

Источники кадмия, анализ пределов содержания, стратегии снижения в окружающей среде (обзор)

© 2024. Д. В. Петухов, к. х. н., доцент,
Е. В. Товстик, к. б. н., с. н. с., доцент,
Вятский государственный университет,
610000, Россия, г. Киров, ул. Московская, д. 36,
e-mail: usr20941@vyatsu.ru

В работе проанализированы основные источники кадмия в окружающей среде и пути его миграции. Показано, что кадмий является одним из приоритетных загрязнителей воздуха и почвы в промышленных регионах. Попадая в организм человека, он блокирует функции ферментов и может вызывать серьезные заболевания. В связи с высокой опасностью содержание кадмия нормируется в почве (от 0,5 до 2,0 мг/кг), удобрениях (3 и 20 мг/кг P_2O_5), продуктах питания (0,02–1,0 мг/кг), продовольственном зерне (0,1 мг/кг), комбикормах для сельскохозяйственных животных (0,3–0,4 мг/кг). Противодействием попадания кадмия в пищевые цепи является фиторемедиация. В качестве гипераккумуляторов кадмия используют лантану сводчатую, горчицу сарептскую, рапс, клецевину, табак. Для повышения фиторемедиационной эффективности растений-гипераккумуляторов проводят их трансформацию фитохелатиновыми генами, кодирующими синтез металлсвязывающих пептидов; подкисляют почвы; используют штаммы эндофитных бактерий и органические добавки. Значительно уменьшить воздействие кадмия на организм человека позволяют агрономические методы, регулирующие поглощение ионов токсичного металла сельскохозяйственными культурами. Среди них повышение устойчивости растений к кадмиевому стрессу и снижение уровня накопления токсичного металла в них.

Ключевые слова: кадмий, миграция, предельно допустимая концентрация, почва, зерно, ремедиация.

Cadmium sources, limit analysis, environmental mitigation strategy (review)

© 2024. D. V. Petukhov ORCID: 0000-0002-7733-5250
E. V. Tovstik ORCID: 0000-0003-1861-6076
Vyatka State University,
36, Moskovskaya St., Kirov, Russia, 610000,
e-mail: usr20941@vyatsu.ru

The paper systematizes information on anthropogenic environmental pollution by cadmium, pathways of Cd distribution, toxicity, and strategies to reduce Cd content in soil and crop products. The relevance stems from the need to develop strategies to prevent long-term exposure to cadmium in the human body, which has significant consequences for public health and environmental safety. The paper analyzes in detail the sources and migration pathways of cadmium in the environment. It is shown that cadmium is one of the main air and soil pollutants in industrial regions. Its presence in the environment is aggravated by natural phenomena. Cadmium compounds are capable of traveling long distances with air currents, resulting in deposition in areas remote from pollution sources. Special attention is paid to the mechanisms of cadmium accumulation in the soil and its subsequent transfer to plants, which leads to its penetration into the food chain. Cd is non-essential element for plants. Cadmium has carcinogenic properties. Once in the human body, it blocks enzyme functions and can provoke serious diseases. Due to the high danger, cadmium content is normalized in soil (from 0.5 to 2.0 mg/kg), fertilizers (3 and 20 mg/kg P_2O_5), food (0.02–1.0 mg/kg), food grains (0.1 mg/kg), animal feed (0.3–0.4 mg/kg). Phytoremediation is an effective way to reduce the ingress of cadmium into the food chain. *Lantana camara* L., *Brassica juncea* (L.) Czern., *Brassica napus* L., *Nicotiana tabacum* L., castor oil are used as cadmium hyperaccumulators. Soil acidification, inoculation with endophytic bacterial strains, chelating organic additives, and transformation of hyperaccumulator plants with phytochelatin genes encoding the synthesis of metal-binding peptides have been used to enhance phytoremediation efficiency. Agronomic methods that regulate the absorption of toxic metal by agricultural crops can significantly reduce the effects of cadmium in the human body. Increasing the resistance of plants to cadmium stress and reducing the accumulation of toxic metal in them are among them.

Keywords: cadmium, migration, maximum permissible concentration, soil, grain, remediation.

Высокая антропогенная нагрузка является причиной загрязнения экосистем различными поллютантами, в том числе тяжёлыми металлами (ТМ). Согласно докладу Всемирной организации здравоохранения (ВОЗ) от 2019 г. «Exposure to cadmium: a major public health concern», одним из наиболее опасных загрязнителей окружающей среды (ОС), оказывающих негативное влияние на здоровье человека, является кадмий. Несмотря на то, что кадмий играет важную роль в производстве многих товаров, его использование в различных отраслях промышленности связано с определёнными рисками. Кадмий не поддаётся биологическому разложению и присутствует на различных трофических уровнях пищевой цепи, что вызывает обеспокоенность в отношении безопасности пищевых продуктов [1]. В настоящее время верхние пределы поступления кадмия в организм человека составляют 0,83 мкг/кг массы тела/день. Однако имеются данные о том, что кадмий опасен для человека и в более низких концентрациях [2].

В связи с этим исследование процессов миграции кадмия в ОС, пределов его содержания в почве и растениеводческой продукции играет важную роль в разработке стратегий по предотвращению долгосрочного воздействия кадмия на организм человека, что имеет значительные последствия для общественного здоровья и экологической безопасности.

Цель работы – систематизация информации о вкладе антропогенных источников в загрязнение окружающей среды кадмием, путях его миграции, токсичности и стратегиях снижения содержания в почвах и растениеводческой продукции.

Объекты и методы исследования

Материалы для данного обзора были отобраны в научных электронных библиотеках eLibrary.ru и КиберЛенинка, а также в поисковых системах по полным текстам научных публикаций Google Scholar, ACS Publications, ScienceDirect, Springer.

Критерием отбора источников для систематизации информации служили ключевые слова: «кадмий», «антропогенные источники», «пределы содержания», «почва», «удобрения», «продукты питания», «пищевая цепь», «токсичность», «ремедиация», «устойчивость к кадмию» и их английские варианты. В исследовании подробно анализируется, как кадмий, накапливаясь в почве и растениях, попадает

в организм человека и оказывает воздействие на его здоровье.

Для актуализации информации по рассматриваемой проблеме были в основном использованы научные публикации за период с 2013 по 2024 гг.

Источники и пути миграции кадмия в окружающей среде

Кадмий является одним из ТМ, часто встречающихся в воздухе и почве промышленных агломераций [3]. Попадание кадмия в атмосферу происходит в виде частиц, состоящих из его оксида (CdO), образующегося в ходе высокотемпературных процессов при выплавке металлов из руд (45% общего загрязнения этим элементом), а также при сжигании угля и изделий, содержащих этот элемент [4]. Пыльные бури, вулканическая деятельность, выветривание, эрозия, лесные пожары также являются причинами повышения содержания кадмия в ОС. Вероятность атмосферного осаждения кадмия особенно высока в районах заброшенных металлических рудников [5]. Среднегодовой уровень содержания кадмия в атмосферном воздухе в холодный период года достигает 0,14 нг/м³; в атмосферных осадках – 0,035–0,13 мкг/л [5]. Кадмий способен перемещаться с потоком воздуха на значительные расстояния, в связи с чем его можно встретить на территориях, где отсутствуют его локальные источники загрязнения [6]. Среднегодовые потоки кадмия из атмосферы на поверхность почвы в центральной части европейской территории России в 2 раза меньше, чем в северных районах, и оцениваются как 0,030±0,005 кг/км²/год [7].

Значительная доля произведённого кадмия используется как компонент вторичных электрохимических источников тока: Ni-Cd аккумуляторы, Pb-Cd и Hg-Cd батарейки [8]; также его включают в состав антикоррозионных покрытий для микроэлектроники [9, 10], сплавов для изготовления регулирующих и аварийных стержней в атомных реакторах [11]. Кадмий в виде металла, сплава или его соединений входит в состав таких потребительских товаров как персональные компьютеры (<50 мкг/г), упаковочные материалы, краски, ювелирные изделия (<100 мкг/г) [12]. В СанПиН 2.4.7/1.1.1286-03 отмечено, что выделение кадмия, содержащегося в 1 кг любых материалов игрушки, не должно превышать 75 мг, формирующихся масс и красок – 50 мг. Вторичное производство кадмия в мире, в том

числе при переработке Ni-Cd батарей, составляет около 20% полного металлического производства [13]. Как побочный продукт, кадмий выделяют при рафинировании цинка, меди и свинца из сульфидных руд [4]. Отработанные материалы и изделия на основе кадмия, попадая в почву в форме производственных и бытовых отходов, а также продуктов горения в атмосферу, вносят значительный вклад в загрязнение ОС данным элементом [14].

Источниками кадмия являются также предприятия по производству пигментов, керамических изделий, аккумуляторов [15], цемента. Значимый вклад в загрязнение почв кадмием вносит эксплуатация автотранспорта [16–19], использование осадков сточных вод, фосфорных удобрений [20–22], пестицидов на основе глифосата [23, 24].

Попадание кадмия в пищевую цепь и токсичность

Согласно ГОСТ 17.4.1.02-83, кадмий классифицируется как канцероген 1-й группы. Он не входит в число необходимых для растений элементов питания [25, 26]. Растворимые формы кадмия в почве представлены чаще всего в виде анионов ($\text{Cd}(\text{HS})_4^{2-}$, $\text{Cd}(\text{OH})_3^-$, $\text{Cd}(\text{OH})_4^{2-}$ и CdCl_3^-) и катионов (CdHS^+ , CdOH^+ , CdHCO_3^+ , CdCl^+) [27]. Накапливаясь в почве, в том числе за счёт атмосферных выпадений, кадмий, в силу высокой мобильности, эффективно поглощается корневой системой растений и мигрирует по трофическим цепям [17, 28]. Попадая в организм человека, он оказывает патогенное действие, выражающееся в блокировании сульфгидрильных (SH) групп более 100 ферментов [29].

Среди продуктов растительного происхождения основными источниками кадмия для человека считают преимущественно злаки (зерновые) и листовые овощи. При этом отмечается, что степень усвоения кадмия из пищи хуже, чем с вдыхаемым воздухом (в том числе при курении). Установлено, что питьё «мягкой» воды повышает биодоступность кадмия из продуктов питания [29].

Поглощение кадмия из пищи осуществляется теми же транспортными системами, которые организм использует для получения кальция, железа, цинка и марганца. Установлено, что кадмий оказывает двухстороннее действие на физиологию кишечника. С одной стороны, он вызывает изменение структуры бактериальных популяций и их относительной численности (увеличение соотношения

Bacteroidetes и *Firmicutes*), что приводит к увеличению продукции липополисахаридов. С другой стороны, вызывает воспалительную реакцию и повреждение клеток кишечника, что приводит к увеличению проницаемости стенок для макромолекул [30]. Предполагается, что после всасывания в желудочно-кишечном тракте кадмий образует слабые связи с белками плазмы (альбумин), и переносится через портальную систему кровообращения к клеткам печени, где индуцирует синтез специфического металлсвязывающего белка с низким содержанием цистеина – металлотионеина (Cd-МТ) [31], который, выделяясь из печени в кровоток, достигает почек. После фильтрации он реабсорбируется в проксимальных канальцах и откладывается в почках в свободной форме. Последняя способна вызывать оксидативный стресс и повреждение клеток [32].

Накопление кадмия в организме человека в тяжёлых случаях вызывает остеопороз и остеомаляцию. Один из предполагаемых механизмов влияния кадмия на кости заключается в том, что металл нарушает почечный метаболизм витамина D, вследствие чего повышенное выведение кальция с мочой приводит к деминерализации [33].

В истории известны случаи потребления населением кадмия с пищей на уровне 300 мкг/день. В результате хронического воздействия у людей развивалась болезнь итай-итай, характеризующаяся нарушениями работы почек, остеомаляцией и остеопорозом. При этом большему риску развития заболевания были подвержены женщины (97,5%), чем мужчины [34].

Индикатором для оценки содержания кадмия в организме человека являются волосы, кровь, моча [35]. Референсным значением присутствия кадмия в организме человека является наличие его в крови на уровне 0,00015 мкг/мл.

Допустимые пределы и уровень содержания кадмия

Биодоступность и накопление кадмия в почвенно-растительных системах являются основным фактором его переноса на разные трофические уровни (рис.) [36]. В связи с этим содержание кадмия нормируется в почве, удобрениях, продовольственном сырье и пищевых продуктах.

Почва. Уровень содержания кадмия в почвах мира варьирует в широком диапазоне

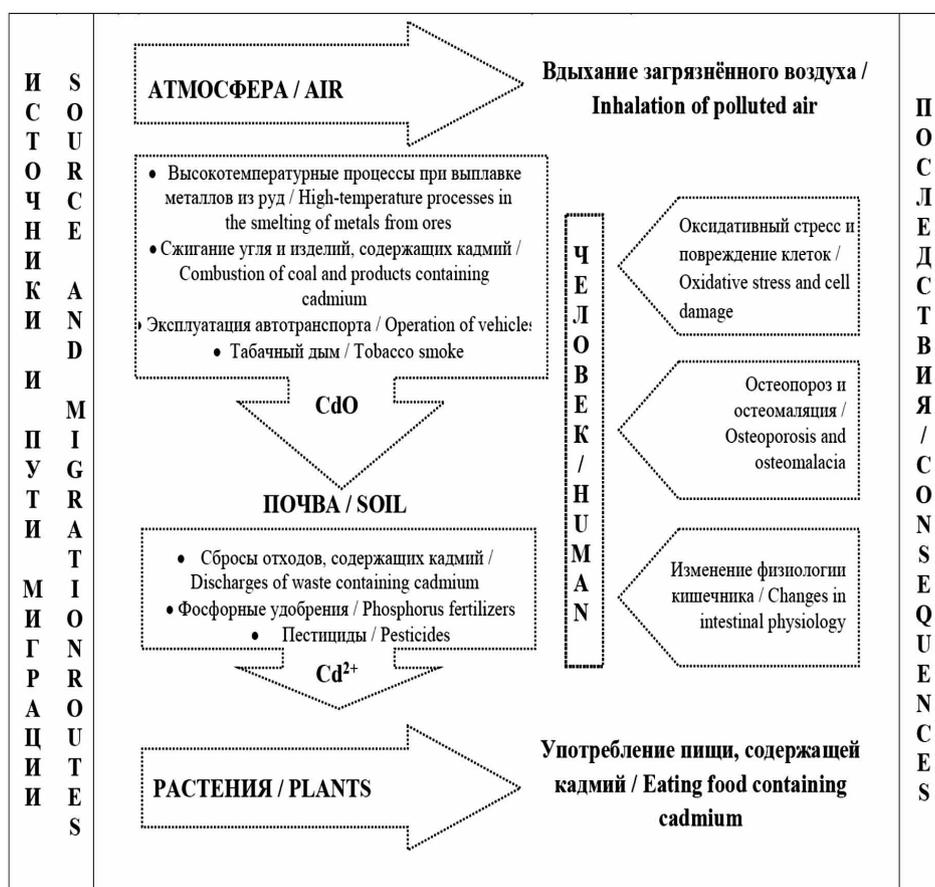


Рис. Блок-схема основных источников поступления, путей миграции и опасности кадмия для человека
 Fig. Diagram of the main sources of cadmium intake, migration routes and hazard to humans

Таблица 1 / Table 1

Содержание кадмия в пахотных почвах России
 Cadmium content in arable soils of Russia

Федеральный округ Federal District	Год Year	Среднее значение Average	Минимум Minimum	Максимум Maximum	Источник Source
Центральный ** Central	2016	0,32	0,28	0,36	[40]
Северо-Западный* North-West	2007	0,110	0,6	1,73	[41]
Южный* / South	2019	0,25	0,16*	0,27*	[42]
Приволжский* / Volga	2019	0,06*	0,04	0,08	[43]
Уральский* / Ural	2022	0,034	0,019	0,05	[44]
Сибирский* / Siberian	2017	0,25	0,13	0,36	[45]
Дальневосточный* Far Eastern	2021	0,17	0,10	0,24	[46]

Примечание: * – для подвижных соединений; ** – для валовых форм.
 Note: * – for mobile substances; ** – for bulk forms.

при средней концентрации 0,36 мг/кг [37, 38]. Согласно ВОЗ, почву, содержание кадмия в которой составляет 3,0 мг/кг, следует считать загрязнённой [39].

Согласно СанПиН 1.2.3685-21, в России ОДК (валовое содержание) кадмия для песчаных и супесчаных почв установлена на уровне

0,5 мг/кг; для суглинистых и глинистых почв – 1,0 мг/кг ($pH_{KCl} < 5,5$) и 2,0 мг/кг ($pH_{KCl} > 5,5$) соответственно.

Отмечено, что в число населённых пунктов, почвы которых загрязнены кадмием, входят города Свирск (Иркутская обл.), Кировоград, Ревда, Реж (Свердловская обл.),

Владикавказ (Республика Северная Осетия-Алания), Новосибирск (Новосибирская обл.) [3].

Уровень кадмия в пахотных почвах различных субъектов РФ значительно варьирует, зачастую не превышая ОДК (табл. 1).

Наличие кадмия в почвах определяется как антропогенными, так и естественными факторами. Значимое влияние на его содержание в почве оказывают процессы инфильтрации и выщелачивания [47].

Между содержанием кадмия в почве и наличием его в урожае существует прямая зависимость: поступающие в почву соли кадмия стимулируют переход в растворённое состояние валовых почвенных запасов, в результате чего количество подвижных соединений кадмия в почве оказывается равным или незначительно превалирует над содержанием его валовых форм [48].

Удобрения. Согласно Регламенту (ЕС) 2019/1009 Европейского парламента и Совета от 5 июня 2019 г., устанавливающего правила предоставления на рынок ЕС удобрений, содержание кадмия в удобрениях нормируется в пределах от 1,5 до 60,0 мг/кг в зависимости от их типа (табл. 2).

Согласно спецификации на удобрения и рекомендаций Продовольственной и сельскохозяйственной организации Объединённых Наций (ФАО), содержание кадмия в фосфатной породе для прямого внесения не должно превышать 27 мг/кг, для органических удобрений – 5 мг/кг, микроудобрений – 0,0025%.

Нормативная документация РФ (ГОСТ Р 58658-2019) регламентирует уровень кадмия в удобрениях в зависимости от вида и содер-

жания в нём фосфатов (не более 5% и равной или не менее 5%) – 3 и 20 мг/кг P_2O_5 соответственно. Согласно СанПиН 2.3.2.1078-01, допустимая концентрация кадмия в природных фосфатах, разрешённых для производства органических продуктов, не должна превышать 90 мг/кг P_2O_5 .

Следует отметить, что содержание кадмия в фосфорных удобрениях сильно варьирует и зависит от происхождения фосфоритного сырья. Для фосфоритов, добываемых на территории России, характерно невысокое содержание кадмия, что определяет конкурентные преимущества удобрений, произведённых на их основе [49].

Массовая концентрация кадмия в органических удобрениях нормируется ГОСТ Р 53117-2008 и не должна превышать 2,0 мг/кг сухого вещества. Среди органических удобрений минимальное содержание кадмия отмечается в навозе крупного рогатого скота – 0,01, максимальное в навозных стоках – 1,76 мг/кг сухого вещества [40].

Пищевые продукты, продовольственное сырьё, корма. Несмотря на установленные пределы содержания кадмия в продуктах питания, около 80% данного токсиканта поступает в организм человека через пищу [50]. Присутствие кадмия в продуктах питания сильно варьирует и зависит от географического положения, биодоступности кадмия из почвы, генетики сельскохозяйственных культур и используемых агрономических приёмов [51].

Нормы кадмия в различных категориях продуктов питания регламентированы СанПиН 2.3.2.1078-012, техническим регламентом Таможенного союза 021/20113 и составляют

Таблица 2 / Table 2

Нормы содержания кадмия в различных типах удобрений
Standards for cadmium content in various types of fertilizers

Тип удобрения Fertilizer type	Содержание кадмия Cadmium content
Органические удобрения, неорганические улучшители почвы и биостимуляторы растений Organic fertilizers, inorganic soil improvers and plant biostimulants	1,5 мг/кг сухого вещества 1.5 mg/kg dry matter
Органические улучшители почвы и известковые материалы Organic soil improvers and liming materials	2 мг/кг сухого вещества 2 mg/kg dry matter
Неорганические удобрения макроэлементов и органоминеральные удобрения с содержанием P_2O_5 менее 5% Inorganic macronutrient fertilizers and organomineral fertilizers with P_2O_5 content less than 5%	3 мг/кг P_2O_5 3 mg/kg P_2O_5
Неорганические удобрения макроэлементов и органоминеральные удобрения с содержанием P_2O_5 более 5% Inorganic macronutrient fertilizers and organomineral fertilizers with a P_2O_5 content of more than 5%	60 мг/кг P_2O_5 60 mg/kg P_2O_5

0,02–1,0 мг/кг. Наиболее низкие значения установлены для продуктов, предназначенных для питания беременных и кормящих женщин, а также для детского питания [52].

Согласно СанПиН 2.3.2.1078-012, норма содержания кадмия в продовольственном зерне (пшеница, рожь, тритикале, овёс, ячмень, просо, гречиха, рис, кукуруза, сорго), семенах зернобобовых (горох, фасоль, маш, чина, чечевица, нут) составляет 0,1 мг/кг. Средняя концентрация кадмия в рисе может в 3 и 8 раз превышать его содержание в пшенице и других злаках соответственно [53].

Уровень кадмия в различных продуктах питания варьирует в широких пределах. Например, в картофеле, корнеплодах (морковь, свёкла) и овощах (кабачки, капуста, лук, огурцы, томаты, тыква, цукини), выращенных в районе размещения промышленных предприятий, содержание кадмия может достигать 0,002–0,004; 0,01–0,02; 0,005–0,009 мкг/кг сырого веса соответственно [54]. По данным субъектов РФ, концентрация кадмия в фруктах может достигать 0,012 мг/кг; в хлебобулочных изделиях – 0,026; крупах и макаронных изделиях – 0,043 мг/кг [55].

Согласно установленному временному максимально-допустимому уровню содержания некоторых химических элементов и госсипола в кормах для сельскохозяйственных животных и кормовых добавках (ВМДУ-87), уровень кадмия в комбикормах для сельскохозяйственных животных составляет 0,3–0,4 мг/кг; зерно, зернофураж, грубые и сочные корма, корнеклубнеплоды, корма микробного синтеза – 0,3 мг/кг; минеральные добавки – 0,4 мг/кг. В зонах промышленных выбросов и рудных разработок, где отмечается повышенная концентрация кадмия в кормах для животных, рекомендуется вводить в их рацион серу или тиосульфат натрия из расчёта 100–120 мг/кг корма.

Ремедиация загрязнённых кадмием почв *in situ*

Для снижения вероятности попадания кадмия в пищевые цепи разрабатываются различные стратегии очистки почв от данного токсиканта [56]. Всё больший интерес вызывает ремедиация *in situ* [51], которая включает удаление кадмия из почвы или сдерживание его распространения на заданной территории [57].

Актуальным направлением ремедиации *in situ* является фиторемедиация. Способ предполагает использование растений гипер-

аккумуляторов, способных извлекать кадмий из почвы, накапливать и транслоцировать его от корня к побегу, и, при этом, выживать при высокой концентрации кадмия в тканях [58]. Резистентность к цитотоксичности ТМ у гипераккумуляторов чаще всего связывают с эффективной изоляцией поступающих поллютантов в различные клетки, что позволяет избегать их негативного влияния на процессы дыхания и фотосинтеза [59].

Способность растений накапливать кадмий зависит как от видоспецифичности, так и от концентрации кадмия в почве. Примерами гипераккумуляторов кадмия являются лантана сводчатая (*Lantana camera* L.) [60], горчица сарептская (*Brassica juncea* L.) [61], рапс (*Brassica napus* L.), клещевина (*Ricinus communis* L.) [62]. Выраженную естественную способность к поглощению кадмия из почвы и транслокацию его от стебля к листьям проявляет табак (*Nicotiana tabacum* L.) [63]. Концентрация кадмия в его листьях при выращивании на загрязнённых кадмием почвах может достигать 10 мг/кг [64]. Следует отметить, что табак, богатый кадмием, является одним из приоритетных путей попадания этого металла в организм человека при курении. Установлено, что от 81 до 90% кадмия, содержащегося в сигаретах, не только переносится в кровоток курильщика, но и в ОС с дымом [65].

Для повышения фиторемедиационной эффективности растений-гипераккумуляторов кадмия предлагается проводить трансформацию растений фитохелатиновыми генами (РРН), кодирующими синтез металлсвязывающих пептидов. В настоящее время создан вектор pCambia1305.1-rph6 для получения трансгенных модельных растений табака. Показано, что при концентрации кадмия в почве 100 мкМ трансгенные растения, экспрессирующие ген *rph6*, накапливают на 35% больше кадмия, чем контрольные растения [66]. Доказано, что продукт экспрессии гена *rph6his* – металлсвязывающий пептид, может быть перспективным кандидатом для повышения аккумулятивных свойств трансгенных растений табака. Трансформированные данным геном линии аккумулируют больше кадмия, чем контрольные растения; у линий наблюдаются признаки устойчивости к кадмиевому стрессу, выражающиеся в сохранении регенерационного потенциала и значительно меньшем уровне хлороза листьев [67].

Диссоциация в почвенном растворе и биодоступность кадмия напрямую связана со значениями pH: с уменьшением концентрации

ионов водорода в почве поглощение кадмия растениями снижается [68]. В связи с этим при фиторемедиации почвы подкисляют [69].

Поскольку фиторемедиация, по-прежнему, ограничена медленным ростом растений и длительностью восстановления почв, относительно новым направлением стало использование штаммов эндофитных бактерий, обладающих комплексом свойств, направленных на улучшение роста растений и увеличение поглощения ими ионов кадмия из почвы. Например, известны штаммы бактерий рр. *Burkholderia*, *Pseudomonas*, *Pantoea* и *Herbaspirillum*, толерантные к кадмию и продуцирующие гидроксаматные сидерофоры (32,40–91,49%), хелатирующие ионы токсичного металла в почве. Кроме того, они способны оказывать положительное влияние на рост растений за счёт синтеза индолилуксусной кислоты, 1-аминоциклопропан-1-карбоксилатдезаминазы, солюбилизации фосфора в почве, фиксации азота [70].

Экономически эффективным вариантом восстановления загрязнённой кадмием почвы является использование органических добавок. Среди них навоз животных, опилки, биоуголь, рисовая шелуха, снижающие биодоступность кадмия и его поглощение растениями за счёт процессов адсорбции и комплексообразования. Однако необходимо учитывать, что некоторые из них могут также являться дополнительным источником кадмия, в связи с чем необходим контроль за уровнем токсичного металла в этих добавках [71].

Агрономические методы снижения поглощения кадмия сельскохозяйственными культурами

Получение растениеводческой продукции с низким содержанием кадмия может значительно уменьшить воздействие данного металла на организм человека. Для снижения поглощения кадмия сельскохозяйственными культурами используются различные методы. Среди них применение различных биопрепаратов и агрохимикатов для повышения устойчивости растений к кадмиевому стрессу. На примере эндофитных штаммов бактерий *Bacillus subtilis* показана эффективность обработки семян растений *Sinapis alba* L. в снижении развития окислительного стресса, вызванного кадмием [72]. Показано, что в присутствии кадмия у растений пшеницы, семена которых инокулированы *B. subtilis*, повышается активность каталазы и пероксида-

зы, уменьшается интенсивность перекисного окисления липидов, увеличивается содержание непротеиноновых тиолов; уменьшается накопление кадмия в побегах [73]. Описаны арбускулярные микоризные грибы, вступающие в симбиотические отношения с корнями растений и тем самым увеличивающие их способность к поглощению питательных веществ, уменьшая при этом поглощение кадмия из почвы [74].

Отмечается важность кремниевого питания, которое может значительно снизить токсичность кадмия [75]. Конкуренцию при поглощении кадмия корнями растений могут составить органические удобрения, являющиеся источниками элементов питания [71]. Снизить биодоступность кадмия в почве возможно посредством известкования кислых почв [76].

Отмечается возможность повышения устойчивости растений к кадмиевому стрессу за счёт предварительной обработки семян различными видами излучения (He-Ne, микроволновое). На примере пшеницы были проведены эксперименты с применением лазера и микроволн для увеличения устойчивости растений к кадмию [77].

Относительно новым подходом, позволяющим повысить безопасность растениеводческой продукции, считаются системы совмещения сельскохозяйственных культур с гипераккумуляторами (*Pontederia cordata* и *Canna indica*, *Sedum plumbizincicola* и *Zea mays*) [78, 79].

Использование сортов с низким уровнем накопления кадмия – ещё одна стратегия снижения поглощения данного токсиканта сельскохозяйственными культурами. В настоящее время активно разрабатываются программы селекции различных культур с низким уровнем накопления кадмия, включая пшеницу, подсолнечник, рис и сою [80]. Предложены схемы клеточной селекции стресс-толерантных к кадмию сортов ячменя, обеспечивающих сокращение потерь урожая и противодействие биоаккумуляции ионов токсичного металла в зерне [81].

Для сортов с высоким содержанием кадмия альтернативой снижению его накопления становятся молекулярно-генетические технологии [82]. В настоящее время обнаружен ряд генов, отвечающих за толерантность растений к кадмию (OSISAP1, Os HsfA4a, ricMT, rgMTOc HsfA4a, ricMT, rgMT) [83].

Показана возможность влияния на мобильность и биодоступность кадмия при вы-

ращивании риса путём управления водными ресурсами. Так, при аэробном культивировании риса обнаружены значительно более высокие концентрации кадмия в зерне, чем при затопленном культивировании в постмуссонных испытаниях [84].

Заключение

Изучение распространения кадмия в ОС имеет большое значение в оценке риска для здоровья населения и охраны ОС. Попадание кадмия в пищевые цепи связано как с антропогенными, так и естественными процессами. В связи с канцерогенным действием необходимо обратить внимание на ограничение выбросов кадмия в атмосферу, разработку экологически безопасных методов производства и использования кадмия.

Поглощение и накопление кадмия растениями, в частности, сельскохозяйственного назначения, приводит к повышению рисков попадания его в организм человека. Для предотвращения долгосрочного воздействия кадмия на человека необходимо контролировать его содержание не только в продуктах питания, но и объектах ОС; разрабатывать стратегии по снижению его содержания в ОС. Положительную роль в сокращении содержания кадмия в атмосфере и почве играет растительность, и, в первую очередь, травянистые растения, которые способны в процессе транслокации не только его удалять, но и способствовать восстановлению потенциального плодородия почв.

References

- Maddala N.R., Kakarla D., Garcia L.Z., Chakraborty S., Venkateswarlu K., Megharaj M. Cocoa-laden cadmium threatens human health and cacao economy: A critical view // *Sci. Total Environ.* 2020. V. 720. Article No. 137645. doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.137645
- Satarug S., Vesey D.A., Gobe G.C., Phelps K.R. Estimation of health risks associated with dietary cadmium exposure // *Arch. Toxicol.* 2023. V. 97. No. 2. P. 329–358. doi: 10.1007/s00204-022-03432-w
- State Report “On the state and environmental protection of the Russian Federation in 2022” [Internet resource] <https://2022.ecology-gosdoklad.ru/> (Accessed: 11.06.2024)
- Elinder C.G. Cadmium: uses, occurrence, and intake // *Cadmium and Health: A toxicological and epidemiological appraisal* / Eds. L. T. Friberg, C.G. Elinder, T. Kjellstrom, G.F. Nordberg. V. 1. CRC Press, 1986. P. 23–64. doi: 10.1201/9780429260605
- Ober J.A. Mineral commodity summaries 2016. US Geological Survey, 2016. 202 p. doi: 10.3133/70170140
- Vilk M.F., Aksenov V.A., Yudaeva O.S., Prostopolotova V.B., Ovanesova E.A. Technical and operational methods to ensure environmental and toxicological safety of traction motors of railway rolling stock // *Security Problems of the Russian Society.* 2017. V. 4. P. 96–107 (in Russian).
- Vinogradova A.A. Lead and cadmium fluxes from atmosphere onto the surface in European Russia – from EMEP data // *International Journal of Applied and Fundamental Research.* 2015. No. 12. P. 111–115 (in Russian).
- Kozub S.N. Analysis of current state and choice of raw material of secondary cadmium technology // *Technology Audit and Production Reserves.* 2015. V. 1. No. 4. P. 37–41 (in Russian). doi: 10.15587/2312-8372.2015.38113
- Tuhtamisheva D.Yu., Hesenov A.U., Rashidova N.T. Modern ways to protect metal from corrosion // *Educational Research in Universal Sciences.* 2024. V. 3. Special No. 2. P. 641–644 (in Russian).
- Pelyasova D.A., Lwin Ko Ko, Kvasnikov M.Yu. Pigmented cadmium-polymer coatings // *Uspekhi v himii i himicheskoy tekhnologii.* 2018. V. 32. No. 6. P. 138–140 (in Russian).
- Akhmetzyanov B.N., Vasilieva A.V., Getman A.A. The use of cadmium-based alloys // *Metallurgiya mashinostroeniya.* 2020. No. 4. P. 32–33 (in Russian).
- Turner A. Cadmium pigments in consumer products and their health risks // *Sci. Total Environ.* 2019. V. 657. P. 1409–1418. doi: 10.1016/j.scitotenv.2018.12.096
- Bortnikov N.S., Volkov A.V., Galyamov A.L., Vikent'ev I.V., Aristov V.V., Lalomov A.V., Murashov K.Yu. Mineral resources of high-tech metals in Russia: state of the art and outlook // *Geol. Ore Deposits.* 2016. V. 58. No. 2. P. 83–103. doi: 10.1134/S1075701516020021
- Brunner P.H., Rechberger H. Waste to energy – key element for sustainable waste management // *Waste Manag.* 2015. V. 37. P. 3–12. doi: 10.1016/j.wasman.2014.02.003
- Yuan Z., Luo T., Liu X., Hua H., Zhuang Yu., Zhang X., Zhang L., Zhang Y., Xu W., Ren J. Tracing anthropogenic cadmium emissions: From sources to pollution // *Sci. Total Environ.* 2019. V. 676. P. 87–96. doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.04.250
- Golovaty S.E., Savchenko S.V., Samsuk E.A. Cadmium, zinc and lead in soils in the zone of influence of the industrial enterprises // *J. Belarus. State Univ. Ecol.* 2017. No. 4. P. 70–80 (in Russian).
- Nduka J.K., Kelle H.I., Amuka J.O. Health risk assessment of cadmium, chromium and nickel from car paint dust from used automobiles at auto-panel workshops in Nigeria // *Toxicol. Rep.* 2019. V. 6. P. 449–456. doi: 10.1016/j.toxrep.2019.05.007
- Es'kov E.K., Es'kova M.D. Accumulation of lead and cadmium by different plant organs depending on their

- distance from the highway // *Agrochemistry*. 2013. No. 5. P. 81–85 (in Russian).
19. Elehinafe F.B., Mamudu A.O., Okedere O.B., Ibitoye A. Risk assessment of chromium and cadmium emissions from the consumption of premium motor spirit (PMS) and automotive gas oil (AGO) in Nigeria // *Heliyon*. 2020. V. 6. No. 11. Article No. e05301. doi: 10.1016/j.heliyon.2020.e05301
20. Kakareka S.V., Salivonchik S.V. Forecasting heavy metal pollution of soils in an administrative district of Belarus // *Geografiya i prirodnye resursy*. 2017. No. 3. P. 179–188 (in Russian). doi: 10.21782/GIPR0206-1619-2017-3(179-188)
21. Chetyerbotskiy V.A., Chetyerbotskiy A.N. Estimation of cadmium contamination of agrocenosis by mathematical modeling methods // *Agrochemistry*. 2020. No. 4. P. 85–93 (in Russian). doi: 10.31857/S0002188120040031
22. Salmanzadeh M., Hartland A., Stirling C.H., Balks M.R., Schipper L.A., Joshi C., George E. Isotope tracing of long-term cadmium fluxes in an agricultural soil // *Environ. Sci. Technol.* 2017. V. 51. No. 13. P. 7369–7377. doi: 10.1021/acs.est.7b00858
23. Defarge N., Spiroux de Vendômois J., Séralini G.E. Toxicity of formulants and heavy metals in glyphosate-based herbicides and other pesticides // *Toxicol. Rep.* 2018. V. 5. P. 156–163. doi: 10.1016/j.toxrep.2017.12.025
24. Jacques M.T., Bornhorst J., Soares M.V., Schwerttle T., Garcia S., Ávila D.S. Reprotoxicity of glyphosate-based formulation in *Caenorhabditis elegans* is not due to the active ingredient only // *Environ. Pollut.* 2019. V. 252 (Pt B). P. 1854–1862. doi: 10.1016/j.envpol.2019.06.099
25. Shupletsova O.N., Tovstik E.V. Accumulation of cadmium and zinc in barley regenerants on a provocative soil background with cadmium // *Proceedings on Applied Botany, Genetics and Breeding*. 2021. V. 182. No. 4. P. 117–125 (in Russian). doi: 10.30901/2227-8834-2021-4-117-125
26. Tuktarova Yu.V., Farkhutdinov R.G. Bioaccumulation of heavy metals in the soil-plant-bee-honey trophic chain // *Agrochemistry*. 2013. No. 6. P. 78–82.
27. Liu G., Xue W., Wang J., Liu X. Transport behavior of variable charge soil particle size fractions and their influence on cadmium transport in saturated porous media // *Geoderma*. 2019. V. 337. P. 945–955. doi: 10.1016/j.geoderma.2018.11.016
28. Kaloev B.S., Kumsiev E.I. Monitoring of heavy metals in the system “soil–plant food” // *Izvestiya Gorskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*. 2014. V. 51. No. 4. P. 170–174 (in Russian).
29. Fajzullina R.A., Mal'cev S.V. Metabolism of trace elements and diseases of the digestive system // *Diseases of the stomach and duodenum in children* / Eds. S.V. Bel'mer, A.Yu. Razumovskiy, A.I. Havkin. Moskva: ID "MED-PRAKTIKA-M", 2017. P. 218–253 (in Russian).
30. Tinkov A.A., Gritsenko V.A., Skalnaya M.G., Cherkasov S.V., Aaseth J., Skalny A.V. Gut as a target for cadmium toxicity // *Environ. Pollut.* 2018. V. 235. P. 429–434. doi: 10.1016/j.envpol.2017.12.114
31. Akhpolova V.O., Brin V.B. Actual concepts of heavy metals' kinetics and pathogenesis of toxicity // *Journal of New Medical Technologies*. 2020. V. 27. No. 1. P. 55–61 (in Russian). doi: 10.24411/1609-2163-2020-16578
32. Andjelkovic M., Buha Djordjevic A., Antonijevic E., Antonijevic B., Stanic M., Kotur-Stevuljevic J., Spasojevic-Kalimanovska V., Jovanovic M., Boricic N., Wallace D., Bulat Z. Toxic effect of acute cadmium and lead exposure in rat blood, liver, and kidney // *Int. J. Environ. Res. Public Health*. 2019. V. 16. No. 2. Article No. 274. doi: 10.3390/ijerph16020274
33. Fazlieva A.S., Daukaev R.A., Karimov D.O. Influence of cadmium on population health and methods for preventing its toxic effects // *Occupational Health and Human Ecology*. 2022. V. 1. P. 220–235 (in Russian). doi: 10.24411/2411-3794-2022-10115
34. Aoshima K. *Itai-itai* disease: Renal tubular osteomalacia induced by environmental exposure to cadmium – historical review and perspectives // *Soil Sci. Plant Nutr.* 2016. V. 62. No. 4. P. 319–326. doi: 10.1080/00380768.2016.1159116
35. Lastkov D.O., Dubovaya A.V., Ezheleva M.I., Ostrenko V.V. Assessment of biomarkers as indicators of heavy metals' influence on the health of the adult population // *University Clinic*. 2023. V. 3. No. 44. P. 5–12 (in Russian).
36. Suhani I., Sahab S., Srivastava V., Singh R.P. Impact of cadmium pollution on food safety and human health // *Curr. Opin. Toxicol.* 2021. V. 27. P. 1–7. doi: 10.1016/j.cotox.2021.04.004
37. Rakhymgozhina A., Atabayeva S., Shoinbekova S., Asrandina S., Doktyrbay G. Effect of plant growth regulators on rice plants (*Oryza sativa* L.) growth under cadmium stress // *BIO Web Conf.* 2024. V. 100. Article No. 02001. doi: 10.1051/bioconf/202410002001
38. Khan S., Naushad M., Lima E.C., Zhang S., Shaheen S.M., Rinklebe J. Global soil pollution by toxic elements: Current status and future perspectives on the risk assessment and remediation strategies – A review // *J. Hazard. Mater.* 2021. V. 417. Article No. 126039. doi: 10.1016/j.jhazmat.2021.126039
39. Ediene V., Umoetok S. Concentration of heavy metals in soils at the municipal dumpsite in Calabar metropolis // *Asian Journal of Environment & Ecology*. 2017. V. 3. No. 2. P. 1–11. doi: 10.9734/AJEE/2017/34236
40. Selyukova S.V. Heavy metals concentration in organic fertilizers // *Agrohimicheskij vestnik*. 2016. No. 5. P. 47–51 (in Russian).
41. Matinyan Ya.N., Reymann K., Bakhmatova K.A., Rusakov A.V. The background concentrations of heavy metals and As in arable soils of the Baltic region // *Biological Communications*. 2007. No. 3. P. 123–134 (in Russian).
42. Zabashta A.V., Zabashta N.N., Lisovitskaya E.P. Accumulation of heavy metals in soils of foothal areas of Krasnodar Kray // *Vestnik of Kazan State Agrarian*

- University. 2019. V. 14. No. 1. P. 22–26 (in Russian). doi: 10.12737/article_5ccedba6e0c8c9.68580698
43. Tovstik E.V., Kazakova A.A. The influence of soil acidity on the migration of zinc and cadmium in the soil-plant system // *Tendencii razvitiya nauki i obrazovaniya*. 2019. No. 50–1. P. 40–43 (in Russian). doi: 10.18411/lj-05-2019-12
44. Evtushkova E.P., Soloshenko A.I. Monitoring of agrochemical indicators of fertility of arable soils of the Tyumen region // *International Agricultural Journal*. 2023. V. 66. No. 4. P. 1225–1249 (in Russian). doi: 10.55186/25876740_2023_7_4_14
45. Komarov V.I., Selivanov O.G., Martsev A.A., Podoletc A.A., Lukyanov S.N. Heavy metals contamination in arable horizon of soils of agricultural appointment of the Vladimir region // *Agrochemistry*. 2019. No. 12. P. 75–82 (in Russian). doi: 10.1134/S0002188119100089
46. Ermakova S.V. Heavy metal content in soils of agricultural land in south-eastern Kamchatka on the territory of the Yelizovsky district // *Natural resources, their current state, protection, commercial and technical utilization: materialy Nacional'noy (vserossiyskoy) nauchno-prakticheskoy konferencii. Petropavlovsk-Kamchatskiy: KamchatGTU*, 2022. P. 169–172 (in Russian).
47. Zhao C., Ren S., Zuo Q., Wang S., Zhou Y., Liu W., Liang S. Effect of nanohydroxyapatite on cadmium leaching and environmental risks under simulated acid rain // *Sci. Total Environ*. 2018. V. 627. P. 553–560. doi: 10.1016/j.scitotenv.2018.01.267
48. Slabko Y.I., Lopatina A.A. Cadmium accumulation in soil and plants of soybean under the influence of mineral fertilizers // *The Bulletin of KrasGAU*. 2016. No. 2. P. 19–23 (in Russian).
49. Syrchina N.V., Ashikhmina T.Ya., Bogatyryova N.N., Kantor G.Ya. Prospects for using phosphate rock enrichment tailings as fertilizers for organic farming // *Theoretical and Applied Ecology*. 2020. No. 1. P. 160–166 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2020-1-160-166
50. Kuzmin S.V., Rusakov V.N., Setko A.G., Sinit-syna O.O. Toxicological and hygienic aspects of the dietary cadmium intake and its human health effects: a literature review // *Public Health and Life Environment – PH&LE*. 2024. No. 32 (7). P. 49–57 (in Russian). doi: 10.35627/2219-5238/2023-32-7-49-57
51. Schaefer H.R., Dennis S., Fitzpatrick S. Cadmium: Mitigation strategies to reduce dietary exposure // *J. Food Sci*. 2020. V. 85. No. 2. P. 260–267. doi: 10.1111/1750-3841.14997
52. Kulikova E.G., Blinokhvatova Yu.V. Safety and quality of food products, food raw materials and feed in conditions of intensive production technologies // *Surskiy vestnik*. 2021. No. 1. P. 15–18 (in Russian). doi: 10.36461/2619-1202_2021_13_01_003
53. Song Y., Wang Y., Mao W., Sui H., Yong L., Yang D., Jiang D., Zhang L., Gong Y. Dietary cadmium exposure assessment among the Chinese population // *PloS One*. 2017. V. 12. No. 5. Article No. e0177978. doi: 10.1371/journal.pone.0177978
54. Panov A.V., Trapeznikov A.V., Korzhavin A.V., Sidorova E.V., Korneev Yu.N. Heavy metals and arsenic in foodstuffs in the vicinity of industrial enterprises and nuclear power plant // *Gigiena i sanitariya*. 2023. V. 102. No. 1. P. 70–76 (in Russian). doi: 10.47470/0016-9900-2023-102-1-70-76
55. Shur P.Z., Fokin V.A., Novosyolov V.G. On the issue of assessing the acceptable daily intake of cadmium with food // *Zdorov'e naseleniya i sreda obitaniya*. 2015. No. 12 (273). P. 30–32 (in Russian).
56. Han X.Q., Xiao X.Y., Guo Z.H., Xie Y.H., Zhu H.W., Peng C., Liang Y.Q. Release of cadmium in contaminated paddy soil amended with NPK fertilizer and lime under water management // *Ecotoxicol. Environ. Saf*. 2018. V. 159. P. 38–45. doi: 10.1016/j.ecoenv.2018.04.049
57. Koptsik G.N. Modern approaches to remediation of heavy metal polluted soils: a review // *Eurasian Soil Sc*. 2014. V. 47. No. 7. P. 707–722. doi: 10.1134/S1064229314070072
58. Tao Q., Zhao J., Li J., Liu Y., Luo J., Yuan S., Li B., Li Q., Xu Q., Yu X., Huang H., Li T., Wang C. Unique root exudate tartaric acid enhanced cadmium mobilization and uptake in Cd-hyperaccumulator *Sedum alfredii* // *J. Hazard. Mater*. 2020. V. 383. Article No. 121177. doi: 10.1016/j.jhazmat.2019.121177
59. Wen J., Zhou J., Zhang R., Ren W., Zhao J., Cai D. Current advances of the valorization technologies for heavy metal containing hyperaccumulators // *Ind. Crop. Prod*. 2024. V. 209. No. 1. Article No. 118051. doi: 10.1016/j.indcrop.2024.118051
60. Liu S., Ali S., Yang R., Tao J., Ren B. A newly discovered Cd-hyperaccumulator *Lantana camara* L. // *J. Hazard. Mater*. 2019. V. 371. P. 233–242. doi: 10.1016/j.jhazmat.2019.03.016
61. Dhaliwal S.S., Sharma V., Kaur J., Shukla A.K., Singh J., Singh P. Cadmium phytoremediation potential of *Brassica* genotypes grown in Cd spiked Loamy sand soils: Accumulation and tolerance // *Chemosphere*. 2022. V. 302. Article No. 134842. doi: 10.1016/j.chemosphere.2022.134842
62. Frunze O.V. Sorption capacity of some types of ornamental herbaceous plants under conditions of controlled soil contamination with cadmium ions // *Bulletin of Donetsk National University. Series A: Natural Sciences*. 2023. No. 1. P. 105–111 (in Russian).
63. Mench M., Tancogne J., Gomez A., Juste C. Cadmium bioavailability to *Nicotiana tabacum* L., *Nicotiana rustica* L., and *Zea mays* L. grown in soil amended or not amended with cadmium nitrate // *Biol. Fert. Soils*. 1989. V. 8. P. 48–53. doi: 10.1007/BF00260515
64. Li C., Zhang C., Yu T., Liu X., Yang Y., Hou Q., Yang Z., Ma X., Wang L. Use of artificial neural network to evaluate cadmium contamination in farmland soils in a karst area with naturally high background values //

- Environ. Pollut. 2022. V. 304. Article No. 119234. doi: 10.1016/j.envpol.2022.119234
65. Pinto E., Cruz M., Ramos P., Santos A., Almeida A. Metals transfer from tobacco to cigarette smoke: Evidences in smokers' lung tissue // J. Hazard. Mater. 2017. V. 325. P. 31–35. doi: 10.1016/j.jhazmat.2016.11.069
66. Hakimova L.R., Blagova D.K., Lavina A.M., Serbaeva E.R., Sadykova L.R., Vershinina Z.R., Bajmiev Al.Kh. Creation of microbial-plant communities for phytoremediation // Doklady Bashkirskogo Universiteta. 2018. V. 3. No. 4. P. 473–476 (in Russian).
67. Vershinina Z.R., Maslennikova D.R., Chubukova O.V., Khakimova L.R., Fedyaev V.V. Contribution of artificially synthesized phytonelatin, encoded by the gene *PPH6HIS* to increase the phytoremediative qualities of tobacco plants // Russ. J. Plant Physiol. 2022. V. 69. No. 4. Article No. 71. doi: 10.1134/S1021443722040185
68. Meng L., Huang T., Shi J., Chen J., Zhong F., Wu L., Xu J. Decreasing cadmium uptake of rice (*Oryza sativa* L.) in the cadmium-contaminated paddy field through different cultivars coupling with appropriate soil amendments // J. Soils Sediments. 2019. V. 19. P. 1788–1798. doi: 10.1007/s11368-018-2186-x
69. Yang Q., Yang C., Yu H., Zhao Z., Bai Z. The addition of degradable chelating agents enhances maize phytoremediation efficiency in Cd-contaminated soils // Chemosphere. 2021. V. 269. Article No. 129373. doi: 10.1016/j.chemosphere.2020.129373
70. Li Y., Wei S., Chen X., Dong Y., Zeng M., Yan C., Hou L., Jiao R. Isolation of cadmium-resistance and siderophore-producing endophytic bacteria and their potential use for soil cadmium remediation // Heliyon. 2023. V. 9. No. 7. Article No. e17661. doi: 10.1016/j.heliyon.2023.e17661
71. Khan M.A., Khan S., Khan A., Alam M. Soil contamination with cadmium, consequences and remediation using organic amendments // Sci. Total Environ. 2017. V. 601–602. P. 1591–1605. doi: 10.1016/j.scitotenv.2017.06.030
72. Kuramshina Z.M., Smirnova Y.V., Khairullin R.M. Cadmium and nickel toxicity for *Sinapis alba* plants inoculated with endophytic strains of *Bacillus subtilis* // Russ. J. Plant Physiol. 2018. V. 65. No. 2. P. 269–277. doi: 10.1134/S1021443718010077
73. Kuramshina Z.M., Smirnova Y.V., Khairullin R.M. Increasing *Triticum aestivum* tolerance to cadmium stress through endophytic strains of *Bacillus subtilis* // Russ. J. Plant Physiol. 2016. V. 63. No. 5. P. 636–644. doi: 10.1134/S102144371605008
74. Hamid Y., Tang L., Sohail M.I., Cao X., Hussain B., Aziz M.Z., Usman M., He Z., Yang X. An explanation of soil amendments to reduce cadmium phytoavailability and transfer to food chain // Sci. Total Environ. 2019. V. 660. P. 80–96. doi: 10.1016/j.scitotenv.2018.12.419
75. Sarwar N., Saifullah, Malhi S.S., Zia M.H., Naeem A., Bibi S., Farid G. Role of mineral nutrition in minimizing cadmium accumulation by plants // J. Sci. Food Agric. 2010. V. 90. No. 6. P. 925–937. doi: 10.1002/jsfa.3916
76. Chen H., Zhang W., Yang X., Wang P., McGrath S.P., Zhao F.J. Effective methods to reduce cadmium accumulation in rice grain // Chemosphere. 2018. V. 207. P. 699–707. doi: 10.1016/j.chemosphere.2018.05.143
77. Rizwan M., Ali S., Abbas T., Zia-Ur-Rehman M., Hannan F., Keller C., Al-Wabel M.I., Ok Y.S. Cadmium minimization in wheat: a critical review // Ecotoxicol. Environ. Saf. 2016. V. 130. P. 43–53. doi: 10.1016/j.ecoenv.2016.04.001
78. Xiang H., Lan N., Wang F., Zhao B., Wei H., Zhang J. An effective planting model to decrease cadmium accumulation in rice grain and plant: Intercropping rice with wetland plants // Pedosphere. 2023. V. 33. No. 2. P. 355–364. doi: 10.1016/j.pedsph.2022.06.054
79. Deng L., Li Z., Wang J., Liu H., Li N., Wu L., Hu P., Luo Y., Christie P. Long-term field phytoextraction of zinc/cadmium contaminated soil by *Sedum plumbizincicola* under different agronomic strategies // Int. J. Phytoremediation. 2016. V. 18. No. 2. P. 134–140. doi: 10.1080/15226514.2015.1058328
80. Grant C.A., Clarke J.M., Duguid S., Chaney R.L. Selection and breeding of plant cultivars to minimize cadmium accumulation // Sci. Total Environ. 2008. V. 390. No. 2–3. P. 301–310. doi: 10.1016/j.scitotenv.2007.10.038
81. Shirokikh I.G., Shupletsova O.N., Tovstik E.V., Ogorodnikova S.Yu., Nazarova Ya.I., Berezin G.I. Comprehensive assessment of barley plants regenerated from resistant to cadmium callus lines // Agricultural Science Euro-North-East. 2018. No. 4 (65). P. 19–29 (in Russian). doi: 10.30766/2072-9081.2018.65.4.19-29
82. Hussain B., Umer M.J., Li J., Ma Y., Abbas Y., Ashraf M.N., Tahir N., Ullah A., Gogoi N., Farooq M. Strategies for reducing cadmium accumulation in rice grains // J. Clean. Prod. 2021. V. 286. Article No. 125557. doi: 10.1016/j.jclepro.2020.125557
83. Sebastian A., Prasad M.N.V. Cadmium minimization in rice. A review // Agron. Sustain. Dev. 2014. V. 34. P. 155–173. doi: 10.1007/s13593-013-0152-y
84. Majumder S., Powell M.A., Biswas P.K., Banik P. The role of agronomic factors (rice cultivation practices and soil amendments) on Arsenic fractionation: A strategy to minimise Arsenic uptake by rice, with some observations related to cadmium // Catena. 2021. V. 206. Article No. 105556. doi: 10.1016/j.catena.2021.105556