

УДК 632.122.1:546.47:546.56:546.77(470.32)

МОНИТОРИНГ СОДЕРЖАНИЯ КАДМИЯ В АГРОЭКОСИСТЕМАХ ЦЕНТРАЛЬНО-ЧЕРНОЗЕМНОГО РАЙОНА РОССИИ

© 2023 г. С. В. Лукин^{1,2,*}

Представлено академиком РАН В.И. Кирюшиным 05.04.2023 г.

Поступило 05.04.2023 г.

После доработки 10.04.2023 г.

Принято к публикации 14.04.2023 г.

В рамках выполнения государственной программы агроэкологического мониторинга изучали содержание кадмия в основных компонентах агроэкосистем лесостепной зоны Белгородской области, которая расположена на юго-западе Центрально-Черноземного района. Почвенный покров в основном был представлен черноземами выщелоченными и типичными. В ходе исследований было установлено, что в слое 0–20 см пахотного чернозема выщелоченного среднее валовое содержание Cd составляет 0.32, концентрация подвижных форм — 0.08 мг/кг, что соответствует фоновым значениям и существенно ниже уровня ориентировочно-допустимых концентраций (ОДК). Превышение фоновых концентраций этого элемента установлено в почвах придорожных экосистем на расстоянии до 60 м от автодорожного полотна. Основное количество Cd поступает в агроэкосистемы Белгородской области с органическими удобрениями, однако это не представляет опасности для загрязнения почв и растениеводческой продукции. Из изучаемых сельскохозяйственных культур минимальное количество данного элемента содержится в зерне белого люпина (0.011 мг/кг), а максимальное — в семенах подсолнечника (0.086 мг/кг). Среднее содержание Cd в зерне кукурузы, ячменя и озимой пшеницы существенно не различалось и было в пределах 0.037–0.042 мг/кг. В сене клевера и люцерны среднее содержание этого металла было практически одинаковым 0.012–0.013 мг/кг, что существенно ниже, чем в естественном разнотравье (0.045 мг/кг). В изучаемой растениеводческой продукции не выявлено превышения уровней ПДК Cd для продовольственного зерна и МДУ для кормов.

Ключевые слова: агроэкологический мониторинг, кадмий, придорожные экосистемы, сельскохозяйственные культуры, тяжелые металлы, чернозем, удобрения

DOI: 10.31857/S2686739723600704, **EDN:** WGLDUJ

ВВЕДЕНИЕ

Среди тяжелых металлов (ТМ) одним из самых токсичных для живых организмов и наиболее подвижным в системе почва–растение является кадмий. Этот элемент относится к классу высокоопасных веществ, все его соединения токсичны. Он всегда содержится в организме животных и растений, но его роль и необходимость для протекания биохимических процессов пока не установлены. Однако хорошо изучена фитотоксичность Cd, которая выражается в тормозящем действии на фотосинтез, нарушении транспирации и фиксации углекислого газа, ингибировании раз-

личных биохимических процессов. Это во многом объясняется тем, что Cd по химическим свойствам близок к Zn и может заменять его в различных ферментах, нарушая тем самым их работу [1, 2].

Содержащие Cd минералы не образуют рудных скоплений, а встречаются как спутники цинка в цинковых и полиметаллических рудах. По оценкам разных ученых, кларк элемента в почвах составляет от 0.41 мг/кг [2] до 0.5 мг/кг [3]. Из почвообразующих пород наиболее высокое содержание Cd характерно для глин и лессов, наименьшее — для песков и супесей [4].

К основным источникам загрязнения биосферы этим элементом относятся предприятия цветной металлургии, по производству и утилизации никель-кадмиевых аккумуляторов, тепловые электростанции, работающие на угле и мазуте. Большое количество Cd поступает в атмосферу при сжигании резины и пластмасс [1, 2]. Загрязнение почв может происходить при бесконтроль-

¹Центр агрохимической службы “Белгородский”, Белгород, Российская Федерация

²Белгородский государственный национальный исследовательский университет, Белгород, Российская Федерация

*E-mail: serg.lukin2010@yandex.ru

ном использовании осадков сточных вод в качестве удобрений.

Учитывая высокую токсичность и подвижность соединений Cd в странах Европы, США, Канаде, ЮАР, Австралии [5], Китае [6], нормируется валовое содержание этого ТМ в почвах. В России для нормирования валового содержания Cd в почвах установлены уровни ориентировочно-допустимых концентраций (ОДК). Для тяжелосуглинистых почв с pH_{KCl} менее 5.5 ОДК Cd составляет 1.0, а для почв с pH_{KCl} более 5.5—2.0 мг/кг. ОДК для песчаных и супесчаных почв с pH_{KCl} менее 5.5 установлена на уровне 0.5 мг/кг, что соответствует кларку этого элемента [7]. Предельно допустимая концентрация (ПДК) подвижных форм этого ТМ в почвах российскими нормативами не установлена, что создает большие трудности для корректной экологической оценки загрязнения земель сельскохозяйственного назначения. Поскольку большое количество этого элемента в организм человека поступает с продуктами питания, нормируется его содержание в пищевых продуктах и кормах для животных [8, 9].

Учитывая высокую токсичность Cd, программой государственного агроэкологического мониторинга предусмотрено определение его содержания в основных компонентах агроэкосистем [10].

Цель работы — провести экологическую оценку содержания кадмия в пахотных почвах, удобрениях и растениеводческой продукции.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Основные исследования проводились в 2016—2022 гг. в лесостепной зоне Белгородской области, расположенной на юго-западе Центрально-Черноземного района (ЦЧР). Самыми распространенными почвами в этой зоне являются черноземы выщелоченные и типичные. В качестве фонового объекта был выбран целинный участок “Ямская степь” государственного заповедника “Белогорье”, где были отобраны образцы чернозема выщелоченного. На пахотных черноземах выщелоченных лесостепной зоны было заложено 20 реперных участков. Отбор почвенных проб проводился в соответствии с общепринятой в агрохимической службе методикой [11].

В пахотных черноземах выщелоченных среднее содержание в слое 0—20 см физической глины составляло 56.8%, органического вещества по Тюрину — 5.6%, pH_{KCl} — 5.3, а в целинной почве — соответственно 56.4, 9.7 и 5.3%. В черноземе типичном придорожной экосистемы (слой 0—20 см) среднее содержание физической глины составляло 55.2%, органического вещества — 5.3%, pH_{KCl} — 5.6.

Содержание Cd в образцах почвы, растениеводческой продукции удобрений определялось методом атомно-эмиссионной спектрометрии на

приборе ICPE-9000 “Shimadzu” по общепринятым в агрохимической службе методикам [12]. Для извлечения из почвы валового Cd использовали 5М HNO_3 , подвижных форм этого элемента — ацетатно-аммонийный буферный (ААБ) раствор с pH 4.8. Все химические анализы были выполнены в аккредитованной испытательной лаборатории ФГБУ ЦАС “Белгородский”.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Кадмий в почвах. Фоновый уровень валового содержания Cd в верхней части (10—20 см) гумусово-аккумулятивного горизонта (А) целинного чернозема выщелоченного участка “Ямская степь” заповедника “Белогорье” составляет 0.33, а концентрация подвижных форм этого элемента — 0.07 мг/кг (21.2% от валового содержания).

В пахотном черноземе выщелоченном (слой 0—20 см) среднее валовое содержание Cd составляет 0.32, концентрация подвижных форм — 0.08 мг/кг (25% от валового содержания), что практически соответствует величинам данных параметров в фоновой почве. Содержание этого элемента в слоях 0—20 и 21—40 см пахотной почвы достоверно не различалось (рис. 1). Общие запасы Cd в пахотном слое почв (массой 3000 т/га) оцениваются в 0.96 кг/га, подвижных форм — 0.24 кг/га.

В Липецкой области в целинных черноземах оподзоленном и выщелоченном (горизонт А) среднее содержание подвижных форм Cd составляет соответственно 0.06 и 0.04 мг/кг, а в пахотных аналогах этих почв — 0.04 и 0.03—0.08 мг/кг [13]. В пахотных черноземах Саратовской области содержание подвижного Cd составляет 0.03—0.07 мг/кг [1].

Многочисленные результаты исследований свидетельствуют о загрязнении почв придорожных экосистем Cd в результате изнашивания автомобильных шин [1, 14]. Основными факторами, определяющими уровень загрязнения почв, являются: особенности рельефа местности, интенсивность движения автотранспорта и длительность воздействия на экосистему. Результаты наших исследований по изучению содержания Cd в черноземе типичном придорожной экосистемы свидетельствуют, что наиболее высокое валовое содержание (1.22 мг/кг) и концентрация подвижных форм Cd (0.42 мг/кг) в слое почвы 0—20 см наблюдаются на расстоянии 5 м от автомобильного полотна. С увеличением расстояния до 60 м содержание Cd линейно снижается до уровня незагрязненной почвы (рис. 2).

Данная закономерность с высокой точностью описывается следующими математическими моделями:

$$Cd(\text{вал.}) = -0.015x + 1.30 (R^2 = 0.94);$$

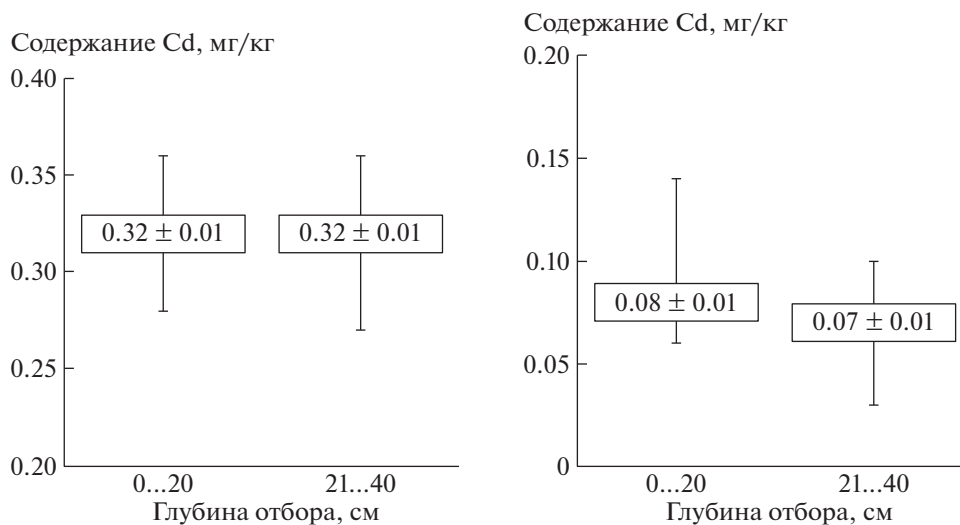


Рис. 1. Содержание кадмия в черноземах выщелоченных, мг/кг.

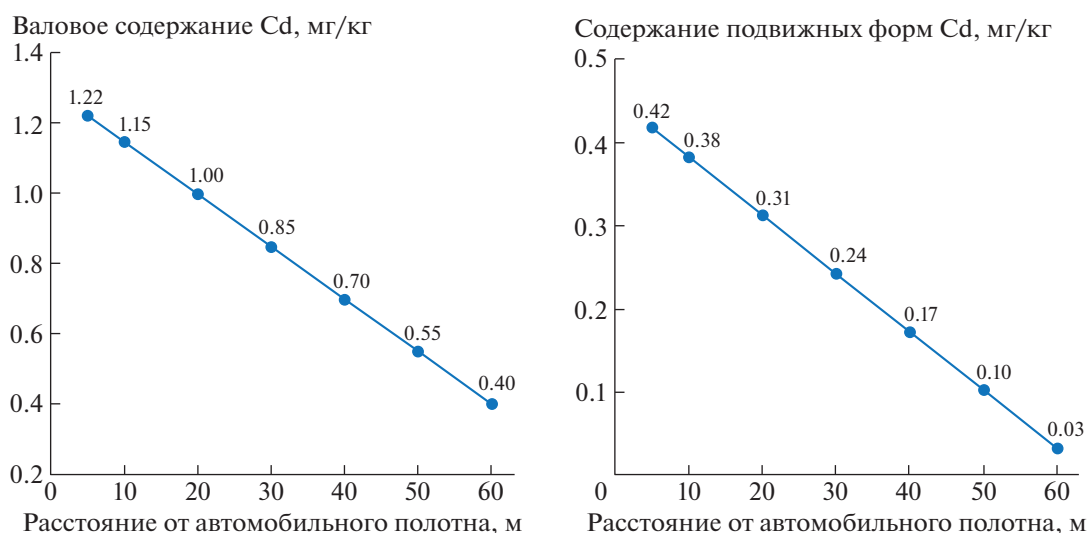


Рис. 2. Влияние расстояния от автомобильного полотна на содержание кадмия в почве (слой 0–20 см) придорожной экосистемы (автодорога М2 “Крым”, Белгородский район).

$$Cd(\text{подв.}) = -0.007x + 0.45 \quad (R^2 = 0.91),$$

где $Cd(\text{вал.})$ – валовое содержание Cd (мг/кг), $Cd(\text{подв.})$ – содержание подвижных форм Cd (мг/кг), x – расстояние от автополотна (м).

Превышения уровня ОДК валового Cd в почвах (2 мг/кг) зафиксировано не было. Кроме того, придорожные полосы федеральных автомагистралей, таких как М2, обычно заняты естественной растительностью и лесополосами, поэтому в сельскохозяйственном производстве не используются.

Кадмий в удобрениях и мелиорантах. В некоторых зарубежных странах, в частности Австралии и Китае, содержащийся в фосфорных удобрениях

Cd является существенным источником загрязнения почв [15]. Отечественное рудное сырье, используемое для производства фосфорных удобрений, является одним из самых качественных в мире и характеризуется достаточно низким содержанием Cd. Поэтому использование российских минеральных удобрений не следует рассматривать как важный источник загрязнения почв Cd [4]. По нашим данным, среднее содержание Cd в аммиачной селитре составляет 0.04 мг/кг, а в азофоске – 0.10 мг/кг. При средних дозах внесения минеральных удобрений 88–156 кг/га действующего вещества (д.в.), которые зафиксированы в областях ЦЧР в 2016–2020 гг., размеры поступления Cd оцениваются нами в 0.09–0.16 г/га.

Таблица 1. Содержание кадмия в удобрениях и мелиорантах, мг/кг

Вид удобрения	Содержание сухого вещества, %	Вариационно-статистические показатели			
		n	$\bar{x} \pm t_{05} s \bar{x}$	lim	V, %
Стоки навозные	2.22	56	0.008 ± 0.001	0.004–0.012	28.7
Компост соломопометный	56	30	0.14 ± 0.02	0.08–0.24	28.3
Навоз КРС	25	28	0.06 ± 0.006	0.04–0.09	27.1
Дефекат	87	20	0.30 ± 0.02	0.21 ± 0.37	15.5

По оценкам других авторов, при внесении дозы минеральных удобрений 100–200 кг д.в./га размеры поступления этого элемента находятся в пределах 0.20–0.30 г/га [4].

Значимым источником поступления Cd в агроценозы являются органические удобрения. В современных агротехнологиях навоз крупного рогатого скота (КРС) и компосты соломопометные рекомендуются вносить один раз в 4–5 лет, а стоки навозные — не чаще чем один раз в 2 года. При внесении средних доз навоза КРС 40 т/га, компоста соломопометного 20 т/га, стоков навозных 70 т/га поступление Cd в почву составляет соответственно 2.40, 2.80, 0.56 г/га, что приводит к повышению валовых запасов этого металла в пахотном слое всего на 0.25, 0.29, 0.06% (табл. 1). Однако в целом по России уровень внесения органических удобрений достаточно низок. Например, средние дозы их внесения (в пересчете на навоз КРС) в областях ЦЧР в 2016–2020 гг. составляли от 0.23 т/га (Тамбовская область) до 8.83 т/га (Белгородская область), и с ними в почву поступает соответственно 0.01 и 0.53 г/га Cd.

По сравнению с традиционными органическими удобрениями, достаточно много валового Cd содержится в дефекате, широко используемом для мелиорации кислых почв. В ЦЧР средние дозы внесения этого мелиоранта составляют 8–12 т/га, а периодичность — 1 раз в 10 лет. В среднем за 2016–2020 гг. известкование в ЦЧР проводилось на сравнительно небольшой площади — 132 тыс. га/год (1.5% от посевной площади) [16]. Поэтому Cd, поступающий в известкованные почвы с дефекатом в количестве 3.0–3.6 г/га, не представляет серьезной опасности для загрязнения почв.

По литературным данным, среднегодовые потери Cd со смытой в результате эрозии почвой в агроэкосистемах Белгородской области оцениваются в 0.61 г/га, что превышает размеры его поступления, поэтому формируется отрицательный баланс этого элемента [17].

Кадмий в сельскохозяйственных культурах. В растениях наибольшее количество Cd содержится в корнях, существенно меньше в надземных и особенно в генеративных органах. Например, содержание Cd в побочной продукции подсолнечника

и сои соответственно в 1.4 и 1.2 раза выше, чем в основной (семенах и зерне) [17].

В наших исследованиях наиболее высоким средним содержанием Cd (0.086 мг/кг) характеризуются семена подсолнечника (табл. 2). В зерне озимой пшеницы, ячменя и кукурузы достоверных различий по содержанию этого ТМ не выявлено. В среднем зерно этих культур содержало 0.037–0.042 мг/кг Cd, что более чем в два раза меньше, чем семена подсолнечника. Среди зернобобовых культур самое высокое содержание этого элемента установлено в зерне сои (0.062 мг/кг), существенно ниже была его концентрация в зерне гороха (0.034 мг/кг) и белого люпина (0.011 мг/кг). Для зерна и семян подсолнечника, используемых на пищевые цели, установлены ПДК этого металла, составляющие соответственно 0.1 и 0.2 мг/кг [8]. В наших исследованиях превышения ПДК не наблюдалось.

В многолетних бобовых травах накапливалось примерно одинаковое количество Cd 0.012–0.013 мг/кг. В целинном степном разнотравье участка “Ямская степь” среднее содержание Cd составляло 0.045 мг/кг, что более чем в 3.5 раза выше, чем в бобовых травах. Содержание Cd в кукурузном силосе в среднем составляло 0.012 мг/кг. Для оценки качества грубых и сочных кормов, корнеклубнеплодов установлен максимально допустимый уровень (МДУ) содержания Cd, равный 0.3 мг/кг [9]. Среднее содержание элемента в корнеплодах сахарной свеклы, кукурузном силосе, сене клевера и люцерны было в 23–27 раз ниже МДУ. Установленные закономерности содержания Cd в основном обусловлены биологическими особенностями изучаемых культур.

В 2016–2020 гг. в Белгородской области средняя урожайность озимой пшеницы составляла 4.89, ячменя — 3.65, кукурузы — 7.04, подсолнечника — 2.89, сои — 2.22, сена многолетних трав — 3.0, сахарной свеклы — 44.8 т/га [17], а отчуждение Cd из агроэкосистем с основной продукцией этих культур составляло соответственно 0.21, 0.14, 0.27, 0.25, 0.14, 0.04, 0.49 г/га.

В исследованиях, проведенных на территории Средней Сибири, содержание Cd в зерне яровой пшеницы находилось в пределах 0.020–0.023, сене многолетних бобовых трав — 0.028–0.110, сене

Таблица 2. Содержания кадмия в продукции сельскохозяйственных культур, мг/кг

Сельскохозяйственная культура	Вид продукции	Содержание влаги, %	Вариационно-статистические показатели			
			n	$\bar{x} \pm t_{0.5} s \bar{x}$	lim	V, %
Озимая пшеница	Зерно	14	69	0.042 ± 0.003	0.022–0.068	29.0
Ячмень	Зерно	14	63	0.037 ± 0.003	0.020–0.060	29.6
Кукуруза	Зерно	14	73	0.039 ± 0.003	0.010–0.053	26.1
Соя	Зерно	14	55	0.062 ± 0.004	0.015–0.083	25.7
Горох	Зерно	14	20	0.034 ± 0.004	0.015–0.050	28.5
Белый люпин	Зерно	14	20	0.011 ± 0.002	0.005–0.016	26.9
Подсолнечник	Семена	7	25	0.086 ± 0.010	0.071–0.155	29.6
Сахарная свекла	Корнеплоды	75	20	0.011 ± 0.002	0.006–0.018	30.3
Кукуруза	Силос	70	22	0.012 ± 0.002	0.007–0.019	29.0
Клевер	Сено	16	20	0.012 ± 0.001	0.008–0.017	19.3
Люцерна	Сено	16	20	0.013 ± 0.002	0.009–0.019	22.1
Степное разнотравье “Ямская степь”	Сено	16	20	0.045 ± 0.001	0.040–0.050	5.4

естественных угодий — 0.026–0.140 мг/кг [18]. По обобщенным данным из разных стран мира, содержание Cd в зерне пшеницы находится в пределах 0.02–0.07 мг/кг [2]. Среднее содержание этого элемента в семенах подсолнечника составляет 0.14 мг/кг [1].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, установлено, что в слое 0–20 см пахотного чернозема выщелоченного лесостепной зоны ЦЧР среднее валовое содержание Cd составляет 0.32, концентрация подвижных форм — 0.08 мг/кг, что соответствует фоновым значениям и существенно ниже уровня ОДК. Содержание Cd в слоях пахотной почвы 0–20 и 21–40 см было практически одинаковым. Превышение фоновых концентраций этого элемента установлено в почвах придорожных экосистем на расстоянии до 60 м от автодорожного полотна. Основное количество Cd поступает в агроэкосистемы Белгородской области с органическими удобрениями, однако это не представляет опасности для загрязнения почв и растениеводческой продукции. Из изучаемых культур минимальное количество данного элемента содержится в зерне белого люпина (0.011 мг/кг), а максимальное — в семенах подсолнечника (0.086 мг/кг). Среднее содержание Cd в зерне кукурузы, ячменя и озимой пшеницы существенно не различалось и было в пределах 0.037–0.042 мг/кг. В сене клевера и люцерны среднее содержание этого металла было практически одинаковым 0.012–0.013 мг/кг, что существенно ниже, чем в естественном разнотравье (0.045 мг/кг). В изучаемой растениеводческой продукции не выявлено

превышения уровней ПДК Cd для продовольственного зерна и МДУ для кормов.

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Исследования выполнены за счет федеральных средств в рамках государственного задания на проведение агроэкологического мониторинга земель сельскохозяйственного назначения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Медведев И.Ф., Деревягин С.С.* Тяжелые металлы в экосистемах / Саратов: “Ракурс”, 2017. 178 с.
2. *Kabata-Pendias A.* Trace Elements in Soils and Plants. 2011. 505 p.
3. *Виноградов А.П.* Геохимия редких и рассеянных химических элементов в почвах. М.: изд-во АН СССР, 1957. 238 с.
4. *Шеуджен А.Х.* Агробиогеохимия чернозема. Майкоп: ООО “Полиграф-ЮГ”, 2018. 308 с.
5. *Semenkov I.N., Koroleva T.V.* International Environmental Legislation on the Content of Chemical Elements in Soils: Guidelines and Schemes // Eurasian Soil Science. 2019. V. 52, No 10. P. 1289–1297. <https://doi.org/10.1134/S1064229319100107>
6. *Chen Sh., Wang M., Li Sh., Zhao Zh., E W.* Overview on current criteria for heavy metals and its hint for the revision of soil environmental quality standards in China // J. Integrative Agriculture. 2018. V. 17. № 4. P. 765–774.
7. 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.

8. 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 03.02.2023).
9. ВМДУ-87 “Временный максимально допустимый уровень содержания некоторых химических элементов и госсипола в кормах для сельскохозяйственных животных и кормовых добавках”. 1987.
10. Lukin S.V., Selyukova S.V. Ecological Assessment of the Content of Cadmium in Soils and Crops in South-western Regions of the Central Chernozemic Zone, Russia // Eurasian Soil Science. 2018. V. 51. № 12. P. 1547–1553.
<https://doi.org/10.1134/S1064229318120074>
11. Методические указания по проведению комплексного мониторинга плодородия почв земель сельскохозяйственного назначения / В.Г. Сычев, А.Н. Аристархов, И.В. Володарская и др. М.: МСХ, 2003. 195 с.
12. 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.
13. Почвы Липецкой области / Ю.И. Сискевич, В.А. Никоноренков, О.В. Долгих и др. Липецк: Изд-во ООО “Позитив Л”, 2018. 209 с.
14. Levels and Factors of the Accumulation of Metals and Metalloids in Roadside Soils, Road Dust, and Their PM10 Fraction in the Western Okrug of Moscow / D.V. Vlasov, O.V. Kukushkina, N.E. Kosheleva, N.S. Kasimov // Eurasian Soil Science. 2022. V. 55. № 5. P. 556–572.
<https://doi.org/10.1134/S1064229322050118>
15. Wang Q., Dong Y., Cui Y., Liu X. Instances of soil and crop heavy metals contamination in China // Soil Sediment Contam., 2001. V. 10. P. 497–510.
16. Селюкова С.В. Экологическая оценка содержания свинца, кадмия, ртути и мышьяка в агроэкосистемах юго-западной части Центрально-Черноземного района России. Автореферат на соискание ученой степени кандидата биологических наук. М.: РГАУ–МСХА им. К.А. Тимирязева, 2019. 25 с.
17. <http://www.fedstat.ru/indicators/stat.do> (дата обращения 24.03.2023).
18. Побилат А.Е., Волошин Е.И. Кадмий в почвах и растениях Средней Сибири // Микроэлементы в медицине. 2017. № 18 (3). С. 36–41.

MONITORING OF CADMIUM CONTENT IN AGROECOSYSTEMS OF CENTRAL CHERNOZEM REGION OF RUSSIA

S. V. Lukin^{a,b,#}

^aBelgorod Center for Agrochemical Service, Belgorod, Russian Federation

^bBelgorod State National Research University, Belgorod, Russian Federation

[#]E-mail: serg.lukin2010@yandex.ru

Presented by Academician of the RAS V.I. Kiryushin April 5, 2023

As part of the implementation of the state program of agroecological monitoring, the content of Cd in the main components of the agroecosystems of the forest-steppe zone of the Belgorod region, which is located in the south-west of the Central Black Earth region, was studied. The soil cover was mainly represented by leached and typical chernozems. During the studies, it was found that in the layer of 0–20 cm of arable black soil leached, the average gross content of Cd is 0.32, the concentration of mobile forms is 0.08 mg/kg, which corresponds to background values and significantly below the level of APC. The excess of background concentrations of this element was found in the soils of roadside ecosystems at a distance of up to 60 m from the roadbed. The main amount of Cd enters the agroecosystems of the Belgorod region with organic fertilizers, but this does not pose a danger to soil contamination and crop production. Of the crops studied, the minimum amount of this element is contained in the white lupine grain (0.011 mg/kg), and the maximum amount is contained in sunflower seeds (0.086 mg/kg). The average Cd content of corn, barley and winter wheat grains did not differ significantly and ranged from 0.037 to 0.042 mg/kg. In clover and alfalfa hay, the average content of this metal was almost the same as 0.012–0.013 mg/kg, which is significantly lower than in natural forbs (0.045 mg/kg). In the studied crop production, there was no excess of MAC Cd levels for food grains and MAL for feed.

Keywords: agroecological monitoring, cadmium, roadside ecosystems, agricultural crops, heavy metals, chernozem, fertilizers