

Реут А. А., Бекшенева Л. Ф.

ТОКСИКАНТЫ I КЛАССА ОПАСНОСТИ В ДЕКОРАТИВНЫХ ТРАВЯНИСТЫХ МНОГОЛЕТНИКАХ

Южно-Уральский ботанический сад-институт – обособленное структурное подразделение ФГБНУ «Уфимский федеральный исследовательский центр Российской академии наук»

Реферат. Техногенная эмиссия тяжелых металлов (ТМ) приводит к их накоплению и миграции в системе «почва-растение». Среди компонентов озеленения, подвергающихся воздействию токсикантов, значительное место занимают травянистые многолетники. Цель исследований – изучение аккумуляции и распределения элементов I класса опасности в растениях рода *Iris* L. Исследования проводили в 2020–2021 гг. на базе Южно-Уральского ботанического сада-института. Объекты исследований: почва участка и органы растений (*Iris orientalis*, *I. pseudacorus*, *I. sibirica*, *I. spuria* subsp. *carthaliniae*). Элементный состав определяли атомно-абсорбционным методом с электротермической атомизацией. Распределение поллютантов оценивали с использованием коэффициента биологического поглощения (КБП), суммарной кумуляции в вегетативных и генеративных, а также подземных и надземных органах. Содержание подвижных форм ТМ и металлоидов в почве не превышает ПДК и составляет в среднем: Cd – 0,03, As – 0,59, Pb – 0,48 мг/кг. Распределение кадмия по органам зависит от вида: возможна как базипетальная (*I. orientalis* – 0,05 мг/кг), так и акропетальная аккумуляция элемента (*I. spuria* subsp. *carthaliniae* – 0,05 мг/кг). Накопление в надземных органах превышает кумуляцию в корнях от 1,4 до 7,5 раз. Величины КБП для кадмия разнятся – от 0,27 до 1,56. Показано, что корни *I. orientalis*, *I. pseudacorus*, *I. spuria* subsp. *carthaliniae* выполняют барьерную функцию и аккумулируют мышьяк в количествах, превышающих ПДК (0,67–0,85 мг/кг). Корневая система *I. sibirica* не препятствует поступлению токсиканта, сосредоточенному в генеративных органах в концентрации, превышающей ПДК (0,61–0,78 мг/кг). Определено, что КБП мышьяка в листьях всех видов менее 1. Поглощение свинца не зависит от видов, что подтверждают близкие суммарные показатели элемента, а также схожее распределение по органам и стабильно высокий КБП. Выявлена преимущественно надземная концентрация поллютанта (3,4–5,1). Результат регрессионного анализа показал, что содержание подвижной формы свинца в почве не влияет на его аккумуляцию в листьях.

Ключевые слова: тяжелые металлы, металлоиды, свинец, кадмий, мышьяк, *Iris* L., ПДК, коэффициент биологического поглощения, коэффициент транслокации.

Для цитирования: Реут А. А., Бекшенева Л. Ф. Токсиканты I класса опасности в декоративных травянистых многолетниках // Таврический вестник аграрной науки. 2022. № 1(29). С. 132–144. EDN: PIUPRW.

For citation: Reut A. A., Beksheneva L. F. Toxicants of hazard class I in ornamental herbaceous perennials // Taurida Herald of the Agrarian Sciences. 2022. No. 1(29). P. 132–144. EDN: PIUPRW.

Введение

Загрязнение почв тяжелыми металлами (ТМ) – серьезная проблема крупных городов. Поступление ТМ в почвенный покров определяет их миграцию в грунтовые воды и доступность для растений. Изучение ТМ в системе «почва-растение»

позволяет оценить их накопление в растениях и отдельных органах, установить роль растений в самоочищающей способности урбоэкосистем [1].

Поглощение элементов зависит от ряда причин – видовой принадлежности растения, биодоступности самого элемента, агротехнологий [2, 3]. Исследователи отмечают зависимость между концентрацией ТМ в субстрате и растительных тканях. Чаще наблюдают прямую зависимость содержания тяжелых металлов в растениях от содержания их подвижных форм в почве, так как именно подвижные, а не валовые формы доступны растениям [4]. По литературным данным, поступление и распределение ТМ по органам растений происходит таким образом, что корень берет на себя основные концентрирующие функции, осуществляя «эффект задержания» [5, 6].

Поллютанты первого класса опасности (кадмий, мышьяк, свинец) в относительно низких концентрациях наиболее токсичны для живых организмов, включая растения. Воздействие кадмия на растительные клетки носит мутагенный характер, вызывая нарушения митоза и структурные повреждения хромосом [7]. Исследователи отмечают видовые особенности в накоплении и распределении по растительным органам кадмия. Так, высокая толерантность к накоплению поллютанта обнаружена для ячменя – кадмий накапливается в корневой системе в количестве, превышающем в 2000 раз его содержание в зерне [8]. У лиственных деревьев наибольшие концентрации кадмия также отмечены в корнях [9]. Бобовые травы, наоборот, накапливают кадмий в надземной части [10]. Пастбищные растения характеризуются максимальным содержанием кадмия в корнях, однако степень концентрации элемента отличается у разных видов: у злаковых трав она выше, чем у донника лекарственного и лебеды раскидистой [4]. Из семейства ирисовых способность к накоплению кадмия показал *Iris lactea var. chinensis*, имеющий Cd-толерантные гены [11].

Предшествующие исследования показали, что мышьяком наиболее обогащаются листья и корни растений [4], также отмечены значительные внутри- и межвидовые различия в способности растений к биоаккумуляции мышьяка [12]. В исследованиях с *Hemerocallis hybrida*, произрастающем на культуроземе ЦСБС СО РАН, содержание мышьяка в листьях разных сортов составило 0,02 мг/кг, в корневищах – 0,04–0,09 мг/кг [13]. Выращенные на культуроземе Южного Урала *Camassia cusickii* и сорта рода *Narcissus* обладают способностью к накоплению мышьяка, превышающего нормы ПДК как в луковицах, так и в листьях, причем концентрация токсиканта в надземных и подземных органах сортоспецифична [14].

До настоящего времени выявить биологическую роль свинца в метаболизме растений не удалось, хотя он и обнаруживается во всех растительных организмах [15]. Токсикант ингибирует деление клеток и подавляет рост растительных тканей [16]. Содержание свинца в органах *Hemerocallis hybrida*, выращенных на культуроземе в Новосибирске, составило 1,0–2,0 мг/кг, причем распределение по корневищам и листьям было неравнозначным у разных сортов [13]. Исследователи сообщают о преимущественном накоплении свинца в листьях сортов садовой земляники, что можно объяснить дополнительным фолиарным поглощением элемента из атмосферы [17]. Подобный вариант распределения свинца обнаружен для большинства сортов рода *Narcissus* – элемент концентрируется в надземных органах. Эта закономерность не распространяется на сорт ‘Arctic Gold’, а также на вид *Camassia cusickii*, аккумулирующих поллютант в луковицах [14].

Выяснение способов аккумуляции тяжелых металлов разными видами растений имеет практическое значение для комплексной оценки состояния почвенно-растительного покрова, выявления растений-индикаторов, исключителей и гипераккумуляторов, организации своевременных мероприятий по восстановлению ландшафтов. С этой точки зрения особенное внимание следует уделить накоплению

поллютантов в органах декоративных травянистых многолетников, занимающих определенную экологическую нишу в озеленении населенных пунктов.

Цель исследований – изучение аккумуляции и распределения элементов I класса опасности (мышьяк, кадмий, свинец) в почве и декоративных травянистых многолетниках рода *Iris* L.

Материалы и методы исследований

Исследования проводили в вегетационные периоды 2020–2021 гг. на опытном участке лаборатории интродукции и селекции цветочных растений Южно-Уральского ботанического сада-института – обособленного структурного подразделения Федерального государственного бюджетного научного учреждения Уфимского федерального исследовательского центра Российской академии наук (далее ЮУБСИ УФИЦ РАН), расположенного в юго-восточной части г. Уфы в междуречье рек Уфы и Сутолоки.

Территория относится к Предуральской лесостепной провинции лесостепной зоны. Почва на опытном участке серая лесная, типичная для региона. Содержание гумуса – 5,7 % (по Тюрину), нитратного азота – 1,7 мг/кг (ГОСТ Р 53219-2008), фосфора – 140,9 мг/кг (по Чирикову), калия – 145 мг/кг (по Чирикову); рН сол. – 6,33.

Регион характеризуется умеренно-континентальным климатом. В период проведения исследований метеоусловия варьировали по сравнению со среднемноголетними значениями (таблица 1).

Таблица 1 – Погодные условия в вегетационные периоды 2020–2021 гг.

Год	Месяц						За год
	апрель	май	июнь	июль	август	сентябрь	
	средняя температура воздуха, °С						
2020	6,0	14,1	16,5	22,0	16,9	11	5,5
2021	7,4	18,5	20,7	20,7	21,4	10	5,2
Среднемноголетний показатель	5,2	13,2	18,1	19,7	17,2	11,6	3,8
	сумма осадков, мм						
2020	57	27	37	67	104	56	589
2021	26	9	20	20	0,6	50	405
Среднемноголетний показатель	33	47	67	55	58	48	590

Весна 2020 г. была ранней. В целом год характеризовался нормой по количеству выпавших осадков, однако в начале вегетации (в мае и июне) наблюдали недостаток по ним, тогда как в августе их выпало на 79,3 % больше нормы. Особенность года – высокая средняя температура, превышающая норму на 1,7 °С. Июль был экстремально жарким, температура достигала отметки в 40 °С в течение двух недель.

Погодные условия 2021 г. характеризовались жарким и засушливым вегетационным периодом – с апреля по август количество осадков было значительно меньше нормы (–185 мм), тогда как фактические температуры этих месяцев отклонялись от нормы в сторону увеличения на +4,8 °С в мае, +2,8 °С в июне, +0,9 °С в июле, +3,8 °С в августе. Среднегодовая температура превысила норму на 1,4 °С.

Объектами исследования являлись почва опытного участка и органы растений рода *Iris* L. (корни, листья, цветоносы, цветки и семена). Изучаемые многолетники интродуцированы на территории ЮУБСИ УФИЦ РАН. Виды *I. orientalis* Mill. и *I. spuria subsp. carthaliniae* (Fomin) V. Mathew не произрастают в лесостепной зоне Башкирского Предуралья, виды *I. pseudacorus* L. и *I. sibirica* L. являются аборигенными. Экологические характеристики видов приведены согласно литературным источникам [18, 19].

I. orientalis Mill. – Касатик восточный. Ксеромезофит. Родина ириса – Юго-Восточная Европа и Малая Азия, встречается в дельтах рек и болот, на окраинах лесных массивов и лугах.

I. pseudacorus L. – Касатик ложноаирный. Гидрофит. Произрастает в Европе, на Кавказе, в Западной Сибири, Северной Африке и Малой Азии по мелководьям рек, озер, болот. Занесен в Красную книгу РБ с категорией редкости 2 – вид, сокращающийся в численности [20].

I. sibirica L. – Касатик сибирский. Мезофит. Распространен от Европы и Кавказа до Западной и Средней Сибири, в Армении, Казахстане, Центральной Азии на пойменных и лесных лугах, по лесным опушкам и березовым колкам.

I. spuria subsp. *carthaliniae* (Fomin) V. Mathew – Касатик ложный карталинский. Гидромезофит. Эндемик восточной части Кавказа. Распространен по берегам ручьев и каналов, на влажных лугах, в лесах и у прибрежных участков дорог.

С опытного участка в течение двух лет отбирали объединенную пробу почвы, состоящую из 25 точечных заборов. Глубина отбора составляла 1–25 см, масса объединенной пробы – 1 кг за два года исследований. В образцах почвы определяли подвижные формы трех химических элементов, относящихся к I классу опасности (As, Cd, Pb). Извлечение и определение металлов проводили согласно методике [21], мышьяка – согласно [22].

Образцы растений (органы) отбирали в соответствующих фазах развития: цветения (цветы и цветоносы), плодоношения (плоды), вторичной фазе вегетации (листья), осенний переходный период (корни). Образцы сушили при комнатной температуре и измельчали до порошкообразной фракции. Смешанную пробу сырья (50 г) составляли из 10 индивидуальных проб за каждый год исследования. Извлечение металлов и мышьяка проводили согласно методике [23].

Элементный состав определяли атомно-абсорбционным методом с электротермической атомизацией (спектрометр Shimadzu A-6800 с электротермическим атомизатором GFA EX-7) на базе аналитической лаборатории научно-исследовательского института сельского хозяйства. Повторность определения токсикантов в пробах почвы и растениях – трехкратная. Полученные значения сравнивали с нормативными данными ПДК. Математическую обработку выполняли в программе Statistica 6.1 и Microsoft Office Excel 2007.

Для характеристики особенностей накопления химических элементов применяли коэффициент биологического поглощения (КБП – отношение содержания элемента в растении к содержанию его в почве, на которой произрастает данное растение) [24].

Результаты и их обсуждение

Содержание кадмия в почве иридария составляет 0,033 мг/кг и не превышает установленных норм ПДК (1 мг/кг) [25]. В наших исследованиях концентрация кадмия в различных органах исследованных видов варьирует от 0,009 до 0,052 мг/кг (рисунок 1) и не выходит за рамки ПДК для ЛРС (1 мг/кг) [26].

По содержанию кадмия в подземной части ирисы образовали ряд:

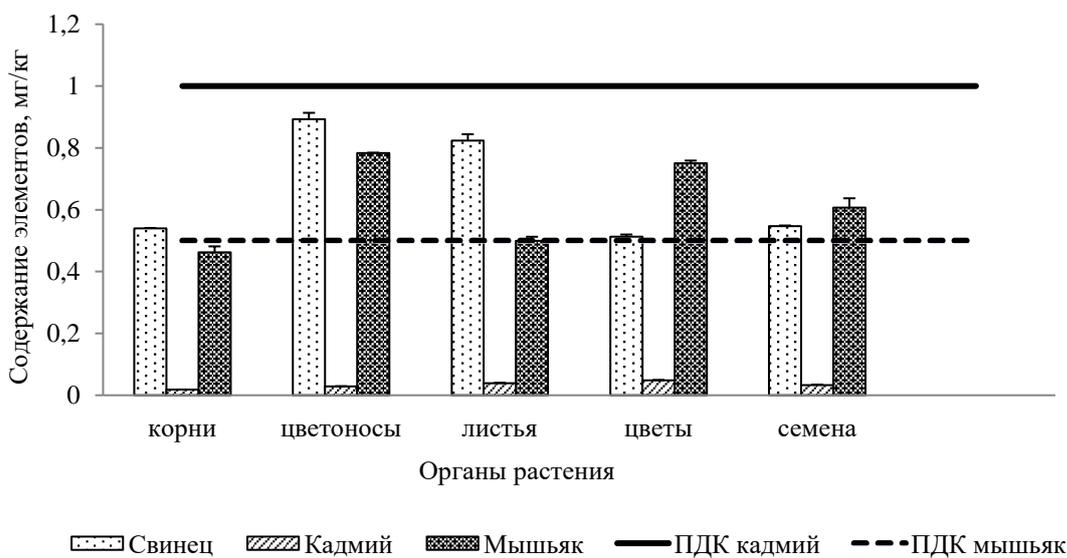
I. orientalis (0,05 мг/кг) > *I. spuria* subsp. *carthaliniae* (0,025 мг/кг) > *I. pseudacorus* (0,021 мг/кг) > *I. sibirica* (0,018 мг/кг).

По концентрации элемента в листьях виды располагаются в следующем порядке:

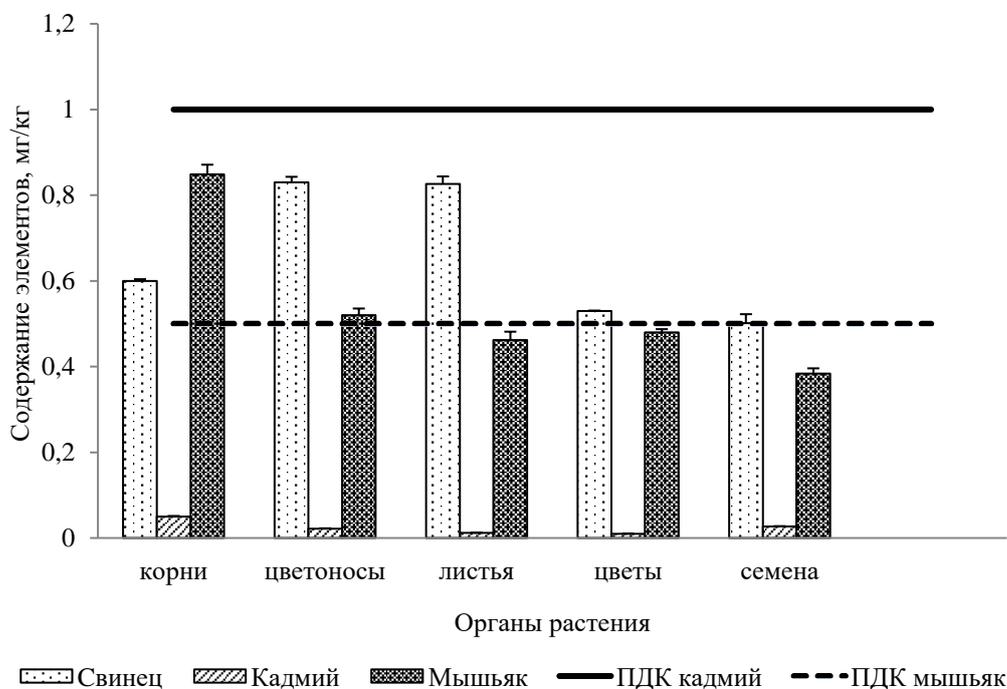
I. spuria subsp. *carthaliniae* (0,052 мг/кг) > *I. sibirica* (0,039 мг/кг) > *I. pseudacorus* (0,021 мг/кг) > *I. orientalis* (0,012 мг/кг).

Близкородственные ирисы секции *Xyridion* различаются по способности накапливать Cd: *I. orientalis* демонстрирует ограниченное поступление металла в надземную часть (содержание элемента в корнях в 4,2 раза превышает его содержание

в листьях). Для *I. spuria subsp. carthaliniae*, наоборот, отмечено повышенное содержание Cd в листьях, превышающее в 2,1 раза его содержание в корнях. Первый вид можно отнести к видам-исключителям, а второй – к аккумуляторам данного металла [27]. *I. sibirica* также можно отнести к видам-аккумуляторам, концентрация кадмия в листьях превышает таковую в корнях в 2,2 раза. У данного вида отсутствует физиологический барьер, препятствующий поступлению токсиканта в генеративные органы – содержание кадмия в цветах и плодах составляет 0,048 и 0,033 мг/кг соответственно. *I. pseudacorus* характеризуется практически равномерным распределением кадмия по всем органам.



I. sibirica



I. orientalis

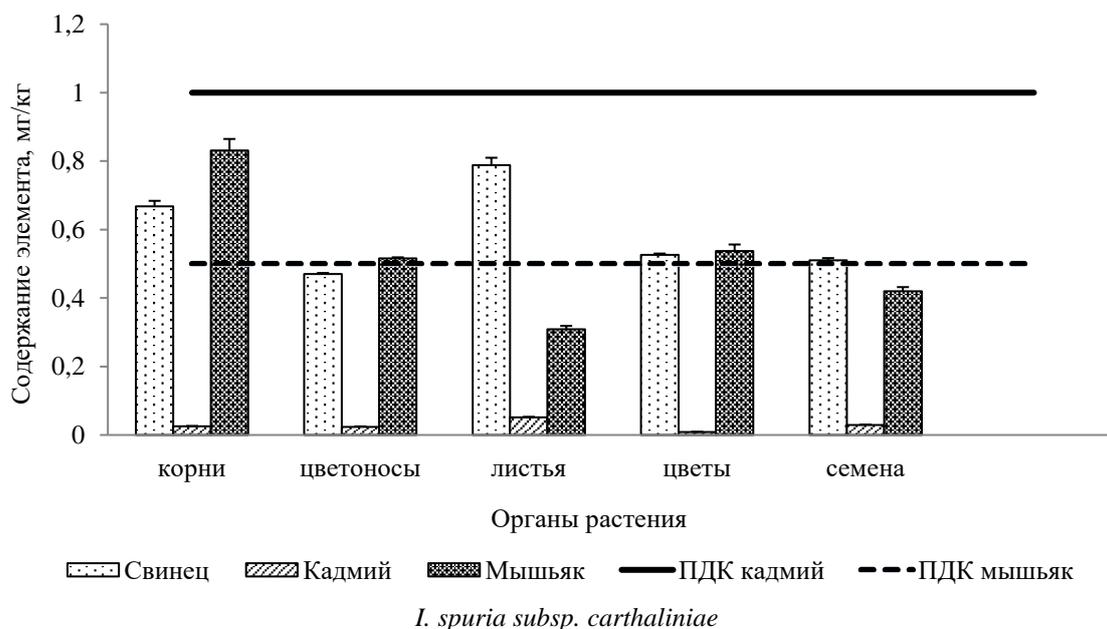
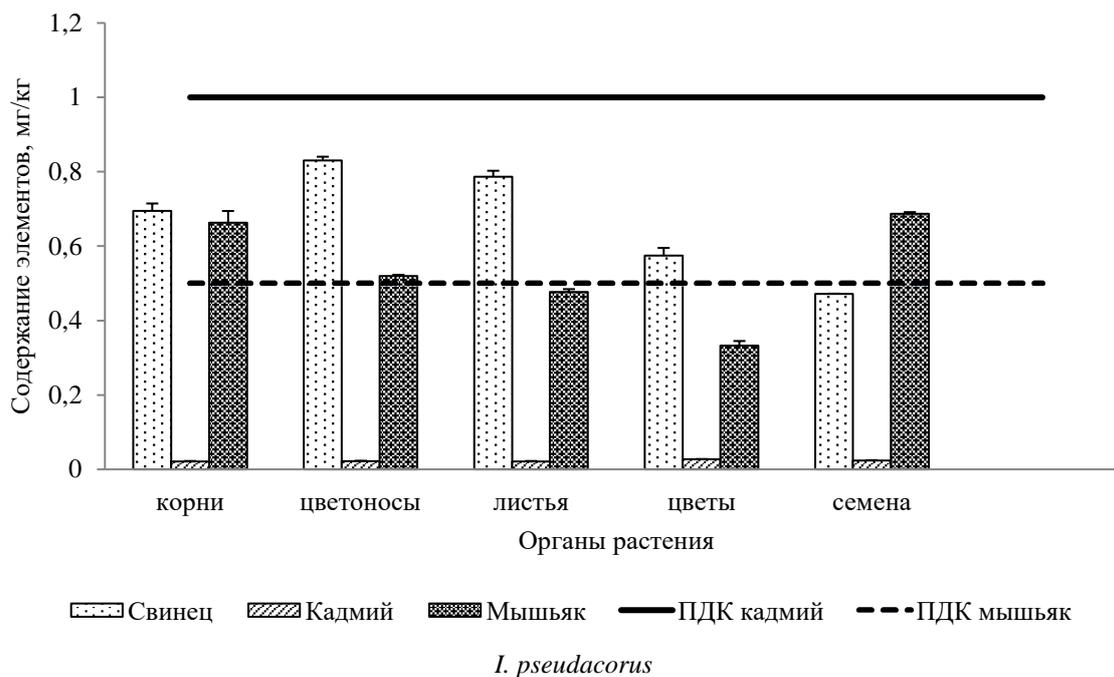


Рисунок 1 – Содержание тяжелых металлов и металлоида I класса опасности в органах растений рода *Iris* (среднее за 2020–2021 гг.)

Об интенсивности поглощения растениями кадмия из почвы можно судить по полученному КБП (рисунок 2). Величины КБП для кадмия значительно варьируют от 0,27 до 1,56. Для большинства вариантов исследования «растительный орган – почва» кадмий является элементом биологического захвата (КБП <1). Однако для нескольких вариантов – корни *I. orientalis*, листья (*I. sibirica*, *I. spuria subsp. carthaliniae*) и цветы *I. sibirica* – поллютант становится элементом биологического накопления (КБП >1).

Мы считаем необходимым обратить особое внимание на сравнительное распределение элементов по типам органов (таблица 2). Так, среди изученных видов растения *I. sibirica* занимают первое место по концентрации кадмия в целом. Интродуцированные виды секции *Xyridion* имеют равное (*I. orientalis*) или преимущественно вегетативное (*I. spuria subsp. carthaliniae*) распределение металла.

У видов аборигенной флоры (*I. sibirica*, *I. pseudacorus*) суммарное содержание кадмия в генеративных органах выше, чем в вегетативных. Суммарное накопление кадмия в надземных органах всех изученных видов превышает его содержание в корнях от 1,4 (*I. orientalis*) до 7,4 (*I. sibirica*) раз.

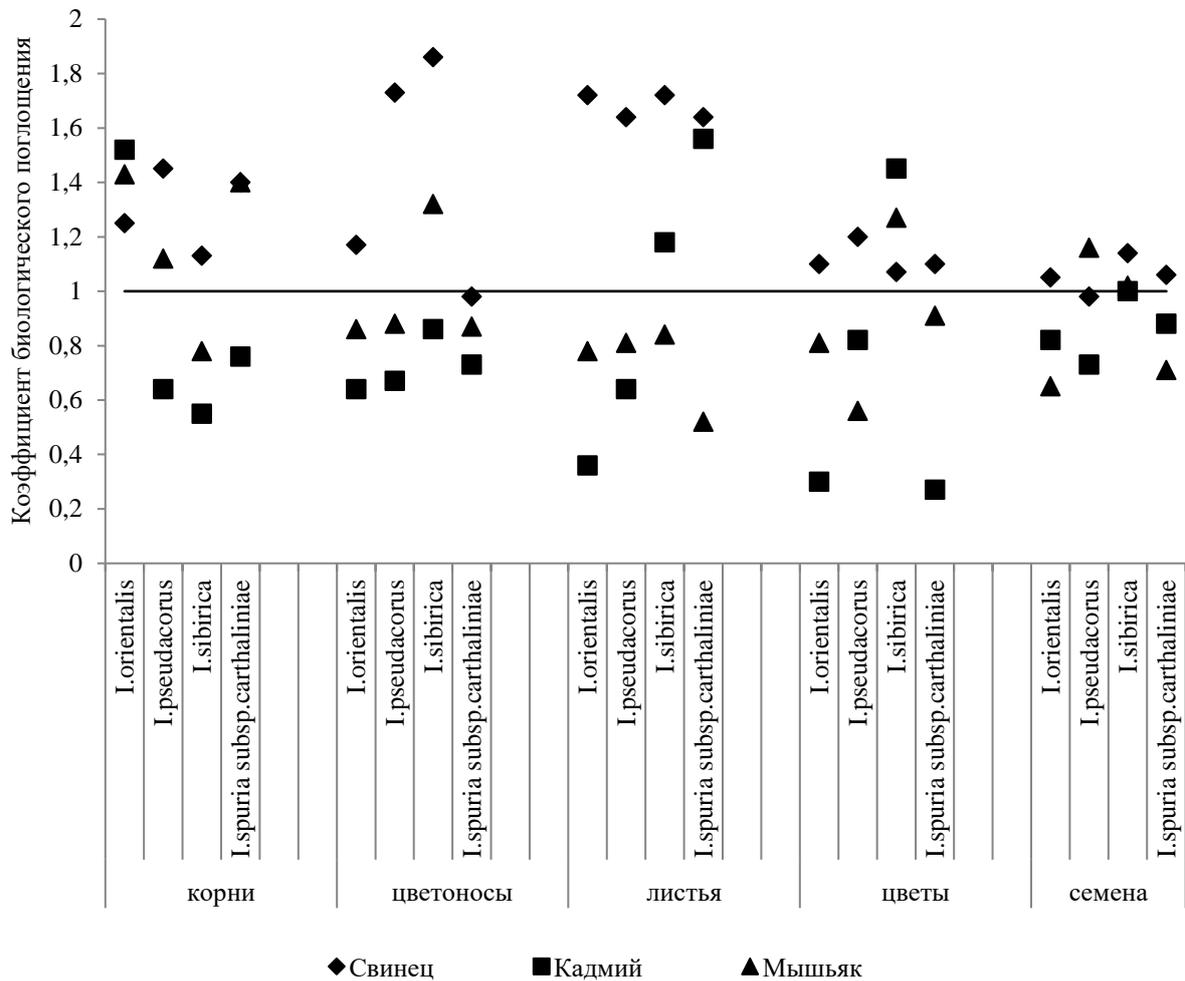


Рисунок 2 – Коэффициенты биологического поглощения тяжелых металлов и металлоида I класса опасности (среднее за 2020–2021 гг.)

Таблица 2 – Содержание тяжелых металлов и металлоида I класса опасности в растениях рода *Iris* (среднее за 2020–2021 гг.)

Вид	Содержание элемента в органах (мг/кг):								
	всего растения			вегетативных / генеративных			надземных / подземных		
	Pb	Cd	As	Pb	Cd	As	Pb	Cd	As
<i>I. orientalis</i>	3,29	0,12	2,69	1,43 / 1,86	0,06 / 0,06	1,31 / 1,38	2,69 / 0,6	0,07 / 0,05	1,84 / 0,85
<i>I. pseudacorus</i>	3,36	0,12	2,68	1,48 / 1,88	0,04 / 0,08	1,14 / 1,54	2,67 / 0,69	0,1 / 0,02	2,02 / 0,66
<i>I. sibirica</i>	3,32	0,17	3,1	1,36 / 1,96	0,06 / 0,11	0,96 / 2,19	2,78 / 0,54	0,15 / 0,02	2,64 / 0,46
<i>I. spuria subsp. carthaliniae</i>	2,96	0,14	2,61	1,46 / 1,5	0,08 / 0,06	1,14 / 1,47	2,29 / 0,67	0,11 / 0,03	1,78 / 0,83

Данные содержания подвижного мышьяка в почве показали, что на опытном участке концентрация элемента (0,59 мг/кг) не превышает ПДК для почв (2 мг/кг).

Согласно Фармакопее [26] экологически безопасным является растительное сырье, содержащее мышьяк в количестве не более 0,5 мг/кг. В нашем исследовании содержание мышьяка в различных органах растений варьирует от 0,31 до 0,85 мг/кг. Наиболее значительные концентрации поллютанта отмечены для корней трех видов ирисов – 0,66–0,85 мг/кг; подземные органы этих видов выполняют барьерную функцию в отношении токсиканта. *I. sibirica* не накапливает мышьяк в корнях и в листьях выше установленного ПДК, однако генеративные органы (цветоносы, цветы и семена) являются сосредоточием поллютанта (0,61–0,78 мг/кг), защитная функция корней в отношении элемента наименее проявлена у данного вида. В цветоносах других видов кумуляция элемента находится на границе с ПДК (0,51–0,52 мг/кг). Отмечена тенденция к накоплению мышьяка в цветах *I. spuria subsp. carthaliniae* (0,54 мг/кг) и семенах *I. pseudacorus* (0,69 мг/кг). Концентрация мышьяка в листьях исследованных растений находится в пределах установленной нормы ПДК – 0,31–0,49 мг/кг.

Расчет индексов биоаккумуляции показал, что все исследованные виды на незагрязненной почве являются растениями биологического накопления мышьяка, но с различной локализацией элемента: базипетальной – КБП >1 в корнях *I. pseudacorus*, *I. orientalis*, *I. spuria subsp. carthaliniae* и акропетальной – КБП >1 – в генеративных органах *I. sibirica*.

Аналитический материал свидетельствует о различиях по уровню накопления мышьяка в суммарном количестве у разных видов. *I. sibirica*, как и в случае с кадмием, лидирует по содержанию элемента. Накопление мышьяка в генеративных органах *I. sibirica* в 3,65 раз превышает его аккумуляцию в вегетативных. У остальных видов различие в аккумуляции токсиканта между генеративными и вегетативными органами не превышает значений 1,05–1,35 раз. Виды также различаются по способности накапливать мышьяк в надземных и подземных органах при одной и той же концентрации в почве, что важно при выявлении растений-ремедиантов. Выявлено, что суммарная концентрация поллютанта в надземных органах *I. sibirica* в 5,74 раза превышает его накопление в подземных. Для *I. pseudacorus* это соотношение составило 3,06. Минимальное соотношение характерно для *I. orientalis* и *I. spuria subsp. carthaliniae* – 2,16 и 2,14 раз.

По сравнению с другими тяжелыми металлами, свинец наименее подвижен, причем степень подвижности элемента сильно снижается при известковании почв [28]. Содержание подвижных форм свинца в почве исследованного культурозема не превышало ПДК для почв (6 мг/кг) и составило 0,48 мг/кг.

В соответствии с Фармакопеей [26] ПДК свинца в растениях не должна превышать 6 мг/кг. Исследования содержания элемента не выявили превышения ПДК ни в одном типе растительного сырья – концентрация свинца варьирует в пределах 0,47–0,89 мг/кг. Наибольшая аккумуляция токсиканта отмечена в листьях для всех исследованных видов (0,79–0,83 мг/кг), наименьшая – в цветах (0,51–0,57 мг/кг) и семенах (0,47–0,55 мг/кг). Средоточие элемента в корнях занимает промежуточное положение (0,54–0,69 мг/кг). Поэтому возникает вопрос о роли корневого поступления свинца в надземную часть растений. Проведенный регрессионный анализ показал, что содержание свинца в листьях мало зависит от почвенного поступления элемента:

$$y = -0,2807x + 0,9817 (R^2 = 0,8262)$$

Это не противоречит предположению о фолиарном поступлении свинца в растения, поскольку уровень загрязнения атмосферы в городе Уфа относится к «высокому», исследователи отмечают рост выбросов неорганической пыли, содержащей свинец [29].

Среди исследованных элементов – токсикантов I группы свинец стабильно имеет наиболее высокие коэффициенты биологического поглощения у всех видов, варьирующий в довольно узких пределах: для корней 1,13–1,45, для цветоносов 0,98–1,86, для листьев – 1,64–1,72, для цветов 1,07–1,20, для семян – 0,98–1,14. В данном случае такое согласованное поглощение свинца растениями свидетельствует о независимости от видовой принадлежности растения.

Исследованные виды суммарно аккумулируют свинец примерно в одинаковом количестве (см. таблицу 2) – лишь *I. spuria subsp. carthaliniae* отличается меньшей общей концентрацией поллютанта. Вегетативные и генеративные органы этого вида ирисов, содержат фактически равное количество свинца. Для других видов превышение аккумуляции в генеративных органах незначительно и не превышает значений 1,3–1,4. В случае с распределением свинца по подземным и надземным органам мы наблюдали преимущественную концентрацию элемента в надземной части: от 3,4 (*I. spuria subsp. carthaliniae*) до 5,1 раз (*I. sibirica*).

Выводы

В ходе проведенного исследования установлено, что содержание подвижных форм тяжелых металлов и металлоида I класса опасности (мышьяк, кадмий, свинец) в почве опытного участка не превышает предельно допустимых концентраций.

Анализ растительного сырья показал, что содержание кадмия в растениях находится в пределах допустимых норм, а его распределение по органам зависит от вида. Близкородственные виды имеют либо корневое (*I. orientalis* – 0,05 мг/кг), либо фолитарное (*I. spuria subsp. carthaliniae* – 0,05 мг/кг) распределение токсиканта. Выявлено, что аборигенные виды (*I. pseudacorus*, *I. sibirica*) аккумулируют кадмий преимущественно в генеративных органах, тогда как интродуценты (*I. orientalis*, *I. spuria subsp. carthaliniae*) – в вегетативных либо в равной степени в обеих группах. Суммарное накопление кадмия в надземных органах изученных видов превышает его содержание в корнях: коэффициент транслокации варьирует от 1,4 (*I. orientalis*) до 7,5 (*I. sibirica*). Наибольшим суммарным содержанием кадмия характеризовался вид *I. sibirica* (0,17 мг/кг). Установлено, что величины КБП для кадмия сильно варьируют от 0,27 до 1,56. Поллютант является элементом биологического накопления для корней *I. orientalis*, листьев (*I. sibirica*, *I. spuria subsp. carthaliniae*) и цветов (*I. sibirica*).

Показано, что на незагрязненной почве корни *I. orientalis*, *I. pseudacorus*, *I. spuria subsp. carthaliniae* выполняют барьерную функцию и аккумулируют мышьяк в количествах, превышающих ПДК (0,67–0,85 мг/кг). Корневая система *I. sibirica* не препятствует поступлению токсиканта, который сосредотачивается в генеративных органах в концентрации превышающей ПДК (0,61–0,78 мг/кг). Выявлено, что лидером по суммарному содержанию элемента также является *I. sibirica* (3,1 мг/кг). Определено, что коэффициент биологического поглощения мышьяка в листьях всех видов менее 1, что ограничивает возможность использования исследованных видов в качестве фиторемедиантов токсиканта.

Поглощение свинца не зависит от видовой принадлежности растений, что подтверждается близкими суммарными значениями элемента, схожим распределением по органам, а также стабильно высокими коэффициентами биопоглощения. Выявлена преимущественно надземная концентрация поллютанта, превышающая аккумуляцию в корнях в 3,4–5,1 раза. Согласно данным регрессионного анализа содержание подвижной формы свинца в почве не влияет на его аккумуляцию в листьях, что подтверждает вероятность поступления токсиканта в растения фолитарным путем.

Работа выполнена по Программе фундаментальных исследований Президиума РАН «Биоразнообразие природных систем и растительные ресурсы России: оценка состояния и мониторинг динамики, проблемы сохранения, воспроизводства, увеличения и рационального использования» и в рамках государственного задания ЮУБСИ УФИЦ РАН по теме № FMRS-2022-0072.

Литература

1. Корельская Т. А., Попова Л. Ф. Тяжелые металлы в почвенно-растительном покрове селитебного ландшафта города Архангельска // Арктика и Север. 2012. № 7. С. 136–152.
2. Никитенко М. А. Видовая специфика поглощения тяжелых металлов (Cu, Zn, Mn и Fe) древесными растениями Камбарки Удмуртской республики // Вестник Ижевского государственного технического университета. 2007. № 2 (34). С. 158–159.
3. Шабанова И. В., Нецадим Н. Н. Влияние агротехнологий на содержание тяжелых металлов в почве и качество зерна озимого ячменя // Таврический вестник аграрной науки. 2019. № 1(17). С. 103–111. DOI: 10.33952/2542-0720-2019-1-17-103-111.
4. Белозубова Н. Ю., Зубкова В. М., Реуцкая В. В. Поступление свинца, кадмия и мышьяка в пастбищные растения в условиях Волгоградской области // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. 2016. № 5 (139). С. 71–76.
5. Барсукова В. С. Физиолого-генетические аспекты устойчивости растений к тяжелым металлам // Экология. Серия аналитических обзоров мировой литературы. 1997. № 47. С. 1–67.
6. Ильин В. Б. Тяжелые металлы в системе почва-растение // Почвоведение. 2007. № 9. С. 1112–1119.
7. Белоусов М. В., Машкина О. С. Влияние никеля и кадмия на цитогенетические показатели *Pinus sylvestris* // Цитология. 2015. Т. 57. № 6. С. 459–464.
8. Сафонов С. И., Литинская Т. К. Накопление кадмия разными органами взрослых растений ячменя // Экологические аспекты биологических исследований. 1999. С. 30–34.
9. Гиниятуллин Р. Х. Дифференциация деревьев в санитарно-защитных лесных насаждениях Стерлитамакского промышленного центра // Материалы IV Международной научной конференции «Экология и география растений и растительных сообществ». Екатеринбург: Автономная некоммерческая организация высшего образования «Гуманитарный университет», 2018. С. 177–180.
10. Лукин С. В., Лисецкий Ф. Н., Явтушенко В. Е. Нормирование содержания тяжелых металлов в черноземе // Вестник Российской академии сельскохозяйственных наук. 2000. № 4. С. 68–69.
11. Liu Q. Q., Zhang Y. X., Wang Y. J., Wang W. L., Gu C. S., Huang S. Z., Yuan H. Y., Dhankher O. P. Quantitative proteomic analysis reveals complex regulatory and metabolic response of *Iris lactea* Pall. var. *chinensis* to cadmium toxicity // Journal of Hazardous Materials. 2020. Vol. 400. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2020.123165.
12. Vaculík M., Jurkovic L., Matejkovič P., Molnárová M., Lux A. Potential risk of arsenic and antimony accumulation by medicinal plants naturally growing on old mining sites // Water, Air, & Soil Pollution. 2013. Vol. 224 (5). No. 1546. P. 1–16. DOI: 10.1007/s11270-013-1546-9.
13. Седельникова Л. Л., Чанкина О. В. Элементный состав вегетативных органов сортов ‘Regal Air’ и ‘Speak to me’ *Hemerocallis hybrida* // Химия растительного сырья. 2020. № 1. С. 245–250. DOI: 10.14258/jcprm.2020014612.
14. Reut A., Biglova A., Allayarova I. Accumulation of heavy metals in the organs of herbaceous plants // E3S Web of Conferences. Ser. “Actual Problems of Ecology and Environmental Management, АРЕЕМ 2021”. Vol. 265. Art. No. 02019. DOI: 10.1051/e3sconf/202126502019.
15. Минкина Т. М., Бурачевская М. В., Чаплыгин В. А., Бакоев С. Ю., Антоненко Е. М., Белогорская С. С. Накопление тяжелых металлов в системе почва – растение в условиях загрязнения // Научный журнал Российского НИИ проблем мелиорации. 2011. № 4 (4). С. 1–17.
16. Кожевникова А. Д., Серегин И. В., Быстрова Е. И., Беляева А. И., Катаева М. Н., Иванов В. Б. Влияние нитратов свинца, никеля и стронция на деление и растяжение клеток корня кукурузы // Физиология растений. 2009. Т. 56. № 2. С. 268–277.
17. Ветрова О. А., Кузнецов М. Н., Леоничева Е. В., Мотылева С. М., Мертвищева М. Е. Накопление тяжелых металлов в органах земляники садовой в условиях техногенного загрязнения // Сельскохозяйственная биология. 2014. Т. 49. № 5. С. 113–119.
18. Алексеева Н. Б. Род *Iris* L. (Iridaceae) в России // Turczaninowia. 2008. Т. 11. № 2. С. 5–70.
19. Аскерова Л. А. Экологическая валентность некоторых видов ирисов западной части Азербайджана // Бюллетень науки и практики. 2019. Т. 5. № 10. С. 50–55. DOI: 10.33619/2414-2948/47/06.
20. Красная книга Республики Башкортостан: в 2 т. Т. 1: Растения и грибы // Под ред. Миркина Б. Н. Уфа: МедиаПринт, 2011. С. 384.
21. Кузнецов А. М., Фесюн А. П., Самохвалов С. Г., Махонько Э. П. Методические указания по определению тяжелых металлов в почвах сельхозугодий и продукции растениеводства. М.: ЦИНАО, 1992. С. 1–61.
22. Методика выполнения измерений массовой доли элементов в пробах почв, грунтов и донных отложениях методами атомно-эмиссионной и атомно-абсорбционной спектроскопии. М-МВИ-80-2008. СПб, 2008. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://files.stroyinf.ru> (дата обращения 10.01.2022).

23. Методика количественного химического анализа. Определение As, Pb, Cd, Sn, Cr, Cu, Fe, Mn и Ni в пробах пищевых продуктов и пищевого сырья атомно-абсорбционным методом с электротермической атомизацией. № М-02-1009-08. СПб, 2009. 20 с. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://analit-spb.ru> (дата обращения 12.01.2022).
24. Копчик Г. Н. Проблемы и перспективы фиторемедиации почв, загрязненных тяжелыми металлами (обзор литературы) // Почвоведение. 2014. № 9. С. 1113. DOI: 10.7868/S0032180X1409007X.
25. Ежегодник. Загрязнение почв Российской Федерации токсикантами промышленного происхождения в 2009 году. Обнинск: ГУ «ВНИИГМИ-МЦД», 2010. С. 139.
26. ОФС.1.5.3.0009.15. Определение содержания тяжелых металлов и мышьяка в лекарственном растительном сырье и лекарственных растительных препаратах. Государственная фармакопея Российской Федерации. XIV изд. Т. II. М., 2018. С. 1815–3262.
27. Festin E. S., Salk C., Tigabu M., Syampungani S., Oden P. C. Biological traits of tropical trees suitable for restoration of copper-polluted lands // Ecological Engineering. 138 (2019). P. 118–125. DOI: 10.1016/j.ecoleng.2019.07.010.
28. Толкач Г. В., Позняк С. С. Содержание химических элементов в почвах на территории фермерских (крестьянских) хозяйств Брестского района // Экологический вестник. 2015. № 3. С. 79–88.
29. Чуенкова Г. А., Карелин А. О., Аскарлов Р. А., Аскарова З. Ф. Оценка риска здоровью населения города Уфы, обусловленного атмосферными загрязнениями // Гигиена и санитария. 2015. Т. 94. № 3. С. 24–29.

References

1. Korelskaya T. A., Popova L. F. Heavy metals in the soil-vegetation cover of the selitebnni landscape of the city Arkhangelsk // Arctic and North. 2012. No. 7. P. 136–152.
2. Nikitenko M. A. Species specificity of absorption of heavy metals (Cu, Zn, Mn and Fe) by woody plants of Kambarka of the Udmurt Republic // Bulletin of Izhevsk State Technical University. 2007. No. 2 (34). P. 158–159.
3. Shabanova I. V., Neshchadim N. N. Influence of agrotechnologies on the content of heavy metals in soil and grain quality of winter barley // Taurida Herald of the Agrarian Sciences. 2019. No. 1 (17). P. 103–111. DOI: 10.33952/2542-0720-2019-1-17-103-111.
4. Belozubova N. Y., Zubkova V. M., Reutskaya V. V. The uptake of lead, cadmium and arsenic by pasture plants under the conditions of the Volgograd region // Bulletin of Altai State Agricultural University. 2016. No. 5 (139). P. 71–76.
5. Barsukova V. S. Physiological and genetic aspects of plants resistivity to heavy metals // Ecology. A series of analytical reviews of world literature. 1997. No. 47. P. 1–67.
6. Il'in V. B. Heavy metals in the soil-crop system // Eurasian Soil Science. 2007. Vol. 40. No. 9. P. 993–999.
7. Belousov M. V., Mashkina O. S. Cytogenetic response of scots pine (*Pinus sylvestris* L.) to cadmium and nickel // Tsitologiya. 2015. Vol. 57. No. 6. P. 459–464.
8. Safonov S. I., Litinskaya T. K. Accumulation of cadmium by various organs of adult barley plants // Ecology aspects of biology researches. 1999. P. 30–34.
9. Giniyatullin R. Kh. Differentiation of trees in sanitary-protective forest landings of the Sterlitamak industrial center // Proceedings of the IV International Scientific Conference “Ecology and geography of plants and plant communities”. Yekaterinburg: Autonomous non-profit organization of higher education “Humanitarian University”, 2018. P. 177–180.
10. Lukin S. V., Lisetskiy F. N., Yavtushenko V. E. Rationing of the content of heavy metals in black soil // Bulletin of the Russian Academy of Agricultural Sciences. 2000. No. 4. P. 68–69.
11. Liu Q. Q., Zhang Y. X., Wang Y. J., Wang W. L., Gu C. S., Huang S. Z., Yuan H. Y., Dhankher O. P. Quantitative proteomic analysis reveals complex regulatory and metabolic response of *Iris lactea* Pall. var. *chinensis* to cadmium toxicity // Journal of Hazardous Materials. 2020. Vol. 400. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2020.123165.
12. Vaculík M., Jurkovic L., Matejkovič P., Molnárová M., Lux A. Potential risk of arsenic and antimony accumulation by medicinal plants naturally growing on old mining sites // Water, Air, & Soil Pollution. 2013. Vol. 224 (5). No. 1546. P. 1–16. DOI: 10.1007/s11270-013-1546-9.
13. Sedel'nikova L. L., Chankina O. V. The elemental composition of the vegetative organs of sorts ‘Regal Air’ and ‘Speak to me’ of *Hemerocallis hybrida* // Khimija rastitel'nogo syr'ja (Chemistry of plant raw material). 2020. No. 1. P. 245–250. DOI: 10.14258/jcprm.2020014612.
14. Reut A., Biglova A., Allayarova I. Accumulation of heavy metals in the organs of herbaceous plants // E3S Web of Conferences. Ser. “Actual Problems of Ecology and Environmental Management, APEEM 2021”. Mishref: EDP Sciences, 2021. Vol. 265. Art. No. 02019. DOI: 10.1051/e3sconf/202126502019.

15. Minkina T. M., Burachevskaia M. V., Chaplygin V. A., Bakoev S. U., Antonenko E. M., Belogorskaia S. S. Heavy metals accumulation in soil – plant system in polluted environment // Scientific Journal of Russian Scientific Research Institute of Land Improvement Problems. 2011. No. 4 (4). P. 1–17.
16. Kozhevnikova A. D., Seregin I. V., Bystrova E. I., Ivanov V. B., Belyaeva A. I., Kataeva M. N. The effects of lead, nickel, and strontium nitrates on cell division and elongation in maize roots // Russian Journal of Plant Physiology. 2009. Vol. 56. No. 2. P. 268–277.
17. Vetrova O. A., Kuznetsov M. N., Leonicheva E. V., Motyleva S. M., Mertvishcheva M. E. Accumulation of heavy metals in the strawberry plants grown in conditions of anthropogenic pollution // Sel'skokhozyaistvennaya Biologia [Agricultural Biology]. 2014. Vol. 49. No. 5. P. 113–119.
18. Alekseeva N. B. Genus *Iris* L. (Iridaceae) in Russia // Turczaninowia. 2008. Vol. 11. No. 2. P. 5–70.
19. Askerova L. A. Ecological valence of some irises species of the western part of Azerbaijan // Bulletin of Science and Practice. 2019. Vol. 5. No. 10. P. 50–55. DOI: 10.33619/2414-2948/47/06.
20. Red Data Book of the Bashkortostan Republic: in 2 volumes. Vol. 1: Plants and mushrooms // Ed. by Mirkin B. N. Ufa: MediaPrint, 2011. P. 384.
21. Kuznetsov A. M., Fesyun A. P., Samokhvalov S. G., Makhonko E. P. Guidelines for the determination of heavy metals in agricultural soils and crop production. Moscow: TsINA O, 1992. P. 1–61.
22. Method for performing measurements of the mass fraction of elements in samples of soil, earth [soil] and bottom sediments using atomic emission and atomic absorption spectrometry methods. M-MVI-80-2008. Saint-Petersburg, 2008. [Electronic resource]. Access point: <https://files.stroyinf.ru> (reference's date 10.01.2022).
23. Methods of quantitative chemical analysis. Determination of As, Pb, Cd, Sn, Cr, Cu, Fe, Mn and Ni in samples of food products and food raw materials by atomic absorption method with electrothermal atomization. No. M-02-1009-08. Saint-Petersburg, 2009. 20 p. [Electronic resource]. Access point: <https://analit-spb.ru> (reference's date 12.01.2022).
24. Koptsik G. N. Problems and prospects concerning the phytoremediation of heavy metal polluted soils: a review // Eurasian Soil Science. 2014. Vol. 47. No. 9. P. 923–939. DOI: 10.1134/S1064229314090075.
25. Yearbook. Soil pollution with industrial toxicants in the Russian Federation in 2009. Obninsk: All-Russia Research Institute of Hydrometeorological Information – World Data Center, 2010. P. 139.
26. OFS.1.5.3.0009.15. Determination of the content of heavy metals and arsenic in medicinal herbal raw materials and medicinal herbal preparations. State Pharmacopoeia of the Russian Federation. XIV ed. Vol. II. Moscow, 2018. P. 1815–3262.
27. Festin E. S., Salk C., Tigabu M., Syampungani S., Oden P. C. Biological traits of tropical trees suitable for restoration of copper-polluted lands // Ecological Engineering. 2019. No. 138. P. 118–125. DOI: 10.1016/j.ecoleng.2019.07.010.
28. Taukach G. W., Pazniak S. S. Contents of chemical elements in soil in the farm farms of Brest region // Ekologicheskii Vestnik. 2015. No. 3. P. 79–88.
29. Chuenkova G. A., Karelin A. O., Askarov R. A., Askarova Z. F. Evaluation of the air pollution health risk for the population of the city of Ufa // Hygiene and sanitation. 2015. Vol. 94. No. 3. P. 24–29.

UDC 635.9: 574:582.579.2

Reut A. A., Beksheneva L. F.

TOXICANTS OF HAZARD CLASS 1 IN ORNAMENTAL HERBACEOUS PERENNIALS

Summary. *Technogenic emission of heavy metals (HM) leads to their accumulation and migration in the “soil–plant” system. Herbaceous perennials dominate among the landscaping components exposed to toxicants. The purpose of the research was to study the accumulation and distribution of elements of hazard class 1 in plants of the genus Iris L. The research was carried out in 2020–2021 in the South-Ural Botanical Garden-Institute. Objects of study: soil of the site and plant organs (Iris orientalis, I. pseudacorus, I. sibirica, I. spuria subsp. carthaliniae). The elemental composition was determined by the atomic absorption method with electrothermal atomization. The distribution of pollutants was evaluated using the biological absorption coefficient (BAC), total cumulation in vegetative and generative, as well as underground and aboveground organs. The content of mobile forms of HM and metalloids in the soil did not exceed the MPC and averaged: Cd – 0.03, As – 0.59, Pb – 0.48 mg/kg. Cadmium distribution in organs depended on the species: both basipetal (I. orientalis – 0.05 mg/kg) and acropetal accumulation of the element (I. spuria subsp. carthaliniae – 0.05 mg/kg) are possible. Accumulation in aboveground organs*

*exceeded cumulation in roots from 1.4 to 7.5 times. BAC values for cadmium differed from 0.27 to 1.56. It was shown that *I. orientalis*, *I. pseudacorus*, *I. spuria* subsp. *carthaliniae* roots performed a barrier function and accumulated arsenic in amounts exceeding the MPC (0.67–0.85 mg/kg). The root system of *I. sibirica* did not prevent the entry of the toxicant concentrated in the generative organs at a concentration exceeding the MPC (0.61–0.78 mg/kg). The BAC of arsenic in the leaves of all species was <1. Lead uptake was species-independent. Close total elemental values, similar organ distribution and consistently high MPC confirmed that. A predominantly aboveground pollutant concentration was revealed (3.4–5.1). The result of the regression analysis showed the content of the mobile form of lead in soil did not affect its accumulation in leaves.*

Keywords: *heavy metals, metalloids, lead, cadmium, arsenic, Iris L., MPC, biological absorption coefficient, translocation coefficient.*

Реут Антонина Анатольевна, кандидат биологических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории интродукции и селекции цветочных растений, Южно-Уральский ботанический сад-институт – обособленное структурное подразделение Федерального государственного бюджетного научного учреждения Уфимского федерального исследовательского центра Российской академии наук; 450080, Россия, Республика Башкортостан, г. Уфа, ул. Менделеева, 195, корп. 3; e-mail: cvetok.79@mail.ru.

Бекшенева Лилия Файзиевна, младший научный сотрудник лаборатории интродукции и селекции цветочных растений, Южно-Уральский ботанический сад-институт – обособленное структурное подразделение Федерального государственного бюджетного научного учреждения Уфимского федерального исследовательского центра Российской академии наук; 450080, Россия, Республика Башкортостан, г. Уфа, ул. Менделеева, 195, корп. 3; e-mail: flowers-ufa@yandex.ru.

Reut Antonina Anatolyevna, Cand. Sc. (Biol.), leading researcher of the Laboratory of introduction and selection of floral plants, South-Ural Botanical Garden-Institute of the Ufa Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences (UFRC RAS); 195, building 3, Mendeleev str., Ufa, Republic of Bashkortostan, 450080, Russia; e-mail: cvetok.79@mail.ru.

Beksheneva Liliya Fayzievna, junior researcher of the Laboratory of introduction and selection of floral plants, South-Ural Botanical Garden-Institute of the Ufa Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences (UFRC RAS); 195, building 3, Mendeleev str., Ufa, Republic of Bashkortostan, 450080, Russia; e-mail: flowers-ufa@yandex.ru.

Дата поступления в редакцию – 19.01.2022.

Дата принятия к печати – 01.03.2022.