VNIA imeni D. N. Pryanishnikova, 2022. 50 s.
4. VMDU-87 “Vremennyj maksimal'no dopustimyj uroven' soderzhaniya nekotoryh himicheskikh elementov i gossipola v kormah dlya sel'skohozyajstvennyh zhivotnyh i kormovyh dobavkah”, 1987.

Поступила в редакцию 16.01.2023

Принята к публикации 30.01.2023