

УДК 632.122.1:635.18

АККУМУЛЯЦИЯ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ В ОВОЩНЫХ КУЛЬТУРАХ© 2022 г. В. Н. Башкин^{1,*}, Р. А. Галиулина²¹ Институт физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН
142290 Пущино, Московская обл., ул. Институтская, 2, Россия² Институт фундаментальных проблем биологии РАН
142290 Пущино, Московская обл., ул. Институтская, 2, Россия

*E-mail: vladimrbashkin@yandex.ru

Поступила в редакцию 03.08.2021 г.

После доработки 18.08.2021 г.

Принята к публикации 15.10.2021 г.

Рассмотрены подходы к оценке риска накопления тяжелых металлов (ТМ) в овощных культурах, выращиваемых в открытом и защищенном грунте, в том числе в условиях гидропоники. Показаны агрохимические, биохимические, биогеохимические и медицинские аспекты аккумуляции этих металлов в овощной продукции. Оценено, что по сравнению с органическими удобрениями минеральные удобрения играют сугубо подчиненную роль как источник ТМ для овощных культур. Ситуация усложняется при выращивании этих культур в условиях гидропоники, поскольку возможно накопление вредных элементов в товарной части продукции вследствие постоянного контакта корней растений с питательным раствором, содержащим микропримеси ТМ. Показано, что управление риском накопления ТМ в овощных культурах возможно с помощью различных штаммов микроорганизмов, вносимых в ризосферу и способствующих как иммобилизации этих металлов в почве или питательном растворе, так и препятствующих их поступлению в товарную часть овощной продукции.

Ключевые слова: овощные культуры, тяжелые металлы, агрохимические, биохимические, биогеохимические, санитарно-гигиенические аспекты, ассоциативные микроорганизмы.

DOI: 10.31857/S0002188122010033

ВВЕДЕНИЕ

При ежедневном употреблении ≈ 2 кг пищи возможно удовлетворение потребности человека в белках, жирах, углеводах, витаминах, микроэлементах, кислотах и солях. На долю растительных продуктов должно приходиться $>60\%$, из них в рационе питания овощи должны составлять по рекомендациям ВОЗ 600 г на человека в день. В России в большинстве регионов нормы потребления овощей должны достигать ≥ 400 г, что особенно важно в осенне-зимний период [1].

Российский рынок сборов фруктов и овощей растет со средними темпами 1.1% в год, и объем производимой на территории страны плодово-овощной продукции достиг в 2020 г. ≈ 50 млн т. На картофель приходится почти половина (48.4%) всех сборов плодовоовощных культур, 20% относится на долю моркови, капусты и лука, $\approx 30\%$ сборов составляют другие овощи открытого и закрытого грунтов [2, 3]. Нужно подчеркнуть, что за 11 лет (2010–2021 гг.) отечественное производство овощей закрытого грунта выросло в 2.3 раза.

В настоящее время фактическое потребление овощей в России составляет 109 кг на душу населения в год. Это на 24% меньше рекомендованной Минздравом нормы. Планируется, что потребление свежих овощей в России будет увеличиваться примерно на 1% ежегодно и достигнет 115 кг на душу населения к 2028 г. за счет дальнейшего увеличения объемов производства тепличных овощей, в том числе в условиях гидропоники [4, 5].

В условиях роста потребления овощей возникает вопрос о качестве овощной продукции. Вопросы качества нормируются как с точки зрения полезности продукта (содержания витаминов, сахаров, углеводов, белков), так содержания нежелательных примесей – вредных веществ (нитратов, пестицидов, тяжелых металлов). При этом содержание нитратов и пестицидов контролируется в нужной степени, в меньшей степени это относится к тяжелым металлам (ТМ). Цель работы – анализ агрохимических, биохимических, биогеохимических и медицинских аспектов накопления ТМ в овощных культурах. При этом рассмот-

Таблица 1. Среднее содержание и пределы варьирования количества тяжелых металлов в органических удобрениях, мг/кг (по данным [10])

Вид удобрения	Cd	As	Ni	Hg	Pb	Cr
Стоки навозные (2.22% сухого вещества)	0.008 ± 0.001	0.005 ± 0.001	0.172 ± 0.035	0.0011 ± 0.0001	0.13 ± 0.01	0.066 ± 0.016
Компост соломопометный (56% сухого вещества)	0.151 ± 0.021	0.089 ± 0.009	1.53 ± 0.50	0.0044 ± 0.0006	1.46 ± 0.22	2.75 ± 0.38
Навоз КРС (25% сухого вещества)	0.084 ± 0.016	0.137 ± 0.042	2.77 ± 0.74	0.0066 ± 0.0018	0.96 ± 0.23	2.39 ± 0.38
Дефекат (87% сухого вещества)	0.203 ± 0.061	2.30 ± 0.52	8.2 ± 2.5	0.0187 ± 0.0064	3.69 ± 1.20	11.8 ± 2.5

рены условия как открытого, так и закрытого грунта, а также гидропонике.

АГРОХИМИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ АККУМУЛЯЦИИ ТМ В ОВОЩНЫХ КУЛЬТУРАХ

Минеральные удобрения, производимые в России, не являются в настоящее время источниками поступления ТМ в почвы. Например, по данным [6–10], содержание кадмия в аммиачной селитре составляет 0.04 мг/кг, в азофоске – 0.10 мг/кг, содержание мышьяка – 0.34 и 0.94 мг/кг соответственно, что меньше, чем его валовое содержание в почвах. Для никеля эти величины равны 0.31 и 0.89 мг/кг, ртути – 0.005 и 0.028 мг/кг, свинца – 0.16 и 0.24 мг/кг, хрома – 1.13 и 1.32 мг/кг.

Значимыми источниками ТМ для почв агроэкосистем являются органические удобрения (табл. 1). При внесении дозы навоза КРС 40 т/га поступление валового хрома составляет 96 г/га, компоста соломопометного в дозе 20 т/га – 55 г/га, стоков навозных 70 т/га – 4.6 г/га. Аналогичные величины для свинца составляют 38.4, 29.2 и 9.1 г/га, ртути – соответственно 0.264, 0.088 и 0.077 г/га, тогда как никеля – 111, 61 и 12 г/га. Поступление мышьяка относительно невелико – 5.48, 1.78 и 0.35 г/га, так же как и кадмия – 3.36, 3.02 и 0.56 г/га.

Для характеристики поглощения овощами ТМ используют коэффициент биологического поглощения (**КБП**) – как соотношение содержания элемента в золе растения к его содержанию в пахотном слое почвы.

Известно, что уровень загрязнения растениеводческой (в частности, овощеводческой) продукции ТМ оценивают на основе утвержденных МДУ для кормов и ДУ для продовольственного сырья и пищевых продуктов. При этом, например, МДУ свинца в 10 раз превосходит соответствующие величины ДУ. Загрязнение клубней

картофеля происходило при содержании в почве подвижного свинца >50 мг/кг (табл. 2). Установлено, что картофель наиболее устойчив к загрязнению почв кадмием. При увеличении уровня загрязнения почвы подвижными формами кадмия с 0.35 до 2.5 мг/кг концентрация этого металла в клубнях картофеля возрастала с 0.082 до 0.353 мг/кг, однако в ботве эти величины были в 8–11 раз больше. На основании экспериментальных и мониторинговых данных предложены уравнения линейной регрессии для связи накопления ТМ в клубнях картофеля, в частности, для Cd: $y = 0.037 + 0.091 \text{ Cd}$ ($R = 0.97$) [8, 9]. Также отмечено, что “для определения уровня содержания Cd в почве, при котором наступает загрязнение продукции выше ПДК, установленных для продовольственных культур, и МДУ, установленных для кормов, целесообразно ориентироваться не на валовые формы металла, а на концентрацию его подвижных форм – 0.7 мг Cd/кг (вытяжка ААБ рН 4.8)” [10, с. 77].

В то же время подчеркивается, что в настоящее время в пахотных почвах Белгородской обл., так же как и в других областях ЦЧЗ, содержание ТМ не представляет опасности для получения экологически безопасной сельскохозяйственной продукции, включая овощи. Практически не отмечено превышений МДУ и ДУ в кормах и пищевой овощной продукции.

БИОХИМИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ

Оценка воздействия ТМ на растения. Механизмы транспорта. ТМ, такие как кадмий, медь, свинец, хром и ртуть, являются основными загрязнителями окружающей среды, особенно в районах с высокой антропогенной нагрузкой. Накопление ТМ в почвах является неблагоприятным фактором, в частности, проявляется фитотоксичность ТМ для растений и почвенных орга-

Таблица 2. Влияние уровня загрязнения почвы (мг/кг) на содержание ТМ в овощных культурах (по данным [10])

Культура	Продукция	Подвижные формы			Валовое содержание		
		Pb	Zn	Cd	Pb	Zn	Cd
Пищевые продукты							
Превышение ПДК для клубней картофеля – 0.12 мг/кг абсолютно сухого вещества							
Картофель	Клубни	51	>180	0.7	293	>707	1.8
Корма							
Превышение МДУ для кормов – 1.2 мг/кг абсолютно сухого вещества							
Кормовая свекла	Корнеплоды	>73	>180	2.2	>411	>707	6.6
	Ботва	>73	>180	1.2	>411	>707	3.6

низмов. Также опасно накопление ТМ в продукции, особенно в овощеводческой.

Растения, произрастающие на загрязненных почвах, демонстрируют измененный метаболизм, снижение роста и биомассы, в которой происходит избыточное накопление металлов. ТМ влияют на различные физиологические и биохимические процессы в растениях. Современные исследования токсичности и толерантности растений, подверженных воздействию ТМ, вызваны растущим загрязнением окружающей среды металлами. Однако некоторые металлы, в том числе медь, марганец, кобальт, цинк и хром, необходимы для метаболизма растений в следовых количествах. Поэтому, лишь тогда, когда металлы присутствуют в биодоступных формах и в чрезмерных количествах, они могут стать токсичными для растений. Необходимо учитывать воздействие цинка, меди, ртути, хрома, мышьяка, кобальта, никеля, марганца и железа. Но для ряда ТМ, таких как кадмий, свинец, биохимические и физиологические потребности не известны, и они считаются токсичными элементами в любых количествах. Токсичность других ТМ, например, мышьяка, зависит от его валентности и формы нахождения в организмах – токсичность пятивалентного As неизвестна, тогда как трехвалентный – токсичен [11].

Мышьяк, кадмий, свинец и ртуть являются токсичными элементами, и они почти повсеместно присутствуют в низких концентрациях в окружающей среде из-за антропогенного воздействия. Пищевое потребление продуктов растительного происхождения составляет основную долю потенциально опасного для здоровья человека воздействия ТМ, особенно мышьяка и кадмия. В интересах повышения безопасности пищевых продуктов важно уменьшить накопление токсичных элементов в сельскохозяйственных культурах. Понимание молекулярных механизмов, ответственных за их накопление, может поз-

волить создать сорта сельскохозяйственных культур с сильно сниженной концентрацией токсичных элементов в их съедобных частях. Считается, что в настоящее время эти механизмы достаточно известны для мышьяка (As) и кадмия (Cd), но еще недостаточно исследованы в отношении свинца (Pb) и ртути (Hg). Основные результаты были получены для риса и других модельных растений, тогда как для овощных культур таких исследований явно не хватает. Были идентифицированы белки, ответственные за поглощение кадмия и мышьяка, и в настоящее время достаточно изучена биотрансформация мышьяка (рис. 1, 2). Также были выявлены факторы, контролирующие эффективность транслокации от корня к побегу и распределение токсичных элементов, в частности, через так называемый корневой узел [12].

Токсичность ТМ для растений и человека. Установлено, что мышьяк, кадмий, свинец и ртуть являются высокотоксичными как для растений, так и для человека в их ионных формах, As и Hg также токсичны в их метилированных формах [13, 14]. Как уже упоминалось выше, в то время как метилированный As, по крайней мере в пятивалентном состоянии, обычно считается менее токсичным, чем As(III) и As(V), метилированная Hg более токсична, чем Hg(II) для большинства организмов [15, 16].

Основные мишени токсичности для этих элементов неизвестны, и таких мишеней может и не быть, эти элементы могут повреждать как различные клеточные структуры, так и различные ткани и органы. Одной из основных причин токсичности является сильное взаимодействие с сульфгидрильными группами, другой причиной является воздействие на гомеостаз основных элементов. Высокая реактивность тиоловых форм может ухудшать функционирование белков и опосредствованно вызывать окислительный стресс. Известно, что Cd влияет на метаболизм кальция (Ca) у млекопитающих, вызывая болезнь Итай-

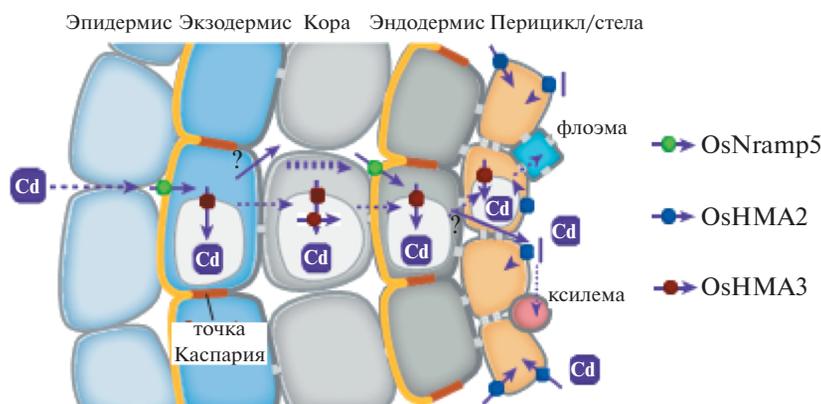


Рис. 1. Транспортёры, участвующие в поглощении и транслокации Cd от корня к побегу. OsNrap5, локализованный на дистальной стороне как экзодермы, так и эндодермы (выделен желтым цветом), отвечает за транспорт Cd из апопласта в клетки корня. OsHMA3 в тонопласте секвестрирует Cd в вакуоли, и предполагается, что OsHMA2 на плазматической мембране клеток перичикла транспортирует Cd из апопласта в симпласт для облегчения транслокации через флоэму. Пунктирные стрелки указывают на возможную пассивную диффузию Cd. OsNrap5 – транспортер, важный для поглощения марганца (Mn), представляет собой основной путь проникновения Cd в корни (по данным [12]).

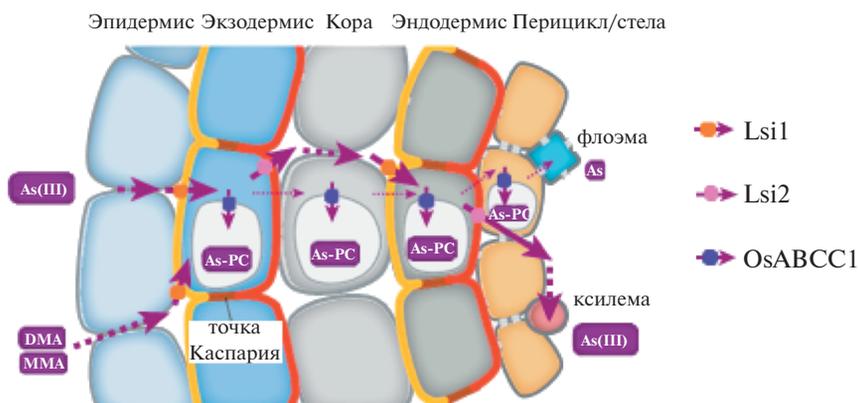


Рис. 2. Боковой перенос мышьяка в корнях растений. As(III) транспортируется к стеле двумя транспортерами Si, Lsi1 и Lsi 2, локализованный на дистальной (выделено желтым цветом) и проксимальной (выделено красным цветом) сторонах экзодермиса и эндодермиса. OsABCC1 в тонопласте секвестрирует As-фитохелатин (As-PC) в вакуолях и тем самым ограничивает доступность As(III) для перемещения по корню. Пунктирные стрелки указывают на возможную пассивную диффузию As; толщина стрелки отражает относительный вклад в общий перенос. Дополнительные сокращения: DMA, диметиларсиновая кислота; MMA, монометиларсоновая кислота (по данным [12]).

Итай при сильном воздействии. Как кадмий, так и свинец могут замещать цинк (Zn) в белках. Арсенат нарушает фосфатный обмен из-за химического сходства двух анионов. Кадмий и неорганические соединения мышьяка классифицируются как канцерогены. Воздействие низких доз, значительно меньше пороговых величин острой токсичности, может вызвать заболевание из-за длительной биоаккумуляции в организме человека. Медленное отравление из-за хронического воздействия Cd и As связано с общим увеличением смертности и целым рядом заболеваний, включая различные виды рака и сердечно-сосудистые заболевания в случае As, повреждение почек и остеопороз в случае Cd [17].

Известна нейротоксичность свинца, связанная с его негативным воздействием на интеллектуальные способности детей даже при низких уровнях воздействия [15]. Точно так же нейроны являются основными мишенями токсичности метилртути [18].

В отношении мышьяка и кадмия достигнут консенсус в том, что их потребление с растительной пищей в значительной степени способствует усилению вредного воздействия на человека [19–23].

БИОГЕОХИМИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ

Влияние растений и их метаболической активности определяет биогеохимическое перераспре-

деление ТМ в системе воздух–вода–почва. При этом важно оценить как спектр ТМ, так и их токсичность для растений. Токсичность металлов влияет на экологическую систему, где растения являются неотъемлемым компонентом. При этом важно оценить перемещение ТМ по биогеохимическим пищевым цепям, которые в целом можно охарактеризовать как взаимоотношения между организмами, через которые в экосистеме происходит трансформация вещества и энергии. В рассматриваемых работах речь идет о перемещении ТМ.

Растения поглощают из почвы ряд элементов, некоторые из которых, как отмечено выше, не имеют известной биологической функции, а некоторые токсичны в низких концентрациях. Поскольку растения составляют основу пищевой цепи, имеются опасения по поводу возможности переноса токсичных концентраций некоторых элементов из растений на более высокие уровни пищевой цепи, к растительоядным организмам, включая человека. Особое внимание уделяется механизмам поглощения и биотрансформации, происходящим в растениях, и их роли в биоаккумуляции и воздействии на конечных консументов, особенно на человека [24]. Хотя в этом обзоре особое внимание уделяется накоплению ТМ в овощных растениях, можно отметить и исследования, связанные с дикорастущими растениями. Кроме того, в современных исследованиях рассматривается поглощение растениями таких токсичных элементов как мышьяк, кадмий, хром, ртуть, свинец и их возможный перенос по пищевой цепи. Эти элементы привлекают особое внимание, поскольку хорошо известна их токсичность для живых организмов, включая их воздействие на человека. Известно, что мышьяк способствует развитию рака мочевого пузыря, легких и кожи и может накапливаться в организме, например, при употреблении риса, загрязненного As. Кадмий может поражать почки, печень, кости, а также влиять на женскую репродуктивную систему. Хром может вызывать рак, и люди могут подвергаться его воздействию при употреблении овощей, содержащих Cr. Свинец и ртуть — хорошо известные нейротоксины, которые поступают в организм человека, в частности, с овощами.

В качестве примера рассмотрим миграцию кадмия по пищевым биогеохимическим цепям. Показано, что ТМ окружающей среды, такие как Cd, мобилизуются в пищевой цепи от растений до человека [25]. Чтобы оценить важность параметров окружающей среды для биодоступности ТМ, исследователи разработали такие показатели, как

факторы биоаккумуляции, определяемые соотношение концентрации химического вещества в организме и концентрации ТМ в почве. Однако на факторы биоконцентрации влияет ряд параметров окружающей среды. В эксперименте с потреблением растительного корма, имевшего возрастающие концентрации кадмия в интервале 0–100 мкг/г, первичный потребитель (улитка *Helix aspersa*) и вторичный потребитель (личинки жука *Chrysocarabus splendens*) показали коэффициенты биоаккумуляции Cd 1.87–3.90 у *H. aspersa* и <1 мкг/г у *C. splendens*, вторичного хищника [26, 27]. Исследование также показало, что воздействие Cd-обогащенных улиток привело к гибели 31% личинок жуков, что продемонстрировало потенциальную токсичность перемещения Cd в пищевой цепи. Scheifler et al. [27] также сообщили, что улитки могут поглощать Cd из почвы, а не только из растений. Показано, что Cd переносится от растений к улиткам в зависимости от концентрации [28], что подтвердило потенциальную опасность растений-гипераккумуляторов Cd. Еще один аспект, который следует рассмотреть, — влияние Cd на метаболизм хищников растений. Например, у *Neochetina eichhorniae* (долгоносиков водяного гиацинта), которых кормили листьями растений, обработанных в течение недели 100 мг Cd/кг, Cd снижал в яичниках насекомых содержание белка примерно на 70–80%, липидов — на 8–20%, [29]. Однако, по данным Veltman et al. [25], усвоение Cd из растительной (овощной) пищи является низким, что в ряде случаев затрудняет поступление этого ТМ в организм человека.

МЕДИЦИНСКИЕ АСПЕКТЫ

Санитарно-гигиенические аспекты. Принципы здорового питания подразумевают употребление экологически чистых и биологически полноценных продуктов. Правильное питание означает грамотное сочетание растительной и животной пищи в соответствии с возрастом, состоянием здоровья, характером труда. При этом выращивание овощей как в открытом грунте, так и закрытых условиях, требует постоянного контроля качества получаемой продукции [5].

Прежде всего овощи анализируют на содержание нитратов. В нашей стране эти анализы начали массово проводить с середины 1980-х гг. [30]. Поскольку овощные культуры потребляют большое количество питательных веществ, то агротехника их выращивания основана на применении различных минеральных и органических удобрений, вносимых в высоких дозах. В них зачастую в качестве примесей присутствуют различные ТМ, осо-

Таблица 3. Величины ПДК тяжелых металлов в овощных и фруктовых продуктах питания, мг/кг

Продукты	Свинец	Кадмий	Мышьяк	Ртуть	Медь	Цинк
Овощи, ягоды, фрукты свежие и свежемороженые	0.04–0.5	0.03	0.2	0.02	5.0	10.0
Овощи, ягоды, фрукты и изделия из них в сборной жестяной таре	1.0	0.05	0.2	0.02	5.0	10.0

бенно в фосфорных и органических удобрениях. Из почвы и/или гидропонных субстратов эти ТМ могут поступать в овощные растения и накапливаться в растительной массе. Их содержание также нормируется (табл. 3).

Также рассчитывают фактор биоконцентрации. Коэффициент биоконцентрации (bio-concentration factor, *BCF*) может быть выражен как отношение концентрации химического вещества в организме к концентрации химического вещества в окружающей среде. *BCF* выражается в единицах на л/кг (отношение мг химического вещества на кг организма к мг химического вещества на л воды или кг почвы).

Оценка поглощения ТМ с пищей. У многих групп населения поглощение с пищей, например, Cd превышает предварительные допустимые еженедельные уровни потребления (Provisional Tolerable Weekly Intake, *PTWI*), определенные Продовольственной и сельскохозяйственной организацией ООН (ФАО) и Всемирной организацией здравоохранения (ВОЗ) [22]. При этом следует подчеркнуть, что имеющиеся данные заставили эпидемиологов усомниться в установленных величинах *PTWI* [31]. Например, группа экспертов европейского управления по безопасности пищевых продуктов (European Food Safety Authority, *EFSA*) по загрязняющим веществам в пищевой цепи призвала снизить уровень *PTWI* с 5.8 до 2.5 мкг/кг массы тела [32], близкий к среднему потреблению во всем мире [33]. Отмечено, что использование *PTWI*, величина которого, согласно недавним анализам [31], для Pb превышена, например, в некоторых регионах Китая, было признано нецелесообразным в свете имеющихся эпидемиологических данных [22, 31]. Соответственно, объединенный комитет экспертов ФАО/ВОЗ по пищевым добавкам даже пришел к выводу, что нынешний уровень *PTWI* для свинца должен быть снижен, поскольку этот уровень воздействия связан с измеримым нарушением развития нервной системы детей [34].

В целом, по данным [25], усвоение Cd из пищи является низким. Продовольствие является важ-

ным путем для ряда ТМ, особенно для населения, потребляющего регионально загрязненные продукты питания. По данным [35], население, которое ограничивает свой рацион продуктами местного производства, например, фермеры, ведущие натуральное хозяйство, особенно подвержено риску загрязнения почвы, поскольку Cd в их рационе не разбавляется продуктами питания из других незагрязненных районов, как это происходит в большинстве развитых стран мира. В связи с этим предложено рассчитывать риск воздействия токсичных элементов через пищу, используя коэффициент, называемый целевым коэффициентом опасности (target hazard quotient, *THQ*) [36]. Величины *THQ* включают, в частности, частоту воздействия и концентрацию загрязняющего вещества. Считается, что, когда *THQ* < 1, уровень ежедневного воздействия на человеческую популяцию может быть безопасным. Используя индекс *THQ*, авторы работ [37, 38] пришли к выводу, что “жители, живущие в 500–1000 м от цинкового завода Хулудао в Китае, имели величины *THQ* при потреблении овощей >1, что свидетельствовало о риске токсичности Cd. Кроме того, показано, что в бассейне р. Верхний У Цзян (провинция Гуандун, Китай) растения риса, орошаемые неочищенными сточными водами горнодобывающей промышленности, содержали до 1.15 мкг Cd/г в неочищенном зерне, а потребление Cd с пищей по расчетам составляло 2.2 и 1.5 мкг Cd/кг массы тела в день для 60-кг взрослого и 40-кг ребенка соответственно” ([39], с. 151). Эти показатели превышали предварительное допустимое потребление кадмия с пищей, установленное ФАО/ВОЗ, которое составило 1 мкг Cd/кг массы тела. Хотя рис потребляется в качестве основного продукта питания в провинции Гуандун и, следовательно, вносит большую часть в общее ежедневное потребление пищи, существуют и другие источники потребления Cd, такие как молочные продукты и овощи, которые должны рассматриваться так же как существенные факторы риска (рис. 3, 4). При этом, по данным [40], потребле-

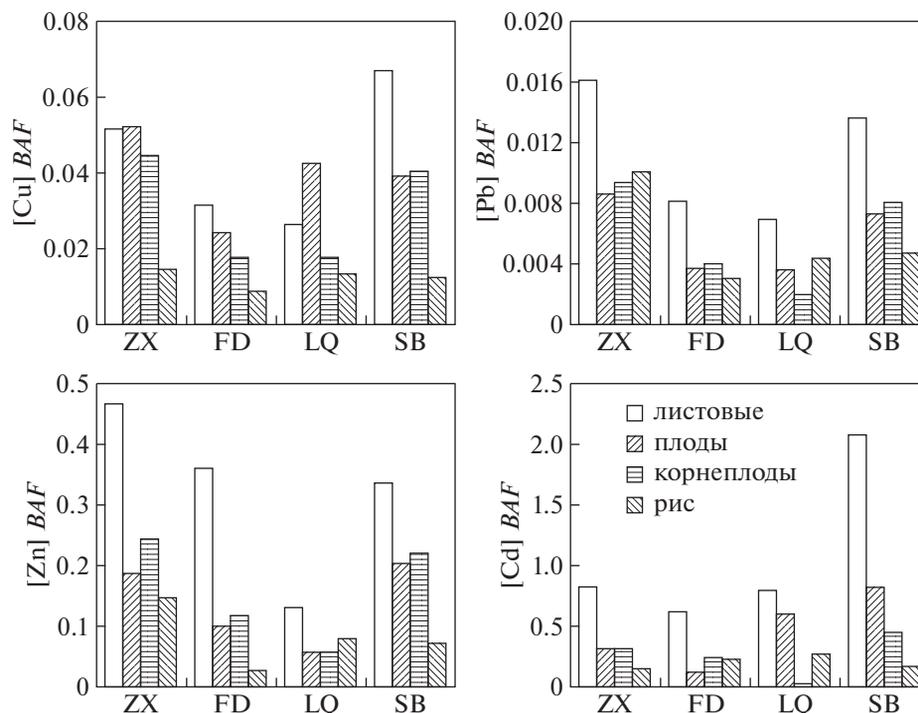


Рис. 3. Коэффициент биоаккумуляции (BAF), отношение концентрации тяжелых металлов в съедобной части листовых, плодовых, корнеплодных овощей и риса к концентрации в соответствующей почве в 4-х загрязненных деревьях (ось абсцисс) в окрестностях рудного месторождения Дабаошань, Китай [по данным 37, 38, 41]. По оси абсцисс указаны сокращенные наименования 4 населенных пунктов. То же на рис. 4.

ние овощей в ряде случаев было основным источником Cd для человека.

Очевидно, что для уменьшения риска в связи с потреблением ТМ с растительной пищей, в частности, с овощами, необходимо снизить их содержание в рационе питания. В ряде случаев речь уже идет о нулевых величинах содержания ТМ в овощной продукции.

ПРЕДОТВРАЩЕНИЕ ПОСТУПЛЕНИЯ ТМ В РАСТЕНИЯ

Таким образом, ТМ нарушают комплекс процессов в растении и индуцируют множество специфических и неспецифических реакций живых организмов, прежде всего человека как конечного консумента в пищевой цепи [41–43]. Поскольку, как было показано выше, значительное количество ТМ потребляется с овощами, необходимо управление риском поступления этих металлов в растения. Такое управление возможно с использованием штаммов ряда микроорганизмов.

Известно, что микроорганизмы обладают полезными для растений свойствами, благоприятное сочетание которых может оказывать в стрессовой ситуации аддитивный или синергический эффект. Например, инокуляция бобовых расте-

ний устойчивыми к ТМ и эффективными штаммами клубеньковых бактерий существенно улучшала образование и функционирование азотфиксирующего симбиоза. Показано, что почвенные бактерии (бактериальные препараты азотобактерин, фосфобактерин и кремнебактерин на основе ризобактерий *Azotobacter* и *Bacillus*) способствуют накоплению в овощных растениях (моркови, свекле, картофеле) биофильных элементов (K, Mg, Ca, Na, S, Si) и некоторых металлов (Pb, Zn, Ni, Cr), но последние накапливались преимущественно в кожуре. В то же время не отмечено аккумуляции Cd, Hg, и лишь отчасти – Cr [44].

В последнее десятилетие значительно возрос интерес к использованию ризосферных бактерий для стимуляции роста и регуляции поступления ТМ в растения из загрязненных почв, что отражено в серии обзорных статей. Например, производственные штаммы ассоциативных бактерий *Arthrobactermysorens* 7 и *Flavobacterium* sp. Л30 снижали подвижность Cd в почве [45], а инокуляция ими растений ячменя улучшала рост и препятствовала поступлению ТМ в зерно [46, 47].

Показана также способность псевдомонад, ассоциированных с эктомикоризными грибами, усиливать иммобилизацию Cd, Zn и Pb микросим-

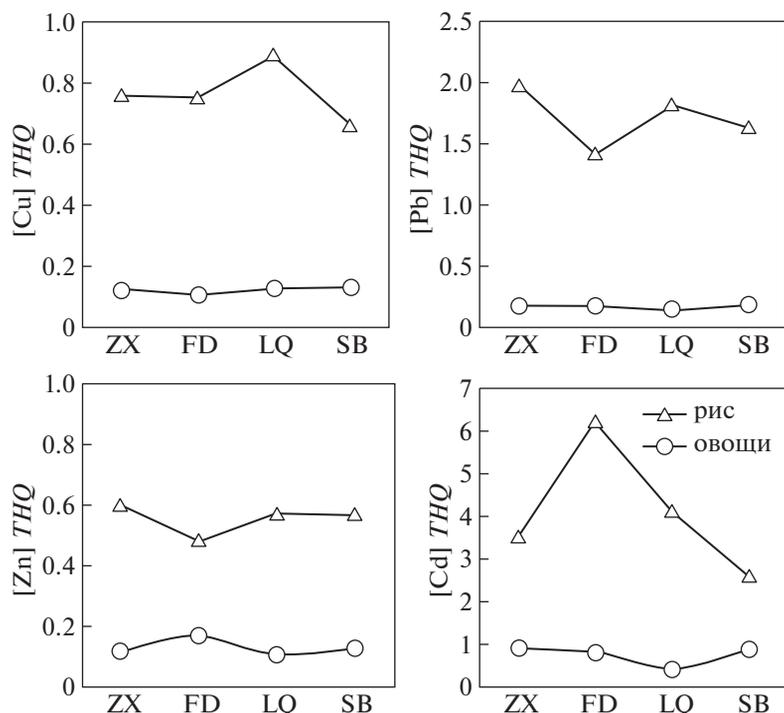


Рис. 4. Величины THQ для различных ТМ (Zn, Cu, Cd, Pb) при их поглощении с рисом и овощами в окрестностях рудного месторождения Дабаошань, Китай (по данным [29, 30, 41]).

бионтом в корнях и предотвращать поступление этих металлов в надземную часть растений [48].

Иммобилизация металлов может происходить благодаря образованию малорастворимых комплексов с бактериальными сидерофорами, полисахаридами и другими веществами. Однако бактериальные сидерофоры и их Fe-содержащие комплексы поглощаются растениями, поэтому в некоторых случаях возможно усиление поступления ТМ в последние [49].

Имеются данные об одновременной стимуляции роста и выноса никеля горчицей сарептской (*Brassica juncea*) при инокуляции штаммом *Bacillus subtilis* SJ-101, продуцирующим ауксины и растворяющим фосфаты [50].

Получены результаты по динамике численности биоконтрольных с антифугальной активностью штаммов *Pseudomonas chlororaphis* SPB1217 и *Pseudomonas fluorescens* SPB2137, способных приживаться в ризосфере растений огурца, выращенных в минеральном субстрате гидропонным способом в условиях промышленных теплиц. При этом численность грибов в контроле была в 2 раза больше, чем в варианте с инокуляцией штаммом SPB2137 [51].

Обобщенные данные по инактивации (поглощению, адсорбции) различными микроорганизмами ТМ показаны в табл. 4 (по данным [52]).

В этих и многих других исследованиях изменение поглощения токсичных металлов происходило без негативных последствий для роста растения, что указывает на способность бактерий повышать гомеостаз микробно-растительной системы [53].

Также следует упомянуть и другие подходы для устранения угнетающего действия ТМ на овощные культуры. Например, отмечено положительное влияние синтетического регулятора роста тиадиазурона на устойчивость проростков огурца, выращиваемых в условиях гидропоники, при воздействии сублетальных доз ионов свинца и меди, а также охлаждения [54].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, на основании обширного материала рассмотрены подходы к оценке накопления тяжелых металлов (ТМ) в овощных культурах, выращиваемых в открытом и защищенном грунте, в том числе, в условиях гидропоники. Показаны агрохимические, биохимические, биогеохимические и медицинские аспекты аккумуляции этих ТМ в овощной продукции. Оценено, что по сравнению с органическими удобрениями минеральные удобрения играют сугубо подчиненную роль как источник ТМ для овощных культур. Ситуация усложняется при выращивании этих

Таблица 4. Поглощение микроорганизмами тяжелых металлов

Микроорганизм	ТМ	Поглощение (адсорбция), % на сухую массу
<i>Streptomyces</i> sp. 12, 15	Уран	2–14
<i>Citrobacter</i> sp. 2s, 26, 2v	Свинец	34–40
	Кадмий	13.5
	Серебро	25
<i>Thiobacillus ferrooxidans</i> 2, 22, 31	Серебро	25
<i>Bacillus cereus</i> 2, 22, 34	Кадмий	3.9–8.9
<i>Escherichia cobz</i> 22, 34	Кадмий	0.16–0.98
<i>Zoogloea</i> sp. 2,1 s, 22, 31	Кобальт	25
	Медь	34
	Никель	13
	Золото	10
<i>Chlorella vulgaris</i> b 19	Уран	15
<i>Chlorella regularis</i> b ~9	Уран	0.39
<i>Chlorella regularis</i> 2s'29	Марганец	<0.8
<i>Scenedesmus obliquus</i> 15, 28	Кадмий	0.3
	Серебро	2
<i>Phoma</i> sp. is, 2s	Медь	1.6
<i>Rhizopus arrhizus</i> 33, 36, 37	Уран	19.5
	Свинец	10.4
	Торий	9.7
	Кадмий	0.24–3.12
	Цинк	0.45
<i>Saccharomyces cerevisiae</i> t s	Уран	10–15
	Торий	11.6

культур в условиях гидропоники, поскольку возможно накопление вредных элементов в товарной части продукции вследствие постоянного контакта корней растений с питательным раствором, содержащим микропримеси ТМ. Показано, что управление риском накопления ТМ в овощных культурах возможно с помощью различных штаммов микроорганизмов, внесенных в ризосферу, и способствующих как иммобилизации этих металлов в почве, так и препятствующих их поступлению в товарную часть овощной продукции.

Следовательно, необходимо разрабатывать природоподобные технологии, в частности, биогеохимические технологии, способные предотвращать поступление ТМ в овощные растения. Разработка таких технологий для выращивания овощей в почвенных условиях может быть основана на результатах исследований, проанализированных выше.

Также следует отметить, что в современной литературе еще крайне недостаточно исследований оценки риска накопления ТМ при выращивании овощных культур в условиях гидропоники.

Гидропоника быстро развивается и необходимы знания о вероятности поступления ТМ в товарную часть продукции и оценке соответствующих величин риска.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Солдатенко А.В., Разин А.Ф., Шатилов М.В., Иванова М.И., Разин О.А., Россинская О.В., Башкиров О.В. Межрегиональный обмен в контексте выравнивания потребления овощей в субъектах Федерации // Овощи России. 2018. № 6. С. 41–46.
2. Мамедов М.И. Перспективы защищенного грунта в России // Овощи России. 2014. № 4 (25). С. 4–9.
3. Анализ рынка фруктов и овощей. Центр экономики рынков. 18.08.2020. <https://zen.yandex.ru/media/id/5dd01bd9a28a2f180f2b7c29/analiz-rynka-frukto-ov-i-ovoscei-5f3aee818936fc6e4ac03127>
4. Центр отраслевой экспертизы Россельхозбанка. Производство тепличных овощей в РФ // 26.11.2020. <https://tass.ru/ekonomika/10108435>
5. Пинчук Е.В., Беспалько Л.В., Козарь Е.Г., Балашова И.Т., Сирота С.М., Шевченко Т.Е. Ценная овощная зелень на гидропонике для круглогодичного потребления // Овощи России. 2019. № 3. С. 45–53.

6. Лукин С.В., Мирошникова Ю.В., Авраменко П.М. Мониторинг содержания тяжелых металлов в почвах Белгородской области // *Агрохимия*. 2002. № 8. С. 86–91.
7. Лукин С.В., Явтушено В.Е., Солдат И.Е. Накопленные кадмия в сельскохозяйственных культурах в зависимости от уровня загрязнения почвы // *Агрохимия*. 2000. № 2. С. 73–77.
8. Лукин С.В., Солдат И.Е., Пендюрин Е.А. Закономерности накопления цинка в сельскохозяйственных растениях // *Агрохимия*. 1999. № 2. С. 79–82.
9. Lukin S.V., Yevtushenko V.E., Soldat I.E. Accumulation of cadmium in agricultural crops depending on the level of soil contamination // *Euras. Soil Sci.* 2000. V. 33. Supl. 1. P. S91–S95.
10. Лукин С.В. Агроэкологическое состояние и продуктивность почв Белгородской области. Белгород: Константа, 2016. 343 с.
11. Nagajyoti P.C., Lee K.D., Sreekanth T.V.M. Heavy metals, occurrence and toxicity for plants: a review // *Environ. Chem. Lett.* 2010. № 8. P. 199–216.
12. Clemens S., Ma J.F. Toxic heavy metal and metalloid accumulation in crop plants and foods // *Annu. Rev. Plant Biol.* 2016. V. 67. P. 489–512.
13. Goyer R.A. Toxic and essential metal interactions // *Annu. Rev. Nutr.* 1997. V. 17. P. 37–50.
14. Kopitke P.M., Blamey F.P.C., Asher C.J., Menzies N.W. Trace metal phytotoxicity in solution culture: a review // *J. Exp. Bot.* 2010. V. 61. P. 945–954.
15. Hughes M.F. Arsenic toxicity and potential mechanisms of action // *Toxicol. Lett.* 2002. V. 133. № 1. P. 1–16.
16. Li W.C., Tse H.F. Health risk and significance of mercury in the environment // *Environ. Sci. Pollut. Res.* 2015. V. 22. P. 192–201.
17. Jarup L., Akesson A. Current status of cadmium as an environmental health problem // *Toxicol. Appl. Pharmacol.* 2009. V. 238 (3). P. 201–208.
18. Canfield R.L., Henderson C.R., Cory-Slechta D.A., Cox C., Jusko T.A., Lanphear B.P. Intellectual impairment in children with blood lead concentrations below 10 µg per deciliter // *N. Engl. J. Med.* 2003. V. 348. P. 1517–1526.
19. Mergler D., Anderson H.A., Chan L.H.M., Mahaffey K.R., Murray M. Methylmercury exposure and health effects in humans: a worldwide concern // *Ambio*. 2007. V. 36. P. 3–11.
20. Meharg A.A., Norton G., Deacon C., Williams P., Adomako E.E. Variation in rice cadmium related to human exposure // *Environ. Sci. Technol.* 2013. V. 47. P. 5613–5618.
21. Akesson A. Barregard L., Bergdahl I.A., Nordberg G.F., Nordberg M., Skerfving S. Non-renal effects and the risk assessment of environmental cadmium exposure // *Environ. Health Perspect.* 2014. V. 122. P. 431–438.
22. EFSA (Eur. Food Saf. Auth.). Scientific opinion of the Panel on Contaminants in the Food Chain on a request from the European Commission on cadmium in food // *EFSA J.* 2009. V. 980. P. 1–139.
23. Clemens S., Aarts M.G.M., Thomine S., Verbruggen N. Plant science: the key to preventing slow cadmium poisoning // *Trends Plant Sci.* 2013. V. 18. P. 92–99.
24. Peralta-Videa J.R., Lopez M.L., Narayana M., Saupe G., Gardea-Torresdey J. The biochemistry of environmental heavy metal uptake by plants: Implications for the food chain // *Inter. J. Biochem. Cell Biol.* 2009. V. 41. P. 1665–1677.
25. Veltman K., Huijbregts M.A.J., Hendriks A.J. Cadmium bioaccumulation factors for terrestrial species: application of mechanistic bioaccumulation model OMEGA to explain field data // *Sci. Total Environ.* 2008. V. 406. P. 413–418.
26. Scheifler R., Gomot-de Vaufleury A., Toussaint M.-L., Badot P.-M. Transfer and effects of cadmium in an experimental food chain involving the snail *Helix aspersa* and the predatory carabid beetle *Chrysocarabus splendens* // *Chemosphere*. 2002. V. 48. P. 571–579.
27. Scheifler R., de Vaufleury A., Coeurdassier M., Crini N., Badot P.-M. Transfer of Cd, Cu, Ni, Pb, and Zn in a soil–plant–invertebrate food chain: a microcosm study // *Environ. Toxicol. Chem.* 2006. V. 25. P. 815–822.
28. Gimbert F., Mench M., Coeurdassier M., Badot P.-M., de Vaufleury A. Kinetic and dynamic aspects of soil–plant–snail transfer of cadmium in the field // *Environ. Pollut.* 2008. V. 152. P. 736–745.
29. Jamil K., Hussain S. Biochemical variations in ovaries of water hyacinth weevils *Neochetina eichhorniae* // *Ind. J. Exp. Bot.* 1993. V. 31. P. 36–40.
30. Башкин В.Н. Агрогеохимия азота. Пушино: ОНТИ НЦБИ, 1987. 270 с.
31. Zhao F.-J., Ma Y., Zhu Y.-G., Tang Z., McGrath S.P. Soil contamination in China: current status and mitigation strategies // *Environ. Sci. Technol.* 2015. V. 49. P. 750–759.
32. EFSA (Eur. Food Saf. Auth.). Scientific opinion on lead in food // *EFSA J.* 2010. V. 8. P. 1570.
33. EFSA (Eur. Food Saf. Auth.). Scientific opinion on the risk for public health related to the presence of mercury and methylmercury in food // *EFSA J.* 2012. V. 10. P. 2985.
34. FAO (Food Agric. Organ. UN), WHO (World Health Organ.). Evaluation of certain food additives and contaminants: seventy-third report of the Joint FAO/WHO Expert Committee on Food Additives. WHO Tech. Report Ser. 960, WHO, Geneva, Switz. 2010. http://whqlibdoc.who.int/trs/WHO_TRS_960_eng.pdf
35. Chary N.S., Kamala C.T., Raj D.S.S. Assessing risk of heavy metals from consuming food grown on sewage irrigated soils and food chain transfer // *Ecotoxicol. Environ. Safe.* 2008. V. 69. P. 513–524.
36. Chien L.-C., Hung T.-C., Choanga K.-Y., Yeha C.-Y., Mengc P.-J., Shiehd M.-J. Daily intake of TBT, Cu, Zn, Cd and As for fishermen in Taiwan // *Sci. Total Environ.* 2002. V. 285. P. 177–185.
37. Zheng N., Wang Q., Zheng D. Health risk of Hg, Pb, Cd, Zn, and Cu to the inhabitants around Huludao Zinc Plant in China via consumption of vegetables // *Sci. Total Environ.* 2007. V. 383. P. 81–89.
38. Zheng N., Wang Q.C., Zheng D.M. Transfer characteristics of mercury, lead, cadmium, zinc and cuprum from soil to vegetable around zinc smelting plant // *Huan Jing Ke Xue*. 2007. V. 6. P. 1349–1354.
39. Yang Q.W., Lan C.Y., Wang H.B., Zhuang P., Shu W.S. Cadmium in soil–rice system and health risk associated

- with the use of untreated mining wastewater for irrigation in Lechang, China // *Agric. Water Manag.* 2006. V. 84. P. 147–152.
40. *Millis P., Ramsey M.H., John E.A.* Heterogeneity of cadmium concentration in soil as a source of uncertainty in plant uptake and its implications for human health risk assessment // *Sci. Total Environ.* 2004. V. 326. P. 49–53.
 41. *Zhiyuan Li Zh., Ma Z., der Kuijp T.J., Yuan Z., Huang L.* A review of soil heavy metal pollution from mines in China: Pollution and health risk assessment // *Sci. Total Environ.* 2014. 15 January. P. 468–469, 843–853.
 42. *Bashkin V.N.* Modern biogeochemistry: Environmental risk assessment. 2^d edit. Springer Publishers, 2006. 444 p.
 43. *Белоголова Г.А., Соколова М.Г., Пройдакова О.А.* Влияние почвенных бактерий на поведение химических элементов в системе почва–растение // *Агрохимия.* 2011. № 9. С. 68–76.
 44. *Pishchik V.N., Vorobyev N.I., Chernyaeva I.I., Timofeeva S.V., Kozhemyakov A.P., Alexeev Y.V., Lukin S.M.* Experimental and mathematical simulation of plant growth promoting rhizobacteria and plant interaction under cadmium stress // *Plant Soil.* 2002. V. 242. P. 173–186.
 45. *Белимов А.А., Кунакова А.М., Сафронова В.И. Степанок В.В., Юдкин Л.Ю.* Использование ассоциативных бактерий для инокуляции ячменя в условиях загрязнения почвы свинцом и кадмием // *Микробиология.* 2004. № 73. С. 118–125.
 46. *Шаббаев В.П., Бочарникова Е.А., Остроумов В.Е.* Ремедиация загрязненной кадмием почвы при применении стимулирующих рост растений ризобактерий и природного цеолита // *Почвоведение.* 2020. № 6. С. 733–760
 47. *Шаббаев В.П.* Эффективность применения азотфиксирующей бактерии при выращивании растений в различных почвенных условиях // *Агрохимия.* 2020. № 11. С. 41–52.
 48. *Krupa P., Kozdrój J.* Ectomycorrhizal fungi and associated bacteria provide protection against heavy metals in inoculated pine (*Pinus sylvestris* L.) seedlings // *Water Air Soil Pollut.* 2007. V. 182. P. 83–90.
 49. *Awad F., Romheld V.* Mobilization of heavy metals from contaminated calcareous soils by plant born, microbial and synthetic chelators and their uptake by wheat plants // *J. Plant Nutr.* 2000. V. 23. P. 1847–1855.
 50. *Zaidi S., Usmani S., Singh B.R., Musarrat J.* Significance of *Bacillus subtilis* strain SJ-101 as a bioinoculant for concurrent plant growth promotion and nickel accumulation in *Brassica juncea* // *Chemosphere.* 2006. V. 64. P. 991–997.
 51. *Кравченко Л.В., Шапошников А.И., Макарова Н.М., Азарова Т.С., Тихонович И.А.* Динамика численности антифугальных штаммов *Pseudomonas* в ризосфере огурцов, выращиваемых в условиях гидропонии на минеральном тепличном субстрате // *Микробиология.* 2006. Т. 75 (3). С. 404–409.
 52. *Gadd G.M.* Heavy metal accumulation by bacteria and other microorganisms // *Experientia.* CH-4010 Basel/Switzerland: Birkhauser Verlag, 1990. № 46. P. 834–840.
 53. *Белимов А.А., Тихонович И.А.* Микробиологические аспекты устойчивости и аккумуляции тяжелых металлов у растений (обзор) // *Сел.-хоз. биол.* 2011. № 3. С. 10–15.
 54. *Лукаткин А.С., Башмаков Д.И., Кипайкина Н.В.* Протекторная роль обработки тидиазуроном проростков огурца при действии тяжелых металлов и охлаждения // *Физиология растений.* 2003. Т. 50 (3). С. 246–348.

Accumulation of Heavy Metals in Vegetable Crops

V. N. Bashkin^{a,#} and R. A. Galiulina^b

^a *Institute of Physicochemical and Biological Problems of Soil Science of the RAS
ul. Institutskaya 2, Pushchino 142290, Russia*

^b *Institute of Fundamental Problems of Biology of the RAS
ul. Institutskaya 2, Pushchino 142290, Russia*

[#] *E-mail: vladimirbashkin@yandex.ru*

Based on the extensive material, approaches to assessing the risk of accumulation of heavy metals (HM) in vegetable crops grown in open and protected ground, including in hydroponic conditions, are considered. Agrochemical, biochemical, biogeochemical and sanitary-hygienic aspects of the accumulation of these metals in vegetable products are shown. It is estimated that in comparison with organic fertilizers, mineral fertilizers play a purely subordinate role as a source of TM for vegetable crops. The situation becomes more complicated when growing these crops in hydroponic conditions, since it is possible to accumulate harmful elements in the commercial part of the product due to the constant contact of plant roots with a nutrient solution containing micro-admixtures of TM. It is shown that the risk of accumulation of HM in vegetable crops can be managed with the help of various strains of microorganisms introduced into the rhizosphere, which contribute both to the immobilization of these metals in the soil or nutrient solution and prevent their entry into the marketable part of vegetable products.

Key words: vegetable crops, heavy metals, agrochemical, biochemical, biogeochemical and sanitary-hygienic aspects, associative microorganisms.