

Читать
онлайн
Read
onlineВоронина Л.П.^{1,2}, Поногайбо К.Э.¹, Абрамов Е.Г.¹, Кирьякова Н.А.¹,
Савостикова О.Н.¹

К нормированию кадмия в почве по его воздействию на растения

¹ФГБУ «Центр стратегического планирования и управления медико-биологическими рисками здоровью»
Федерального медико-биологического агентства, 119121, Москва, Россия;²ФГБОУ ВО «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова», 119991, Москва, Россия

Введение. В статье обсуждается влияние разных концентраций кадмия (Cd) в почве с учётом установленных ПДОК и их влияния на растения (изменение биомассы, аккумуляция Cd в растениях).

Материалы и методы. На первом этапе экспериментальных исследований по определению предварительного воздействия Cd в концентрациях 0,5; 1; 2,5; 5 мг/кг на растения *Avena sativa* L. и *Sinapis alba* L. использовали метод фитотестирования. На втором этапе в серии вегетационных экспериментов использованы культуры *Lactuca sativa* var. *capitata* и *Hordeum vulgare* L. Концентрацию Cd увеличивали до 15 мг/кг.

Результаты. Выраженный уровень токсичности (> 50%) в предварительных экспериментах на дерново-подзолистой почве начинает проявляться в концентрации Cd выше 5 мг/кг. Результаты вегетационных исследований свидетельствуют, что при внесении Cd как в форме ГСО, так и в виде растворов соли Cd(NO₃)₂ устанавливается его выраженное негативное воздействие. Биомасса растений ячменя и салата снижается на 54 и 36% соответственно, если Cd поступал в почву форме ГСО, и на 35 и 44%, если в форме Cd(NO₃)₂. Увеличение содержания Cd в почве ~ 8–13 мг/кг сопровождалось высоким уровнем его накопления в растениях и соответствовало 18,5–33 мкг/г.

Ограничения исследования. При изучении влияния Cd в концентрациях 0,5–15 мг/кг в почве на растения в остром и хроническом экспериментах использованы овёс и горчица, ячмень и салат. Для нормирования химического элемента в системе «почва – растение» следует стремиться к расширению продолжительности исследования и разнообразию выбора культур.

Заключение. Испытуемые дозы Cd могут оказать определённое негативное воздействие и повысить риск для здоровья человека. Дозы Cd, соответствующие ОДК этого элемента в почве, снижают качество растительного материала, что подтверждается его высокими концентрациями.

Ключевые слова: формы Cd в почве; накопление Cd в растениях; фитотестирование; вегетационный опыт

Соблюдение этических стандартов. Настоящее исследование не требует представления заключения комитета по биомедицинской этике или иных документов.

Для цитирования: Воронина Л.П., Поногайбо К.Э., Абрамов Е.Г., Кирьякова Н.А., Савостикова О.Н. К нормированию кадмия в почве по его воздействию на растения. *Гигиена и санитария*. 2023; 102(11): 1154–1162. <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2023-102-11-1154-1162> <https://elibrary.ru/gttxpmx>

Для корреспонденции: Воронина Людмила Петровна, доктор биол. наук, доцент, вед. науч. сотр. отд. физико-химических исследований и экотоксикологии ФГБУ «ЦСП» ФМБА России. E-mail: LVoronina@cspmz.ru

Участие авторов: Воронина Л.П. – концепция и дизайн исследования, сбор и обработка материала, написание текста, редактирование; Поногайбо К.Э. – сбор и обработка материала, написание текста, редактирование; Абрамов Е.Г. – сбор и обработка материала, редактирование; Кирьякова Н.А. – концепция и дизайн исследования; Савостикова О.Н. – редактирование. Все соавторы – утверждение окончательного варианта статьи, ответственность за целостность всех частей статьи.

Конфликт интересов. Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов в связи с публикацией данной статьи.

Финансирование. Исследования выполнены в рамках государственного задания по теме «Оценка риска воздействия противогололёдных материалов на здоровье человека и объекты окружающей среды при их применении на урбанизированных территориях» в ФГБУ «ЦСП» ФМБА России.

Поступила: 26.04.2023 / Принята к печати: 26.09.2023 / Опубликована: 08.12.2023

Lyudmila P. Voronina^{1,2}, Ksenia E. Ponogaybo¹, Eugene G. Abramov¹, Nadezhda A. Kiryakova¹,
Olga N. Savostikova¹

Regulation of cadmium in the soil according to its effect on plants

¹Centre for Strategic Planning of FMBA of Russia, Moscow, 119121, Russian Federation;²Lomonosov Moscow State University, Moscow, 119991, Russian Federation

Introduction. There is discussed the influence of various concentrations of Cd in the soil taking into account their established limiting values on plants in the publication.

Materials and methods. An express experiment was performed with Cd concentrations (0.5; 1.0; 2.5; 5.0 mg/kg) on *Avena sativa* L. and *Sinapis alba* L. using the phytotesting method. In a series of vegetation experiments, cultures of *Lactuca sativa* var. *capitata* and *Hordeum vulgare* L. were used. In this case, the Cd concentration increased to 15 mg/kg.

Results. A pronounced level of toxicity (>50%) is manifested in the concentration of cadmium above 5 mg/kg, as established in preliminary experiments on podzolic soil. The results of vegetation studies indicate a pronounced negative effect of cadmium at concentrations above 5 mg/kg, regardless of the forms of its intake (State standard sample (SSS) and Cd(NO₃)₂). The biomass of barley and lettuce plants is reduced by 54 and 36%, respectively (Cd in the form of SSS) and by 35 and 44% (Cd in the form of Cd(NO₃)₂). An increase in the content of Cd in the soil at a level of ~8–13 mg/kg accompanied by a high level of its accumulation in plants from 18.5 to 33.0 µg/g.

Limitations. When studying the effect of cadmium at concentrations of 0.5–15 mg/kg in soil on plants in acute and chronic experiments, the following crops were used: *Avena sativa* L. and *Sinapis alba* L., *Hordeum vulgare* L. and *Lactuca sativa* var. To restrict a chemical element in the soil-plant system, one should strive to extend the duration of the study and diversify the choice of crops.

Conclusion. The tested doses of cadmium may have some negative effects and increase the risk to human health. Doses of cadmium corresponding to the approximate permissible concentrations of this element in the soil reduce the quality of plant material, confirmed by its high concentrations.

Keywords: Cd in soil; accumulation of Cd in plants; phytotesting; vegetative experience

Compliance with ethical standards. This study does not require the submission of a biomedical ethics committee opinion or other documents.

For citation: Voronina L.P., Ponogaybo K.E., Abramov E.G., Kiryakova N.A., Savostikova O.N. Regulation of cadmium in the soil according to its effect on plants. *Gigiena i Sanitariya (Hygiene and Sanitation, Russian journal)*. 2023; 102(11): 1154–1162. <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2023-102-11-1154-1162> <https://elibrary.ru/rtxpmx> (in Russian)

For correspondence: Lyudmila P. Voronina, MD, PhD, DSci., Associate Professor, Researcher of the Department of Physical and Chemical Research and Ecotoxicology of Centre for Strategic Planning of FMBA of Russia, Moscow, 119121, Russian Federation. E-mail: LVoronina@cspmrz.ru

Information about authors:

Voronina L.P., <https://orcid.org/0000-0003-1917-7490>
Abramov E.G., <https://orcid.org/0000-0001-9611-8430>
Kiryakova N.A., <https://orcid.org/0009-0007-4193-9793>

Ponogaybo K.E., <https://orcid.org/0000-0002-0518-0982>
Savostikova O.N., <https://orcid.org/0000-0002-7032-1366>

Contribution: Voronina L.P. — concept and design of the study, collection and processing of material, writing the text, editing; Kiryakova N.A. — concept and design of the study; Ponogaybo K.E. — collection and processing of material, writing the text, editing; Abramov E.G. — collection and processing of material, editing; Savostikova O.N. — editing. All authors are responsible for the integrity of all parts of the manuscript and approval of the manuscript final version.

Conflict of interest. The authors declare no conflict of interest.

Acknowledgement. The study had no sponsorship.

Received: April 26, 2023 / Accepted: September 26, 2023 / Published: December 8, 2023

Введение

При обосновании предельно допустимых концентраций (ПДК) кадмия в почве с учётом его поглощения растениями необходимо учитывать характеристику самого элемента и его соединений, их поведение в почве, а именно — какое влияние непосредственно оказывает почва на подвижность и доступность, а также способность растений аккумулировать кадмий с учётом физиолого-биохимических механизмов защиты растений. Обсуждая и определяя эти важные позиции для нормируемого элемента, мы понимаем, что в этом случае мы изучаем прежде всего подвижные формы кадмия, тогда как в нормативных документах в настоящее время ориентировочные допустимые концентрации (ОДК) представлены для валового содержания, а ПДК отсутствуют.

Кадмий (Cd) — химический элемент второй группы побочной подгруппы таблицы Д.И. Менделеева, атомная масса — 112, d-элемент, основная валентность — +2, относится к редким и рассеянным элементам. Cd представляет собой тяжёлый металл (ТМ), присутствие которого в почвах обусловлено естественными причинами — содержанием в виде сопутствующего элемента в цинковых (ртутных) рудах или воздействием антропогенных источников — попаданием в составе аккумуляторных и солнечных батарей, красок, добавок к цветному стеклу, антикоррозионных покрытий и пр. В настоящее время из-за высокой токсичности Cd постепенно выводится из сфер практического использования [1–3]. Cd является токсичным металлом. ПДК для питьевой воды составляет 1 мкг/дм³. Фоновое содержание в почве — менее 0,1 мг/кг; в глине содержание несколько выше ~ 0,3 мг/кг [3].

Разработанные на сегодняшний день ОДК Cd в почве должны гарантировать безопасность его перехода в другие среды в количестве, не представляющем опасность для здоровья человека. Почвы благодаря своим особым свойствам способны к детоксикации попадающих в неё веществ, в частности Cd и его соединений. Существующие ОДК рассматривают детоксицирующую роль почвы с учётом кислотно-щелочных свойств и гранулометрического состава. Так, согласно СанПиН 1.2.3685–21¹ ОДК кадмия (валовые формы с учётом фона (кларка)) имеют следующие значения: для песчаных и супесчаных почв — 0,5 мг/кг; для кислых (суглинистых и глинистых), рН_{KCl} < 5,5–1 мг/кг; близких к нейтральным, нейтральных (суглинистых и глинистых), рН_{KCl} > 5,5–2 мг/кг. Нормативные сведения о подвижных формах кадмия отсутствуют.

Настоящие нормативы разработаны расчётно-теоретическим методом. Величины ОДК для химических веществ

природного происхождения, повсеместно присутствующих в почвах, продуктах питания и воде, обоснованы для основных почв России по их устойчивости к химическому загрязнению. Устойчивость почв к загрязнению Cd определяется содержанием в ней гумуса, что связано с высокой адсорбцией элемента органическим веществом, обуславливающим снижение его подвижности [3, 4]. Многими предыдущими исследованиями доказана существенная зависимость биодоступности Cd в почве для растений от рН почвы и содержания в ней органического вещества [4, 5]. В кислой среде подвижность Cd и поступление его в растение возрастает, например, при снижении рН почвы с 7,0 до 5,5, содержание металла в корне райграса возрастает в 4 раза [6].

Выращивание сельскохозяйственной продукции на почвах с повышенным содержанием Cd может привести к его накоплению в съедобных частях растений. Опасения по поводу попадания Cd в организм человека привели к регулированию содержания Cd в пищевых продуктах [7, 8].

Кадмий (Cd) в настоящее время считается одним из самых вредных тяжёлых металлов, поскольку любое заметное увеличение его содержания в продуктах и кормах приводит к опосредованному поступлению его по трофическим цепям и накоплению его в организме человека [7, 9–11].

Не менее важным в исследованиях, связанных с поглощением химического вещества растением, является учёт существующих в нём физиолого-биохимических механизмов защиты в различных органах (рис. 1). Исследуемые барьерные функции весьма специфичны и в ряде случаев обусловлены эволюционно сформировавшимися особенностями растений. Толерантность растений зависит, например, от их вида и фазы развития. Существование гипераккумуляторных видов растений позволяет проводить фитомелиоративные мероприятия для очистки загрязнённых почв [12–16].

Вышеперечисленные позиции имеют большое значение в решении гигиенических задач по установлению предельного содержания Cd в почве.

В серии экспериментов, выполненных в системе «почва — растение», с целью определения одного из показателей вредности — транслокационного показателя, согласно Методическому руководству по определению ПДК химических веществ в почве (1982)², для испытуемого элемента предусмотрено несколько этапов. В наших исследованиях выполнены предварительные эксперименты по оценке фитотоксического действия серии концентраций кадмия (по д. в.) с внесением их в субстрат в форме растворов соли кадмия (CdNO₃) и в форме государственного стандартного образца (ГСО) на ряд тест-культур.

¹ Санитарные правила и нормы СанПиН 1.2.3685–21 «Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания».

² Методическое руководство по определению ПДК химических веществ в почве. М., 1982, 42 с.

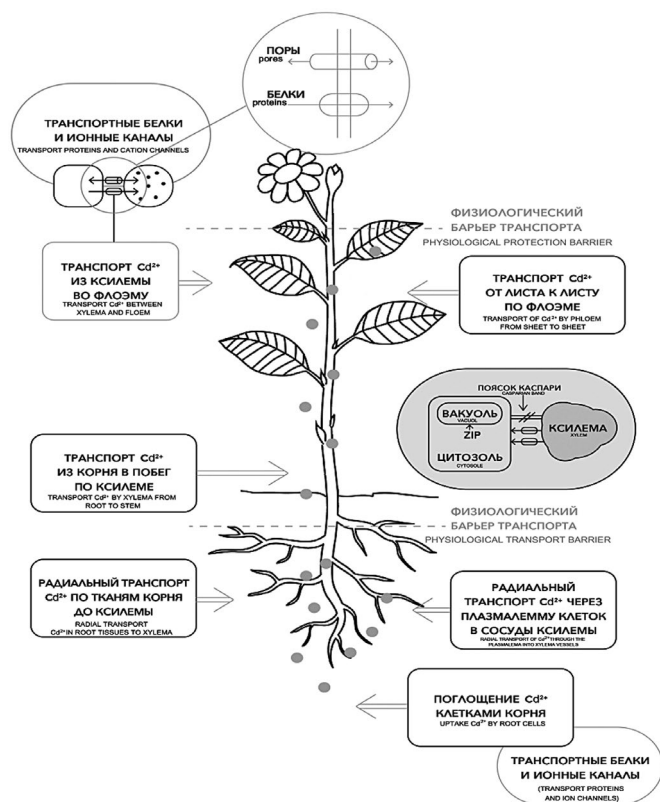


Рис. 1. Транспорт кадмия в системе «почва – растение».

Fig.1. Transportation of cadmium in the "soil – plant" system.

Материалы и методы

Исследования в системе «почва – растение» по определению показателя вредности предусматривают несколько этапов: краткосрочный опыт по определению влияния вещества на всхожесть и раннее формирование растений и более длительный эксперимент для оценки поступления испытуемого вещества в растение.

На первом этапе для экспериментальных исследований по определению предварительного воздействия Cd на растения использовали метод фитотестирования ФР.1.39.2006.02264³, который выполнен с разными концентрациями Cd (0,5; 1; 2,5; 5 мг/кг). При расчёте испытуемых концентраций отталкивались от значений существующих ОДК по кадмию в почве. В качестве тест-растений использовали семена двух культур: однодольной – овёс (*Avena sativa* L.) и двудольной – горчица белая (*Sinapis alba* L.). Уровень токсичности загрязнённых почв оценивали в соответствии с разработанной шкалой, отражающей степень токсичности почв по результатам определения всхожести семян и угнетения корней высших растений на ранних стадиях их развития. Все используемые в опытах семена сельскохозяйственных культур проверяли на всхожесть согласно ГОСТ 12038–84⁴. Для создания определённых концентраций Cd в почве использовали *государственный стандартный образец* (ГСО 7330–96) и химически чистую соль (х. ч.) Cd(NO₃)₂, которые вносили в виде раствора в каждую чашку Петри. ГСО 7330–96 представляет собой раствор ионов Cd (0,45–0,55 г/дм³) в 1 М азотной кислоты. Компания-изготовитель – ООО «Экохим». Повторность трёхкратная.

³ ФР.1.39.2006.02264. Методика выполнения измерений всхожести семян и длины корневых проростков высших растений для определения токсичности техногенно загрязнённых почв.

⁴ ГОСТ 12038–84. Семена. Метод определения всхожести.

Для проведения почвенных экспериментов выбор почв осуществляли в соответствии с положением об использовании почв, принадлежащих основным геохимическим ассоциациям данной территории, в такого рода исследованиях [17]. В связи с этим использована дерново-подзолистая почва (П^а), слабо окультуренная, pH – 7,0, с низким содержанием органического вещества (~ 1%), содержание глинистой фракции – 37,5%. Представленные характеристики почв установлены следующими методами: pH – ГОСТ 26483–85⁵; органическое вещество – ГОСТ 26213–91⁶; гранулометрический состав – ISO 11277⁷, содержание P₂O₅ и K₂O (в вытяжке по Кирсанову) – ГОСТ 54650–2011⁸.

На втором этапе в серии вегетационных экспериментов использовали семена следующих культур: салат (*Lactuca sativa* var. capitata) и ячмень (*Hordeum vulgare* L.). Обоснованием выбора опытных растений послужили сведения по величине предельно допустимой ориентировочной концентрации (ПДОК) Cd в этих сельскохозяйственных культурах. ПДОК Cd колеблется в различных пищевых растительных продуктах: 0,1 мг/кг в зерне, 0,03 мг/кг в овощных культурах и 0,3 мг/кг в кормах. Максимально допустимые уровни содержания Cd в сельскохозяйственных растениях, кормах животных (мг/кг на стандартную влажность) изложены в МДУ № 123–41281–87⁹.

В экспериментах использовали пластиковые сосуды, вмещающие 400 г почвы. Каждый вариант опыта включал три повторности. В опытные сосуды до посева растений вносили водный раствор Cd(NO₃)₂ и стандарт Cd (ГСО 7330–96), разведённого в поливной воде, в испытуемых концентрациях. Вегетационные опыты проводили при оптимальной для микробиологических процессов и растений влажности почвы, равной 60% от полной влагоёмкости. Выравнивание влажности в ходе вегетации проводили способом взвешивания сосудов.

После вегетации растений в течение 14 дней выполнен сбор растительного материала, взвешивание влажной и сухой биомассы.

Исследования по определению эффекта влияния химического вещества (Cd), внесённого в почву, на ранние стадии развития высших растений и их качество выполнены в соответствии с ГОСТ 33061–2014¹⁰.

В конце экспериментов учитывали влажную и сухую биомассу растений. Выполнены определения содержания Cd в почве и растениях. Определение содержания остаточного количества Cd в почве в вегетационном опыте проводили методом масс-спектрометрии с ионизацией в индуктивно связанной аргоновой плазме (ИСП-МС) (ПНД Ф 16.1:2:3.11–99¹¹) с минерализацией образцов концентрированной азотной кислотой.

Определение содержания Cd в растениях проводили методом атомно-абсорбционной спектрометрии (ААС) с электротермическим атомизатором (ЭТА) после вскрытия образцов согласно (ПНД Ф 16.1:2:2:2.3.63–09 (М 03–07–2014)¹²).

⁵ ГОСТ 26483–85. 85 Почвы. Приготовление солевой вытяжки и определение её pH по методу ЦИНАО.

⁶ ГОСТ 26213–91 Почвы. Методы определения органического вещества.

⁷ ISO 11277–2009. Качество почвы. Определение гранулометрического состава в минеральном почвенном материале.

⁸ ГОСТ 54650–2011. Почвы. Определение подвижных соединений фосфора и калия по методу Кирсанова в модификации ЦИНАО.

⁹ Временный максимально допустимый уровень содержания некоторых химических элементов и госсипола в кормах для сельскохозяйственных животных (№ 123–41281–87 от 16.07.1987 г.).

¹⁰ ГОСТ 33061–2014 (Методы испытаний химической продукции, представляющей опасность для окружающей среды) (аналог – ISO 17616–2019).

¹¹ ПНД Ф 16.1:2:3.11–99 Количественный химический анализ почв. Методика выполнения измерений содержания металлов в твёрдых объектах методом спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой.

¹² ПНД Ф 16.1:2:2:2.3.63–09 (М 03–07–2014) Методика измерений массовой доли ванадия, кадмия, кобальта, марганца, меди, мышьяка, никеля, ртути, свинца, хрома и цинка в пробах почв, грунтов, донных отложений, осадков сточных вод атомно-абсорбционным методом с электротермической атомизацией с использованием атомно-абсорбционных спектрометров.

Таблица 1 / Table 1

Результаты фитотестирования разных концентраций растворов соли кадмия (ГСО) на дерново-подзолистой почве
Results of phytotesting of different concentrations of cadmium salt solutions (GSO) on podzolic soil

Показатель		<i>Sinapis alba L.</i>					<i>Avena sativa L.</i>				
		Контроль Control	концентрация Cd, мг/кг concentration Cd, mg/kg				Контроль Control	концентрация Cd, мг/кг concentration Cd, mg/kg			
			0.5	1.0	2.5	5.0		0.5	1.0	2.5	5.0
Всхожесть Germination	Всхожесть семян, шт Seed germination, pcs	9.3	9.1	8.8	5.5	4.0	9.4	8.0	7.5	7.1	6,0
	%	100	98	94	59	43	100	85	80	76	64
	<i>t</i>	–	1.02	2.05	2.11	2.05	–	2.06	2.51	0.32	3.12
	<i>N</i>	–	2	6	41	57	–	15	20	24	36
	Уровень токсичности Toxicity level	–	V	V	IV	III	–	V	IV	IV	IV
Длина корешка Root length	Длина, см / Length, cm	5.0	4.3	3.8	3.3	1.9	6.5	6.4	5.4	3.8	3,4
	%	100	86	76	66	38	100	98	83	58	52
	<i>t</i>	–	2.22	2.18	2.92	2.14	–	1.09	1.55	1.52	2.09
	<i>N</i> ₁	–	14	24	34	62	–	2	17	42	48
	Уровень токсичности Toxicity level	–	V	IV	IV	III	–	V	V	IV	IV
Общая фитотоксичность / Total phytoxicity		–	V	IV	IV	III	–	V	IV	IV	IV

Таблица 2 / Table 2

Результаты фитотестирования разных концентраций растворов соли кадмия (Cd(NO₃)₂) на дерново-подзолистой почве
Results of phytotesting of different concentrations of cadmium salt solutions (Cd(NO₃)₂) on podzolic soil

Показатель		<i>Sinapis alba L.</i>					<i>Avena sativa L.</i>				
		Контроль Control	концентрация Cd, мг/кг concentration Cd, mg/kg				Контроль Control	концентрация Cd, мг/кг concentration Cd, mg/kg			
			0.5	1.0	2.5	5.0		0.5	1.0	2.5	5.0
Всхожесть Germination	Всхожесть семян, шт Seed germination, pcs	9.3	9.0	8.5	7.2	4.3	9.5	8.9	8.5	7.1	5,4
	%	100	97	91	77	46	100	94	89	75	57
	<i>t</i>	–	1.02	2.55	2.55	2.05	–	2.06	2.51	0.32	3.12
	<i>N</i>	–	3	9	23	54	–	6	11	25	43
	Уровень токсичности Toxicity level	–	V	V	IV	III	–	V	V	IV	IV
Длина корешка Root length	Длина, см / Length, cm	4.3	4.1	3.2	2.9	2.4	9.1	8.3	8.0	7.2	7,0
	%	100	94	74	67	58	100	91	88	79	77
	<i>t</i>	–	0.48	2.92	2.08	1.54	–	1.23	2.01	0.52	1.09
	<i>N</i> ₁	–	8	26	33	42	–	9	12	21	23
	Уровень токсичности Toxicity level	–	V	IV	IV	IV	–	V	V	IV	IV
Общая фитотоксичность / Total phytoxicity		–	V	IV	IV	III	–	V	V	IV	IV

Кислотное вскрытие образцов растений в концентрированной азотной кислоте выполнено по тому же алгоритму, что и вскрытие почвенных образцов без стадии его предварительного озоления.

Кадмий (как и другие d-элементы) надёжно определяется методом ААС с ЭТА с высокой чувствительностью (предел обнаружения 0,005 мкг/дм³) из азотнокислых матриц с палладиевым модификатором.

Материалы статистически обработаны. Установлены условия параметрических процедур (нормальность, однородность дисперсий). Рассчитанные величины сравнивали со значениями *t*-критерия Стьюдента для уровня доверительной вероятности $p = 0,95$.

Результаты

В серии экспериментов (лабораторного фитотестирования на чашках Петри и вегетационных опытов в сосудах) по гигиеническому обоснованию содержания Cd в почве с учётом его перехода из почвы в растение (транслокационному показателю) получены предварительные данные по его степени токсичности в зависимости от концентрации.

В ходе химических анализов установлена характеристика дерново-подзолистой среднесуглинистой почвы, используемой в лабораторных опытах. Содержание гумуса – 1,1%, рН_{KCl} – 4,91. Содержание P₂O₅ – 56 мг/100 г почвы, K₂O – 52 мг/100 г почвы. Азот нитратный – 21,3 мг/кг, азот аммонийный – 38,9 мг/кг.

Таблица 3 / Table 3

Влияние растворов кадмия (ГСО) в растениях ячменя и салата на формирование их биомассы и его содержание в почве и растениях
The influence of cadmium solutions (GSO) in barley and lettuce plants on the formation of their biomass and its content in soil and plants

Вариант опыта с внесением Cd, мг/кг Test variant with Cd addition, mg/kg	Масса, г Weight, g	Сухая масса, г Dry weight, g	Содержание Cd в почве, мг/кг Cd content in soil, mg/kg	Cd, мкг/г (µg/g)	Вынос с сухой массой растений, мкг Removal with dry weight of plants, µg/g
<i>Культура – Ячмень (Hordeum vulgare L.) / Crop – Barley (Hordeum vulgare L.)</i>					
Контроль / Control	1.67 ± 0.20	0.13 ± 0.03	0.31 ± 0.16	0.7	0.09
0.5	1.45 ± 0.19	0.13 ± 0.01	0.52 ± 0.26	2.2	0.29
2	1.32 ± 0.18	0.12 ± 0.01	1.41 ± 0.71	7.8	0.94
3	0.91 ± 0.15	0.07 ± 0.02	2.13 ± 1.06	12.8	0.90
НCP _{0.05} ISD (<i>p</i> < 0.05)	0.3	0.03	0.21	–	–
<i>Культура – Салат (Lactuca Sativa var) / Plant – Lettuce (Lactuca Sativa var)</i>					
Контроль / Control	1.34 ± 0.19	0.08 ± 0.03	0.20 ± 0.10	0.2	0.02
0.5	0.82 ± 0.12	0.05 ± 0.01	0.32 ± 0.16	1.5	0.08
2	0.65 ± 0.09	0.04 ± 0.01	1.42 ± 0.70	3.6	0.14
3	0.46 ± 0.14	0.03 ± 0.01	2.02 ± 1.03	13.2	0.40
НCP _{0.05} ISD (<i>p</i> < 0.05)	0.5	0.03	0.20	–	–

Таблица 4 / Table 4

Влияние кадмия (Cd(NO₃)₂) в растениях ячменя и салата на формирование их биомассы и его содержание в почве и растениях
The effect of cadmium (Cd(NO₃)₂) in barley and lettuce plants on the formation of their biomass and its content in soil and plants

Вариант опыта с внесением Cd, мг/кг Test variant with Cd addition, mg/kg	Масса, г Weight, g	Сухая масса, г Dry weight, g	Содержание Cd в почве, мг/кг Cd content in soil, mg/kg	Cd, мкг/г (µg/g)	Вынос с сухой массой растений, мкг Removal with dry weight of plants, µg/g
<i>Культура – Ячмень (Hordeum vulgare L.) / Crop – Barley (Hordeum vulgare L.)</i>					
Контроль / Control	1.41 ± 0.10	0.20 ± 0.02	0.60 ± 0.06	0.4	0.08
0.5	0.98 ± 0.14	0.15 ± 0.01	0.77 ± 0.12	2.0	0.30
2	0.72 ± 0.42	0.09 ± 0.01	3.95 ± 1.16	8.1	0.73
3	0.52 ± 0.23	0.07 ± 0.01	8.3 ± 0.24	18.5	1.30
НCP _{0.05} ISD (<i>p</i> < 0.05)	0.33	0.03	2.52	–	–
<i>Культура – Салат (Lactuca Sativa var) / Plant – Lettuce (Lactuca Sativa var)</i>					
Контроль / Control	1.44 ± 0.02	0.09 ± 0.02	0.19 ± 0.03	0.7	0.06
0.5	1.37 ± 0.01	0.08 ± 0.01	0.47 ± 0.17	3.0	0.16
2	0.93 ± 0.01	0.06 ± 0.01	3.25 ± 0.48	10.0	0.60
3	0.60 ± 0.01	0.04 ± 0.01	13.19 ± 1.40	33.0	1.32
НCP _{0.05} ISD (<i>p</i> < 0.05)	0.5	0.03	0.20	–	–

Фитотестирование. Используемые методы фитотестирования позволяют установить первичный отклик растений на испытуемый поллютант, так как в первую очередь токсическое действие вещества, присутствующего в почве и доступного для растений, влияет на прорастание семян и на развитие ювенильного корешка растения. Результаты исследований, выполненные с серией концентраций Cd, приготовленных из стандартного образца (ГСО) и раствора соли (Cd(NO₃)₂), внесенных в дерново-подзолистую почву, представлены в табл. 1, 2 и свидетельствуют о достоверном ингибировании этих процессов, начиная с концентрации 1 мг/кг почвы.

Полученные результаты явились подтверждением необходимости использования в серии следующих вегетационных опытов на дерново-подзолистой почве концентраций Cd выше 5 мг/кг, так как именно с этой концентрации начинает проявляться выраженный уровень токсичности (> 50%).

Вегетационный эксперимент. Изучение биодоступности элемента заключалось в исследовании миграции Cd из почвы в растения (транслокация). В серии вегетационных экспериментов представлялось важным изучить накопление Cd в разных органах растения и определить токсическое действие на формирование биомассы.

Результаты предварительного фитотестирования явились аргументами для использования в эксперименте злаковых культур как обязательных. Кроме представителей злаковых культур – *Hordeum vulgare*, – в условиях хронического эксперимента использовали растения салата *Lactuca sativa* var. Обоснованием выбора данной культуры является следующее: данная культура широко используется в питании, причём в сыром виде; это быстрорастущая культура; для зелёных овощных культур существуют ПДОК Cd; с учётом их количества в рационе питания можно сделать ориентировочный расчёт лимитирующей величины концентрации Cd.

Результаты вегетационных исследований свидетельствуют, что в краткосрочном хроническом эксперименте (14 дней) с внесением Cd в форме ГСО и растворов соли Cd(NO₃)₂ установлено его негативное воздействие, которое коррелирует с изменением основных исследуемых параметров (биомасса растений, концентрация в растениях).

Увеличение концентрации Cd в почве при внесении его в дозах от 0,5 до 3 мг/кг в форме ГСО ведёт к снижению формирования биомассы растений (влаж./сух.) ячменя на 55/54% и салата на 34/36% (табл. 3). Результаты экспериментов явились подтверждением ранее установленных фактов – с увеличением дозы внесения Cd получены достоверные

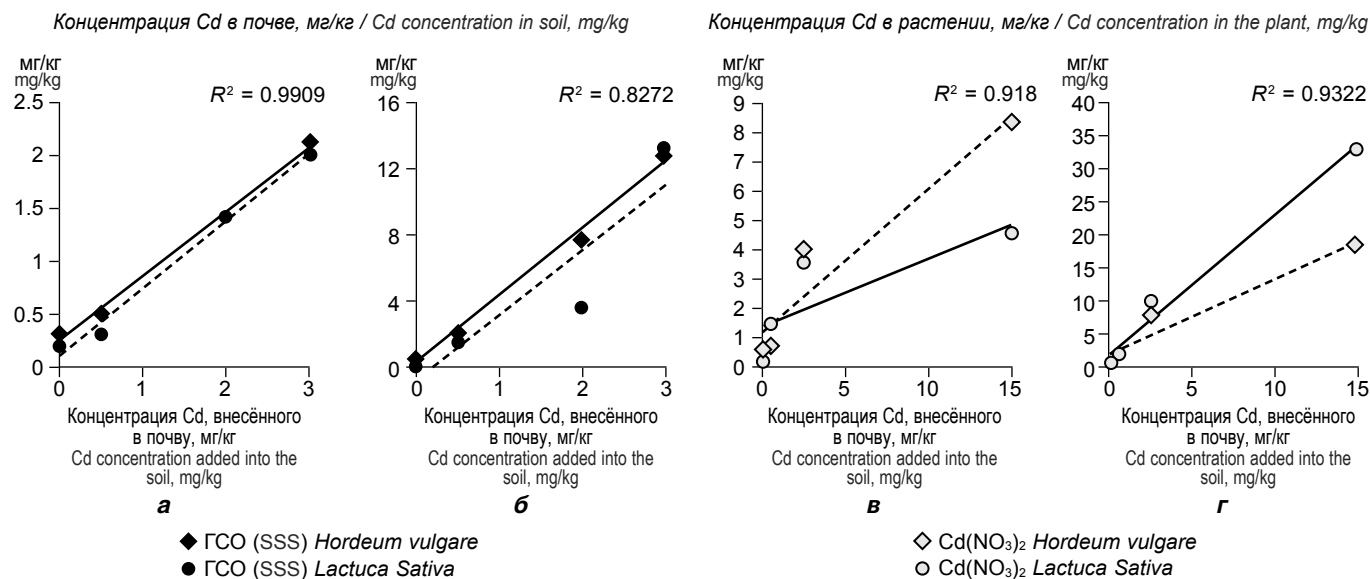


Рис. 2. Динамика содержания остаточного количества кадмия в почве и накопления его в растениях в зависимости от используемой его концентрации в форме ГСО (а, б), в форме солевого раствора (в, г).

Fig. 2. Trend in the content of the residual amount of cadmium in the soil and its accumulation in plants, depending on its concentration in the form of SSS (a, б), in the form of a saline solution (в, г).

результаты, свидетельствующие о снижении продуктивности культур. При использовании Cd в форме ГСО достоверно значимые изменения биомассы салата зафиксированы при использовании концентрации Cd 2 мг/кг, а для растений ячменя при максимальной концентрации 3 мг/кг, то есть это минимально наблюдаемые действующие концентрации, свидетельствующие об угнетении развития растений.

В работе, кроме стандартного раствора Cd (ГСО), использовали солевой раствор $Cd(NO_3)_2$. Внесение разных доз раствора сопровождалось достоверными изменениями по содержанию Cd в дерново-подзолистой почве в зависимости от внесённых в почву концентраций раствора соли Cd (табл. 4). Причём для гигиенических исследований по нормированию веществ важно было установить динамику миграции поллютанта из почвы в растение, что послужило основанием увеличения используемых концентраций в эксперименте при внесении в почву Cd в форме солевого раствора. Установлено вредное воздействие на рост и продуктивность независимо от вида растений. При этом в зависимости от нарастающей дозы внесённого в почву Cd от 0,5 до 15 мг/кг биомасса растений ячменя (влажн./сухая) снижалась на 37/35 и на 42/44% растений салата.

В представленных результатах (см. табл. 3, 4) содержание Cd в почве в конце опыта, после уборки растений, оставалось высоким и коррелировалось с используемыми в экспериментах концентрациями Cd. Как свидетельствуют данные, остаточное количество элемента в почве практически не зависело от вида растения, а поглощение Cd растением мало зависело от формы используемого в эксперименте Cd (ГСО или раствор соли). Вынос металла с биомассой растений был весьма низким, но достоверно различался по вариантам опыта, увеличивался независимо от снижения общей биомассы и существенно зависел от увеличения концентрации Cd в почве. Основное количество внесённого в опыт Cd остаётся в почве, взаимодействуя с почвенным органическим веществом.

Учитывая высокую токсичность Cd, необходимо отметить его значительное поступление в растения. Концентрация Cd в растениях увеличивалась в зависимости от её концентрации в почве, причём в растениях салата Cd накапливался интенсивнее. Содержание Cd в растениях соответствовало 2–3 мкг/г при концентрации его в почве от ~ 0,5 до

1 мг/кг и 8–10 мкг/г при концентрации ~ 3–4 мг/кг. Данные значения содержания Cd в почве соответствуют допустимым нормативным значениям, тогда как величины их концентраций в зелёной надземной массе превышают максимально допустимые для растений значения. Увеличение же содержания Cd в почве на уровне ~ 8–13 мг/кг, что превышает ОДК приблизительно в 2–3 раза (более чем на 100%), концентрация в растениях соответствует 18,5–33 мкг/г.

Рис. 2 демонстрирует рост концентрации Cd в почве и растениях для всех испытуемых форм в зависимости от испытуемых доз Cd. Следует отметить, что при внесении его в форме солевого раствора культура салата более предпочтительна к его накоплению (рис. 2, з), что обуславливает более низкое содержание Cd в почве в конце эксперимента (рис. 2, в) по сравнению с культурой ячменя. Причём чётко такая закономерность проявляется на высоких дозах (15 мг/кг). Подтверждается высокая корреляция между всеми рассматриваемыми факторами (содержание Cd в почве и концентрация его в растениях) в зависимости от увеличения исследуемых доз вносимого в почву Cd независимо от испытуемой формы.

Обсуждение

Фитотестирование. Имеются данные, свидетельствующие о невысокой чувствительности семян в фазу набухания и прорастывания корешка к присутствию небольших концентраций Cd [18–20], однако результаты фитотестирования с использованием тест-культур горчицы белой и овса свидетельствуют о чувствительности этих семян к испытуемому токсиканту (см. табл. 1, 2). Следует также отметить разную концентрационную чувствительность однодольных и двудольных культур, и при этом форма используемого Cd в эксперименте также оказала влияние на результат. Семена овса оказались чувствительны к более низким концентрациям, и «слабая» токсичность (20 ÷ 50%) проявилась уже на концентрации 1 мг/кг при использовании раствора ГСО, тогда как у двудольных семян она проявилась лишь на концентрации 2,5 мг/кг. Причём в данном случае определяющим мог быть не факт присутствия Cd, а повышение ионов водорода в среде, так как внесение в почву ГСО сопровождалось снижением pH среды. Однако с повышением концентрации

Cd в среде до 5 мг/кг чувствительность тест-культуры горчицы увеличилась, и фитотоксичность соответствовала 57%. При использовании однодольных плёнчатых семян овса фитотоксичность соответствовала 36%. По второму тест-показателю – длине корешка – более выраженная токсичность концентрации Cd 5 мг/кг проявилась на тест-культуре *Sinapis alba*, причём независимо от формы используемого вещества, и соответствовала 63% (ГСО) и 58% (Cd(NO₃)₂). В связи с этим полагаем важным подчеркнуть необходимость использования семян разных растений в процедуре фитотестирования, которая позволяет определить диапазон рабочих концентраций и выбор культур для дальнейшего проведения вегетационных экспериментов.

Обращение к методу фитотестирования в изучении позиций миграции веществ из почвы в растения для гигиенического нормирования является оперативным и важным этапом. Причём принципиальной позицией при постановке метода фитотестирования остаётся обращение как минимум к двум тест-культурам и двум тест-показателям.

Использование семян нескольких культур на предварительном этапе фитотестирования обосновано физиологическими особенностями их «отклика» на условия среды, которые могут быть сформированы в почве под действием разных веществ, а также их форм и концентраций. По всей видимости, разный первичный тест-«отклик» может быть продиктован физиологическими особенностями семян, их потенциальной энергией прорастания, а также разной устойчивостью к изменяющейся кислотности среды и концентрационным эффектам, происходящим в почве под воздействием поллютанта. Обязательным тест-показателем для определения токсичности почвы выступает показатель измерения длины первичного корешка, формирование и развитие которого во многом определяется средой обитания растения.

Транслокационный эксперимент. Проблема увеличения содержания Cd в зерне хлебных злаков и овощной продукции (особенно в листовых) при выращивании на загрязнённых почвах приобретает в последнее время всё большую актуальность [19–21]. Установлено, что транспорт Cd как в растение, так по растению происходит довольно быстро (см. рис. 1). Процесс поступления Cd из почвы в клетки корня растений происходит диффузным путём из питательного раствора, заполняя свободное клеточное пространство, адсорбируясь на клеточных стенках. В этом случае повышение величины поглощения свободного иона Cd к поверхности корня связано прежде всего с его концентрацией и лабильностью образующихся соединений. Механизмы поглощения тяжёлых металлов корнями включают как пассивный перенос ионов в клетку, протекающий без использования дополнительной энергии, который осуществляется посредством катионных неселективных каналов, так и активный процесс поглощения. Активный транспорт тяжёлых металлов в клетку сопряжён с затратой энергии, которая используется для перемещения ионов против градиента электрохимического потенциала и происходит с участием большого количества специальных белков-переносчиков.

Общее содержание Cd в органах растений зависит и от его перемещения по растению, где важную роль играет радиальный транспорт ионов. Передвижение ионов через плазмалемму клеток в сосуды ксилемы может осуществляться с использованием основных механизмов транспорта: с участием транспортных белков и ионных каналов, а некоторые белки участвуют и на заключительном этапе транспорта кадмия из ксилемы во флоэму [22–24]. У многих растений, к которым относятся и некоторые злаки, корни являются важным барьером на пути транспорта кадмия в растения [24, 25]. Именно в них аккумулируется большая часть поступающего в растения металла, таким образом защищая репродуктивные органы растения от его накопления. Вместе с тем при отмирании корневой системы элемент сохраняется и накапливается в почве.

Экспериментальные результаты подтвердили негативное влияние Cd на биомассу растений. Известно, что присутствие Cd в растениях приводит к значительному уменьшению интенсивности фотосинтеза и транспирации, что отражается на их росте и развитии, существенно снижая величину биомассы [23].

Даже внесение в почву минимальной концентрации Cd (0,5 мг/кг), соответствующей ОДК в почве, сопровождающееся содержанием его от 0,47 до 0,77 мг/кг, ведёт к существенному его поступлению в растения. В этом случае концентрация Cd в зелёной массе ячменя повышается до 2 мкг/г, в салате – до 3 мкг/г, тогда как в зелёных пищевых продуктах она не должна превышать 0,3 мкг/г. Однако сопоставление токсичности, полученной в эксперименте, зелёной массы с существующими МДУ является не совсем корректным в связи со сбором образца на ювенильной (начальной) стадии развития. Учитывая наличие физиолого-биохимических защитных механизмов у растения, в репродуктивных органах и на фазе созревания растений в зелёной их массе концентрация Cd должна существенно снижаться [22, 23, 26]. В связи с этим возможно воспользоваться данными, представленными в работе В.Б. Ильина (1985), где допустимая норма Cd в овощах установлена расчётным методом и соответствует 2,2 мг/кг сухой массы [26]. В этом случае установленные в растениях концентрации Cd при наличии его в почве на уровне, не превышающем ОДК, не могут оказывать на организм человека негативного действия. И лишь в варианте с максимальным внесением Cd в почву (15 мг/кг) остаточное его содержание в почве соответствует 8–13 мг/кг, что существенно превышает ОДК, а концентрация в растениях ячменя и салата увеличивается до 18,5 и 33 мкг/г соответственно, что также гораздо выше существующих нормативных величин.

Таким образом, по результатам эксперимента в растениях устанавливается токсичность от присутствия Cd в почве. Высокие концентрации Cd в растительных образцах можно объяснить следующим: во-первых, исследовались растительные образцы в ювенильной стадии развития, во-вторых, использован иной методический подход при пробоподготовке растительных образцов для определения в них Cd – без предварительного озоления образцов.

В настоящее время для определения Cd в растениях остаётся ведущим атомно-абсорбционный метод, указанный в нормативном документе, в котором для пробоподготовки рекомендовано использование «сухого» озоления, заключающегося в выдерживании растительного материала при температуре выше 500 °C в муфельной печи в течение нескольких часов. Результаты аналитических исследований свидетельствуют, что химические элементы способны улетучиваться, что приводит к серьёзным потерям ряда химических элементов. Потери Cd с применением такой пробоподготовки биоматериала могут превышать 50% [27, 28]. В связи с этим в аналитических работах большой интерес возникает к использованию других способов работы с биоматериалом.

На основании анализа полученных результатов подтверждаются сведения, что различные виды растений, представленные с/х культурами – зерновыми (ячмень) и овощными/зелёными (салат), обладают селективной способностью к накоплению химических элементов. Можно предположить, что наибольшее количество Cd в листьях салата обусловлено слабой корневой системой данного вида растения, а в ячмене перераспределением на границе «корень – стебель» подключается защитный механизм, задерживающий Cd в корнях растения. Защитный механизм проявляется и на других морфогенетических фазах развития растений, что сопровождается снижением концентрации ТМ в процессе роста (пассивный эффект ростового разбавления) и снижением концентрации ТМ в репродуктивных органах (специфические барьерные механизмы).

В краткосрочном эксперименте (14 дней), выполненном в сосудах, подтверждаются сведения о высокой мобильности Cd, что обеспечивает его активное поступление в растения на первых этапах вегетации [29–31]. Несомненно,

высокая токсичность, которая зачастую фиксируется в почве в деляночных или полевых опытах (открытых системах), подвержена всякого рода трансформации и, как следствие, снижению. В ходе роста и развития растений, нарастания биомассы происходит разбавление и перераспределение поллютанта по органам растения, что также существенно снижает его концентрацию.

Для более полного анализа токсичности Cd следует проанализировать существующий экспериментальный материал по аккумуляции его в растительной продукции, используя результаты полевых и вегетационных опытов, что позволит определить величину его поступления с учётом рациона питания. В микродозах Cd, как отмечают некоторые исследователи, может быть полезен, например, для регуляции содержания сахара в крови [32], но при повышенных концентрациях сильно токсичен. В целом поступление Cd в растения, в частности злаки и овощи, представляет собой сложный и комплексный процесс, зависящий от многих факторов, что указывает на необходимость комплексных, междисциплинарных исследований для выполнения методической работы по гигиеническому нормированию Cd и других химических элементов в почве.

В настоящих исследованиях при изучении влияния Cd в концентрациях 0,5–15 мг/кг в почве на растения в остром и хроническом экспериментах использованы овёс и горчица, ячмень и салат. Для нормирования химического элемента в системе «почва – растение» следует стремиться к расширению продолжительности исследования и разнообразию выбора культур.

Заключение

Одной из важных аналитических проблем, которые влияют на выводы исследований, являются способ пробоподготовки биологического материала для дальнейшего анализа и метод определения токсичного элемента.

Общее поглощение Cd растениями, его влияние на биомассу побегов в экспериментах коррелировалось с содержанием Cd в почве. Высокие дозы применения Cd соответствовали высокому общему поглощению его растениями и снижению биомассы. Значения концентраций Cd в растительных образцах были выше допустимого уровня, однако наблюдалось отсутствие визуальных симптомов токсичности от присутствия Cd в почве до 3 мг/кг. Культура салата является более сильным аккумулятором Cd в высокой концентрации в почве (15 мг/кг).

Для установления гигиенических нормативов токсичных элементов, таких как Cd, следует использовать растения с длительным и коротким периодом вегетации. Сроки отбора проб следует приурочить ко времени массовой созревания используемых в экспериментах культур (в экспериментах для нормирования химических загрязнителей).

Таким образом, испытываемые дозы Cd могут иметь определённое негативное воздействие и повысить риск для здоровья человека. Дозы Cd, соответствующие ОДК этого элемента в почве, снижают качество растительного материала, что подтверждается его высокими концентрациями.

Литература

(п.п. 5, 16, 22, 24, 25, 29, 31, 32 см. References)

1. Дроздова Н.И., Макаренко Т.В. Изучение особенностей накопления тяжёлых металлов в системе «Почва – растения» в условиях промышленных зон г. Гомеля. *Экологический вестник*. 2015; (4): 96–102. <https://elibrary.ru/hqwcej>
2. Рахматов У., Хамракулова М.Х., Мирзаев Д.М., Абдисаматов Э.Д. Исследование концентрации меди, никеля и кадмия в различных типах почв Ферганской области. *Universum: технические науки*. 2021; (11–4): 68–73. <https://elibrary.ru/ebtovf>
3. Водяницкий Н.Ю. Об опасных тяжёлых металлах/металлоидах в почвах. *Бюллетень Почвенного института им. В.В. Докучаева*. 2011; (68): 56–82. <https://elibrary.ru/ojqhsf>
4. Медведев И.Ф., Деревягин С.С. *Тяжёлые металлы в экосистемах*. Саратов: Ракурс; 2017. <https://elibrary.ru/zuoclr>
6. Титов А.Ф., Таланова В.В., Казнина Н.М., Лайдинен Г.Ф. *Устойчивость растений к тяжёлым металлам*. Петрозаводск; 2007. <https://elibrary.ru/qkqkqb>
7. Карпова Е.А. Длительное применение удобрений и тяжёлые металлы в агроэкосистемах. *Проблемы агрохимии и экологии*. 2008; (2): 19–22. <https://elibrary.ru/jxdavd>
8. Литвинский В.А., Гришина Е.А., Носиков В.В., Сушкова Л.О. Актуальность совершенствования методических подходов к определению содержания кадмия в растениях и продуктах растениеводства. *Проблемы агрохимии и экологии*. 2018; (4): 62–7. <https://doi.org/10.26105/AE.2018.4.42.015> <https://elibrary.ru/vprxpi>
9. Селюкова С.В. Оценка содержания тяжёлых металлов в кукурузе и подсолнечнике. *Агрохимический вестник*. 2017; (5): 52–5. <https://elibrary.ru/zmvspd>
10. Андриенко Л.Н., Аксенова Ю.В. Влияние внесения кадмия, никеля, цинка на уровень содержания их в почве, урожайности и качество корнеплодов овощных культур. *Земледелие*. 2018; (8): 23–5. <https://doi.org/10.24411/0044-3913-2018-10807> <https://elibrary.ru/ytzgrt>
11. Лукин С.В., Селюкова С.В. Экологическая оценка содержания кадмия в агроценозах Центрально-Черноземных областей России. *Почвоведение*. 2018; (10S): 3–9. <https://doi.org/10.1134/S0032180X18120079> <https://elibrary.ru/ynnnzj>
12. Игнатова Г.А. Фитомелиоранты и их применение. *Вестник аграрной науки*. 2018; (4): 25–8. <https://doi.org/10.15217/issn2587-666X.2018.4.25> <https://elibrary.ru/vjwooy>
13. Титов А.Ф., Казнина Н.М., Таланова В.В. *Устойчивость растений к кадмию (на примере семейства злаков)*. Петрозаводск; 2012. <https://elibrary.ru/gurwqr>
14. Батова Ю.В., Титов А.Ф., Казнина Н.М., Лайдинен Г.Ф. Накопление кадмия и его распределение по органам у растений ячменя разного возраста. *Труды Карельского научного центра Российской академии наук*. 2012; (2): 32–7. <https://elibrary.ru/oyhqxk>
15. Башмаков Д.И., Лукаткин А.С. *Эколого-физиологические аспекты аккумуляции и распределения тяжёлых металлов у высших растений*. Саранск; 2009. <https://elibrary.ru/qcnyfz>
17. Воронина Л.П., Поногайбо К.Э., Савостикова О.Н. Обоснование выбора типов почв для гигиенического нормирования химических веществ (обзор литературы). *Гигиена и санитария*. 2022; 101(3): 270–4. <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2022-101-3-270-274> <https://elibrary.ru/jnuisw>
18. Тимофеев М.А., Терехова В.А., Кожевин П.А. Биотестирование почв при загрязнении кадмием. *Вестник Московского университета. Серия 17. Почвоведение*. 2010; (4): 44–7. <https://elibrary.ru/ofxjvh>
19. Товстик Е.В., Будина Д.В., Киселева Е.А., Зыкова Ю.Н. Биотестирование почв, загрязнённых кадмием. *Современные научные исследования и разработки*. 2018; 3(4): 136–8. <https://elibrary.ru/phlnhv>
20. Баранов А.П., Лунёв М.И., Воронина Л.П. Модификация биотеста с энхитреидами для оценки характера загрязнения субстрата осадками сточных вод. *Теоретическая и прикладная экология*. 2020; (4): 169–75. <https://doi.org/10.25750/1995-4301-2020-4-169-175> <https://elibrary.ru/ifmmbv>
21. Романькова А.А., Батлущая И.В. Содержание кадмия и свинца в высших растениях на территории Красненского района Белгородской области. *Научные ведомости Белгородского государственного университета. Серия: Естественные науки*. 2011; (3): 68–75. <https://elibrary.ru/orhmjz>
23. Гончарук Е.А., Загоскина Н.В. Тяжёлые металлы: поступление, токсичность и защитные механизмы растений (на примере ионов кадмия). *Вестник Харьковского национального аграрного университета. Серия: Биология*. 2017; (1): 35–49.
26. Ильин В.Б., Гармаш Г.А., Гармаш Н.Ю. Влияние тяжёлых металлов на рост, развитие и урожайность сельскохозяйственных культур. *Агрохимия*. 1985; (6): 90–100. <https://elibrary.ru/xqzann>
27. Зайчик В.Е. Потери химических элементов при сухом озолении образцов биологических материалов. *Микроэлементы в медицине*. 2004; 5(3): 17–22. <https://elibrary.ru/nqufmx>
28. Позняк С.С. Методологические подходы к исследованию содержания микроэлементов в зерне ячменя в зависимости от применяемых средств интенсификации. *Экологический вестник*. 2008; (2): 110–6. <https://elibrary.ru/jriiij>
30. Позняк С.С. Содержание некоторых тяжёлых металлов в растительности полевых и луговых агрофитоценозов в условиях техногенного загрязнения почвенного покрова. *Вестник Томского государственного университета. Биология*. 2011; (1): 123–37. <https://elibrary.ru/ngazvt>

References

- Drozдова N.I., Makarenko T.V. The analysis of heavy metals accumulation peculiarities in the system «Soil – plants» in industrial zones of Gomel. *Ekologicheskiiy vestnik*. 2015; (4): 96–102. <https://elibrary.ru/hqwcej> (in Russian)
- Rakhmatov U., Khamrakulova M.Kh., Mirzaev D.M., Abdisamatov E.D. Study of copper, nickel and cadmium concentration in different types of soils of Fergana region. *Universum: tekhnicheskie nauki*. 2021; (11–4): 68–73. <https://elibrary.ru/ebtovf> (in Russian)
- Vodyanitskiy N.Yu. About dangerous heavy metals/metalloids in soils. *Byulleten' Pochvennogo instituta im. V.V. Dokuchaeva*. 2011; (68): 56–82. <https://elibrary.ru/ojghsf> (in Russian)
- Medvedev I.F., Derevyagin S.S. *Heavy Metals in Ecosystems [Tyazhelye metally v ekosistemakh]*. Saratov: Rakurs; 2017. <https://elibrary.ru/zuoclr> (in Russian)
- Yang L., Ren Q., Zheng K., Jiao Z., Ruan X., Wang Y. Migration of heavy metals in the soil-grape system and potential health risk assessment. *Sci. Total Environ*. 2022; 806(Pt. 2): 150646. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.150646>
- Titov A.F., Talanova V.V., Kaznina N.M., Laydinen G.F. *Resistance of Plants to Heavy Metals [Ustoychivost' rasteniy k tyazhelym metallam]*. Petrozavodsk; 2007. <https://elibrary.ru/qkqkqb> (in Russian)
- Karpova E.A. Long-term fertilization and heavy metals in agroecosystems. *Problemy agrokhimii i ekologii*. 2008; (2): 19–22. <https://elibrary.ru/jxdavd> (in Russian)
- Litvinskiy V.A., Grishina E.A., Nosikov V.V., Sushkova L.O. Actuality of improving methodical approaches to determine the content of cadmium in plants and products of crop cultivation. *Problemy agrokhimii i ekologii*. 2018; (4): 62–7. <https://doi.org/10.26105/AE.2018.4.42.015> <https://elibrary.ru/vprxpi> (in Russian)
- Selyukova S.V. Evaluation of heavy metal content in corn and sunflower. *Agrokhimicheskiiy vestnik*. 2017; (5): 52–5. <https://elibrary.ru/zmvspd> (in Russian)
- Andrienko L.N., Aksenova Yu.V. Influence of application of cadmium, nickel, zink on the level of their content in soil, productivity and quality of root crops. *Zemledelie*. 2018; (8): 23–5. <https://doi.org/10.24411/0044-3913-2018-10807> <https://elibrary.ru/ytzgrt> (in Russian)
- Lukin S.V., Selyukova S.V. Ecological assessment of the content of cadmium in soils and crops in southwestern regions of the Central Chernozemec zone, Russia. *Pochvovedenie*. 2018; 51(12): 1547–53. <https://doi.org/10.1134/S1064229318120074> <https://elibrary.ru/wuodbc>
- Ignatova G.A. Phytomeliorants and their application. *Vestnik agrarnoy nauki*. 2018; (4): 25–8. <https://doi.org/10.15217/issn2587-666X.2018.4.25> <https://elibrary.ru/vjwooy> (in Russian)
- Titov A.F., Kaznina N.M., Talanova V.V. *Plant Resistance to Cadmium (on the Example of a Family of Cereals) [Ustoychivost' rasteniy k kadmiiyu (na primere semeystva zlakov)]*. Petrozavodsk; 2012. <https://elibrary.ru/rurwqr> (in Russian)
- Batova Yu.V., Titov A.F., Kaznina N.M., Laydinen G.F. Cadmium accumulation and distribution in barley plants depending on their age. *Trudy Karelskogo nauchnogo tsentra Rossiyskoy akademii nauk*. 2012; (2): 32–7. <https://elibrary.ru/oyhqkx> (in Russian)
- Bashmakov D.I., Lukatkin A.S. *Ecological and Physiological Aspects of Accumulation and Distribution of Heavy Metals in Higher Plants [Ekologo-fiziologicheskie aspekty akumulatsii i raspredeleniya tyazhelykh metallov u vysshikh rasteniy]*. Saransk; 2009. <https://elibrary.ru/qcnyfz> (in Russian)
- Ren W.X., Li P.J., Geng Y., Li X.J. Biological leaching of heavy metals from a contaminated soil by *Aspergillus niger*. *Journal of Hazardous Materials*, 2009; 167(1–3): 164–9. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2008.12.104>
- Voronina L.P., Pongaybo K.E., Savostikova O.N. Reason of the choice of soil types for hygienic regulation of chemicals (literature review). *Gigiena i Sanitariya (Hygiene and Sanitation, Russian journal)*. 2022; 101(3): 270–4. <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2022-101-3-270-274> <https://elibrary.ru/jnuisw> (in Russian)
- Timofeev M.A., Terekhova V.A., Kozhevnikov P.A. Biotesting for Cd pollution in soils. *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 17. Pochvovedenie*. 2010; 65(4): 179–82. <https://elibrary.ru/wxyqcr>
- Tovstik E.V., Budina D.V., Kiseleva E.A., Zykova Yu.N. Biological testing of soils polluted by cadmium. *Sovremennye nauchnye issledovaniya i razrabotki*. 2018; 3(4): 136–8. <https://elibrary.ru/phlnhv> (in Russian)
- Baranov A.P., Lunev M.I., Voronina L.P. Modification of a bioassay with enchytrides for ecotoxicological assessment of contaminated soil. *Teoreticheskaya i prikladnaya ekologiya*. 2020; (4): 169–75. <https://doi.org/10.25750/1995-4301-2020-4-169-175> <https://elibrary.ru/ifmmbv> (in Russian)
- Roman'kova A.A., Batlutskaya I.V. The cadmium and lead content in the higher plants in Krasnensky district of the Belgorod region. *Nauchnye vedomosti Belgorodskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Estestvennye nauki*. 2011; (3): 68–75. <https://elibrary.ru/orhmjz> (in Russian)
- Raza A., Habib M., Kakavand S.N., Zahid Z., Zahra N., Sharif R., et al. Phytoremediation of cadmium: physiological, biochemical, and molecular mechanisms. *Biology (Basel)*. 2020; 9(7): 177. <https://doi.org/10.3390/biology9070177>
- Goncharuk E.A., Zagorskina N.V. Heavy metals: uptake, toxicity and protective mechanisms in plants (for example of cadmium). *Vestnik Khar'kovskogo natsional'nogo agrarnogo universiteta. Seriya: Biologiya*. 2017; (1): 35–49. (in Russian)
- Lux A., Martinka M., Vaculik M., White P.J. Root responses to cadmium in the rhizosphere: a review. *J. Exp. Bot*. 2011; 62(1): 21–37. <https://doi.org/10.1093/jxb/erq281>
- White P.J., Pongrac P. Heavy-metal toxicity in plants. In: *Plant Stress Physiology*. Wallingford: Cabi; 2017: 300–31. <https://doi.org/10.1079/9781780647296.0300>
- Il'in V.B., Garmash G.A., Garmash N.Yu. The influence of heavy metals on the growth, development and yield of agricultural crops. *Agrokhiimiya*. 1985; (6): 90–100. <https://elibrary.ru/xqzann> (in Russian)
- Zaychik V.E. Losses of chemical elements during dry salting of samples of biological materials. *Mikroelementy v meditsine*. 2004; 5(3): 17–22. <https://elibrary.ru/nqufmx> (in Russian)
- Poznyak S.S. Methodological approaches to the microelements content evaluation in barley corn in dependence with applicable means of intensification. *Ekologicheskiiy vestnik*. 2008; (2): 110–6. <https://elibrary.ru/jriiij> (in Russian)
- Liu J.N., Zhou Q.X., Sun T., Ma L.Q., Wang S. Growth responses of three ornamental plants to Cd and Cd–Pb stress and their metal accumulation characteristics. *J. Hazard. Mater*. 2008; 151(1): 261–7. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2007.08.016>
- Poznyak S.S. Heavy metals concentration in plants of field and poic agrophytocenoses in conditions of anthropogenic contamination of soil cover. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Biologiya*. 2011; (1): 123–37. <https://elibrary.ru/ngazvt> (in Russian)
- Lai C., Li D., Qin J., Li J., Yan Z., Chen G., et al. The migration of cadmium and lead in soil columns and their bioaccumulation in a multi-species soil system. *Chemosphere*. 2021; 262: 127718. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.127718>
- Carvalho M.E.A., Castro P.R.C., Azevedo R.A. Hormesis in plants under Cd exposure: from toxic to beneficial element? *J. Hazard. Mater*. 2020; 384: 121434. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2019.121434>