

Аккумуляция тяжелых металлов представителями родового комплекса *Iris* L.

Л. Ф. Бекшенева¹, А. А. Реут^{1✉}

¹ Южно-Уральский ботанический сад-институт – обособленное структурное подразделение Уфимского федерального исследовательского центра Российской академии наук, Уфа, Россия

✉ E-mail: cvetok.79@mail.ru

Аннотация. 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. **Методы.** Исследования проводили в 2020–2021 гг. на базе Южно-Уральского ботанического сада-института УФИЦ РАН. 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. **Научная новизна.** Впервые распределение поллютантов оценивали с использованием коэффициента биологического поглощения (КБП) и суммарной кумуляции в органах. **Результаты.** Показано, что содержание подвижных форм ТМ в почве не превышает ПДК и составляет в среднем: Cd – 0,03, As – 0,59, Pb – 0,48 мг/кг. Выявлено, что распределение кадмия по органам зависит от вида: возможна как базипетальная (*I. orientalis*), так и акропетальная аккумуляция элемента (*I. spuria subsp. carthaliniae*). Накопление в надземных органах превышает кумуляцию в корнях от 1,4 до 7,5 раза. Показано, что корни *I. orientalis*, *I. pseudacorus*, *I. spuria subsp. carthaliniae* выполняют барьерную функцию и аккумулируют мышьяк в количествах, превышающих ПДК. Корневая система *I. sibirica* не препятствует поступлению токсиканта, сосредоточенному в генеративных органах в концентрации превышающей ПДК. Определено, что КБП мышьяка в листьях всех видов меньше 1. Поглощение свинца не зависит от видов, что подтверждается близкими суммарными значениями элемента, схожим распределением по органам, а также стабильно высокими КБП. Выявлена преимущественно надземная концентрация поллютанта. 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: Бекшенева Л. Ф., Реут А. А. Аккумуляция тяжелых металлов представителями родового комплекса *Iris* L. // Аграрный вестник Урала. 2022. № 07 (222). С. 49–57. DOI: 10.32417/1997-4868-2022-222-07-49-57.

Дата поступления статьи: 12.04.2022, **дата рецензирования:** 29.04.2022, **дата принятия:** 16.05.2022.

Постановка проблемы (Introduction)

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 самоочищающейся способности урбоэкосистем [1, с. 47].

Поглощение элементов зависит от ряда причин: видовой принадлежности растения, биодоступно-

сти самого элемента, агротехнологий [2, с. 105]. Исследователи отмечают зависимость между концентрацией ТМ в субстрате и растительных тканях. Чаще наблюдается прямая зависимость содержания тяжелых металлов в растениях от содержания их подвижных форм в почве, поскольку именно подвижные, а не валовые формы доступны растениям [3, с. 73]. По литературным данным, поступление и распределение ТМ по органам растений происходит таким образом, что корень берет на себя основные концентрирующие функции, осуществляя «эффект задержания» [4, с. 38].

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 [5, с. 14]. Исследователи отмечают видовые особенности в накоплении и распределении по растительным органам кадмия. У листовых деревьев наибольшие концентрации кадмия отмечаются в корнях [6, с. 178]. Пастбищные растения характеризуются максимальным содержанием кадмия в корнях, однако степень концентрации элемента отличается у разных видов и была выше у злаковых трав, чем у донника лекарственного и лебеды раскидистой [3, с. 72]. Из семейства ирисовых способность к накоплению кадмия показал *Iris lactea var. chinensis*, имеющий Cd-толерантные гены [7].

Предшествующими исследованиями установлено, что мышьяком наиболее обогащаются листья и корни растений [3, с. 74], отмечены значительные внутри- и межвидовые различия в способности растений к биоаккумуляции мышьяка. В исследованиях с *Hemerocallis hybrida*, произрастающим на культуроземе ЦСБС СО РАН, содержание мышьяка в листьях разных сортов составило 0,02 мг/кг, в корневищах – 0,04–0,09 мг/кг [8, с. 247]. Выращенные на культуроземе Южного Урала *Camassia cusickii* и сорта рода *Narcissus* обладают способностью к накоплению мышьяка, превышающего нормы ПДК как в луковичах, так и в листьях, причем концентрация токсиканта в надземных и подземных органах сортоспецифична [9].

До настоящего времени выявить биологическую роль свинца в метаболизме растений не удалось, хотя он и обнаруживается во всех растительных организмах [10, с. 61]. 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 [8, с. 248]. Исследователи сообщают о преимущественном накоплении свинца в листьях сортов садовой земляники, что может объясняться дополнительным фолиарным поглощением элемента из атмосферы [11, с. 143]. 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*, которые аккумулируют поллютант в луковичах [9].

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 многолетников рода *Iris* L.

Методология и методы исследования (Methods)

Исследования проводили в вегетационный период 2020–2021 гг. на опытном участке лаборатории интродукции и селекции цветочных растений Южно-Уральского ботанического сада-института – обособленного структурного подразделения 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. Почвы на опытном участке серые лесные, типичные 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). Характеристики рассчитывались по материалам архива погоды сайта <http://www.pogodaiklimat.ru>.

Весна 2020 года была ранней. В целом год характеризовался нормой по количеству выпавших осадков, однако в начале вегетации (в мае и июне) наблюдался недостаток по ним, тогда как в августе их выпало на 79,3 % больше нормы. Особенностью года являлась 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 года 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 террито-

рии ЮУБСИ УФИЦ РАН. Виды *I. orientalis* Mill. и *I. spuria subsp. carthaliniae* (Fomin) B. 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 [12, с. 52].

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 [13, с. 364].

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) B. 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 [14, с. 73], мышьяка – согласно [15].

Образцы растений (органы) отбирали в соответствующей фазе 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 [16, с. 11].

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 программах Statistica 6.1 и Microsoft Office Excel 2007.

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

Год исследования	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
Среднегодовое значение	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
Среднегодовое значение	33	47	67	55	58	48	590

Table 1
Weather conditions during the growing seasons 2020–2021

Year of study	Month						Per year
	April	May	June	July	August	September	
	Average air temperature, °C						
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
Average long-term indicator	5.2	13.2	18.1	19.7	17.2	11.6	3.8
The amount of precipitation, mm							
2020	57	27	37	67	104	56	589
2021	26	9	20	20	0.6	50	405
Average long-term indicator	33	47	67	55	58	48	590

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) [17, с. 33].

Результаты (Results)

Представленные далее цифровые показатели являются средними за два года исследований (2020–2021 гг.). Содержание кадмия в почве иридария составляет 0,033 мг/кг и не превышает установленных норм ПДК (1 мг/кг). В наших исследованиях концентрация кадмия в различных органах исследованных видов варьирует от 0,009 до 0,052 мг/кг и не выходит за рамки ПДК для ЛРС (1 мг/кг) [18, с. 1943].

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).

Напротив, 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, отмечается повышенное содержание Cd в листьях, превышающее в 2,1 раза его содержание в корнях. Первый вид можно отнести к исключителям, а второй – к аккумуляторам данного металла [19, с. 120]. *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.

Об интенсивности поглощения растениями кадмия из почвы можно судить по полученному КБП. 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

в градации выше, чем орган (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*) раза.

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 [18, с. 1944], экологически безопасным является растительное сырье, содержащее мышьяк в количестве не более 0,5 мг/кг. В нашем исследовании содержание мышьяка в различных органах растений колеблется 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, равно как и в листьях, выше установленного ПДК, однако генеративные органы (цветоносы, цветы и семена) являются средоточием 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 раза превышает его аккумуляцию в вегетативных. У остальных видов различие в аккумуляции токсиканта между генеративными и вегетативными органами не превышает значений 1,05–1,35 раза. Виды также различаются по способности накапливать мышьяк в надземных и под-

земных 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 раза.

По сравнению с другими тяжелыми металлами свинец наименее подвижен, причем степень подвижности элемента сильно снижается при известковании почв [20, с. 128]. Содержание подвижных форм свинца в почве исследованного культурозема не превышает ПДК для почв (6 мг/кг) и составляет 0,48 мг/кг.

В соответствии с Фармакопеей [18, с. 1953] 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 отмечается 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). В связи с этим 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 фолларном поступлении свинца в растения, поскольку уровень загрязнения атмосферы в городе Уфа от-

носится к «высокому», исследователи отмечают рост выбросов неорганической пыли, содержащей свинец [21, с. 28].

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 (таблица 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 наблюдаем преимущественную концентрацию элемента в надземной части: от 3,4 (*I. spuria subsp. carthaliniae*) до 5,1 раза (*I. sibirica*).

Обсуждение и выводы (Discussion and Conclusion)

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

Таблица 2
Содержание тяжелых металлов и металлоида I класса опасности в растениях рода *Iris*, мг/кг

Вид	Содержание элемента в органах:								
	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

Table 2
The content of heavy metals and metalloid I hazard class in plants of the genus *Iris*, mg/kg

Species	The content of the element in the organs:								
	Whole plant			Vegetative/generative			Elevated/underground		
	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

зависит от вида. Близкородственные виды имеют либо корневое (*I. orientalis* – 0,05 мг/кг), либо фоллиарное (*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 содержа-

нию элемента также является *I. sibirica* (3,1 мг/кг). Определено, что коэффициент биологического поглощения мышьяка в листьях всех видов меньше 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 фоллиарным путем.

Благодарности (Acknowledgements)

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.

Библиографический список

1. Реут А. А., Денисова С. Г. Сравнительный анализ содержания тяжелых металлов в сырье некоторых представителей рода *Paeonia* L. // Аграрный вестник Урала. 2021. № 11 (214). С. 45–55. DOI: 10.32417/1997-2021-214-11-45-55.
2. 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.
3. 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.
4. Битюцкий Н. П. Микроэлементы высших растений. Санкт-Петербург: Изд-во С.-Петерб. ун-та, 2020. 368 с.
5. Башмакова Е. Б. Физиологические механизмы адаптации растений мимулуса крапчатого (*Mimulus guttatus* DC.) к совместному действию цинка и никеля: дис. ... канд. биол. наук. Москва, 2017. 150 с.
6. Гиниятуллин Р. Х. Дифференциация деревьев в санитарно-защитных лесных насаждениях Стерлитамакского промышленного центра // Экология и география растений и растительных сообществ: материалы IV Международной научной конференции. Екатеринбург, 2018. С. 177–180.
7. 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 [e-resource] // Journal of Hazardous Materials. 2020. Vol. 400. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0304389420311547?via%3Dihub> (date of reference: 12.03.2022). DOI: 10.1016/j.jhazmat.2020.123165.
8. 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.
9. Reut A., Biglova A., Allayarova I. Accumulation of heavy metals in the organs of herbaceous plants [e-resource] // E3S Web of Conferences. Ser. "Actual Problems of Ecology and Environmental Management, APEEM 2021". Mishref, 2021. URL: https://www.e3s-conferences.org/articles/e3sconf/pdf/2021/41/e3sconf_apeem2021_02019.pdf (date of reference: 12.03.2022). DOI: 10.1051/e3sconf/202126502019.

10. Лаврищев А. В., Литвинович А. В. Стабильный стронций в агроэкосистемах. Санкт-Петербург: Лань, 2019. 192 с.
11. Ветрова О. А. Агротехнические способы регулирования уровня никеля в ягодах земляники садовой // Современное садоводство. 2018. № 3. С. —146. DOI: 10.24411/2312-6701-2018-10318.
12. 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.
13. Красная книга Республики Башкортостан: в 2 т. Т. 1: Растения и грибы / Под ред. д-ра биол. наук В. Б. Мартыненко. Москва: Студия онлайн, 2021. 392 с.
14. Троц Н. М., Прохорова Н. В., Троц В. Б., Ахматов Д. А., Чернякова Г. И., Горшкова О. В., Виноградов Д. В., Костин Я. В. Тяжелые металлы в агроландшафтах Самарской области. Кинель: Самарская государственная сельскохозяйственная академия, 2018. 220 с.
15. Методика выполнения измерений массовой доли элементов в пробах почв, грунтов и донных отложениях методами атомно-эмиссионной и атомно-абсорбционной спектроскопии. М-МВИ-80-2008 [Электронный ресурс]. Санкт-Петербург, 2008. URL: <https://files.stroyinf.ru> (дата обращения: 10.01.2022).
16. 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 [Электронный ресурс]. Санкт-Петербург, 2009. 20 с. URL: <https://analit-spb.ru> (дата обращения: 12.01.2022).
17. Жуйков Д. В. Сера и микроэлементы в агроценозах (обзор) // Достижения науки и техники АПК. 2020. Т. 34. № 11. С. 32–42. DOI: 10.24411/0235-2451-2020-11105.
18. 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. Москва, 2018. С. 1815–3262.
19. 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. Pp. 118–125. DOI: 10.1016/j.eco-leng.2019.07.
20. Байботаева А. Д., Кенжалиева Г. Д., Босак В. Н. Тяжелые металлы в почвах урбанизированных территорий // Вестник Белорусской государственной сельскохозяйственной академии. 2019. № 4. С. 126–130.
21. Бактыбаева З. Б., Сулейманов Р. А., Валеев Т. К., Рахматуллин Н. Р., Степанов Е. Г., Давлетнуров Н. Х. Эколого-гигиеническая оценка загрязнения атмосферного воздуха на нефтедобывающих и нефтеперерабатывающих территориях Республики Башкортостан и состояние здоровья населения // Здоровье населения и среда обитания. 2020. № 2 (323). С. 26–32.

Об авторах:

Лилия Файзиевна Бекшенева¹, младший научный сотрудник лаборатории интродукции и селекции цветочных растений, ORCID 0000-0002-2506-4559, AuthorID 1039806; +7 917 413-21-68, flowers-ufa@yandex.ru
 Антонина Анатольевна Реут¹, кандидат биологических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории интродукции и селекции цветочных растений, ORCID 0000-0002-4809-6449, AuthorID 625318; +7 917 465-18-89, cvetok.79@mail.ru

¹ Южно-Уральский ботанический сад-институт – обособленное структурное подразделение Уфимского федерального исследовательского центра Российской академии наук, Уфа, Россия

Accumulation of heavy metals by representatives of the generic complex *Iris* L.

L. F. Beksheneva¹, A. A. Reut¹✉

¹South-Ural Botanical Garden-Institute – the separate structural subdivision of the Ufa Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences, Ufa, Russia

✉E-mail: flowers-ufa@yandex.ru

Abstract. Technogenic emission of heavy metals (HM) leads to their accumulation and migration in the “soil – plant” system. Herbaceous perennials occupy a significant place among the landscaping components exposed to toxicants. **The purpose of the research** is to study the accumulation and distribution of elements of hazard class I in plants of the genus *Iris* L. **Methods.** The research was carried out in 2020–2021 on the basis of the South-Ural

Botanical Garden-Institute UFRC RAS. Objects of study: soil of the site and plant organs (*Iris orientalis*, *I. pseudacorus*, *I. sibirica*, *I. spuria* subsp. *carthalinae*). The elemental composition was determined by the atomic absorption method with electrothermal atomization. **Scientific novelty.** For the first time, the distribution of pollutants was evaluated using the biological absorption coefficient (BAC) and total cumulation in organs. **Results.** It has been shown that the content of mobile forms of HM in the soil does not exceed the MPC and averages: Cd – 0.03, As – 0.59, Pb – 0.48 mg/kg. It was found that the distribution of cadmium in organs depends on the species: both basipetal (*I. orientalis*) and acropetal accumulation of the element (*I. spuria* subsp. *carthalinae*) are possible. Accumulation in above-ground organs exceeds cumulation in roots from 1.4 to 7.5 times. It was shown that the roots of *I. orientalis*, *I. pseudacorus*, *I. spuria* subsp. *carthalinae* perform a barrier function and accumulate arsenic in amounts exceeding the MPC. The root system of *I. sibirica* does not prevent the entry of the toxicant, which is concentrated in the generative organs at a concentration exceeding the MPC. It was determined that the BAC of arsenic in the leaves of all species is less than 1. Lead uptake is species-independent, as evidenced by close total elemental values, similar organ distribution, and consistently high MPC. A predominantly above-ground concentration of the pollutant was revealed. The result of the regression analysis showed that the content of the mobile form of lead in the soil does not affect its accumulation in the leaves.

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

For citation: Beksheneva L. F., Reut A. A. Akkumulyatsiya tyazhelykh metallov predstaviteleyami rodovogo kompleksa *Iris* L. [Accumulation of heavy metals by representatives of the generic complex *Iris* L.] // Agrarian Bulletin of the Urals. 2022. No. 07 (222). Pp. 49–57. DOI: 10.32417/1997-4868-2022-222-07-49-57. (In Russian.)

Date of paper submission: 12.04.2022, **date of review:** 29.04.2022, **date of acceptance:** 16.05.2022.

References

1. Reut A. A., Denisova S. G. Sravnitel'nyy analiz soderzhaniya tyazhelykh metallov v syr'ye nekotorykh predstaviteley roda *Paeonia* L. [Comparative analysis of the content of heavy metals in raw materials of some representatives of the genus *Paeonia* L.] // Agrarian Bulletin of the Urals. 2021. No. 11 (214). Pp. 45–55. DOI: 10.32417/1997-2021-214-11-45-55. (In Russian.)
2. Shabanova I. V., Neshchadim N. N. Vliyaniye agrotekhnologiy na soderzhaniye tyazhelykh metallov v pochve i kachestvo zerna ozimogo yachmenya [Influence of agrotechnologies on the content of heavy metals in soil and grain quality of winter barley] // Tavricheskiy vestnik agrarnoy nauki. 2019. No. 1 (17). Pp. 103–111. DOI: 10.33952/2542-0720-2019-1-17-103-111. (In Russian.)
3. Belozubova N. Yu., Zubkova V. M., Reutskaya V. V. Postupleniye svintsa, kadmiya i mysh'yaka v pastbishchnyye rasteniya v usloviyakh Volgogradskoy oblasti [The uptake of lead, cadmium and arsenic by pasture plants under the conditions of the Volgograd region] // Vestnik Altayskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. 2016. No. 5 (139). Pp. 71–76. (In Russian.)
4. Bityutskiy N. P. Mikroelementy vysshikh rasteniy [Microelements of higher plants]. Saint Petersburg: Izd-vo S.-Peterb. un-ta, 2020. 368 p. (In Russian.)
5. Bashmakova E. B. Fiziologicheskiye mekhanizmy adaptatsii rasteniy mimulyusa krapchatogo (*Mimulus guttatus* DC.) k sovmestnomu deystviyu tsinka i nikel'ya: dis. ...kand. biol. nauk [Physiological mechanisms of adaptation of speckled mimulus plants (*Mimulus guttatus* DC.) to the combined action of zinc and nickel: dissertation ... candidate of biological sciences]. Moscow, 2017. 150 p. (in Russian.)
6. Giniyatullin R. Kh. Differentsiatsiya derev'yev v sanitarno-zashchitnykh lesnykh nasazhdeniyakh Sterlitamakskogo promyshlennogo tsentra [Differentiation of trees in sanitary-protective forest landings of the Sterlitamak industrial center] // Ekologiya i geografiya rasteniy i rastitel'nykh soobshchestv: materialy IV Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii. Ekaterinburg, 2018. Pp. 177–180. (In Russian.)
7. 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 [e-resource] // Journal of Hazardous Materials. 2020. Vol. 400. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0304389420311547?via%3Dihub> (date of reference: 12.03.2022). DOI: 10.1016/j.jhazmat.2020.123165.
8. Sedel'nikova L. L., Chankina O. V. Elementnyy sostav vegetativnykh organov sortov 'Regal Air' i 'Speak To Me' *Hemerocallis hybrida* [The elemental composition of the vegetative organs of sorts 'Regal Air' and 'Speak To Me' of *Hemerocallis hybrida*] // Chemistry of plant raw material. 2020. No. 1. Pp. 245–250. DOI: 10.14258/jcpm.2020014612. (In Russian.)
9. Reut A., Biglova A., Allayarova I. Accumulation of heavy metals in the organs of herbaceous plants [e-resource] // E3S Web of Conferences. Ser. "Actual Problems of Ecology and Environmental Management, APEEM 2021".

Mishref, 2021. URL: https://www.e3s-conferences.org/articles/e3sconf/pdf/2021/41/e3sconf_apeem2021_02019.pdf (date of reference: 12.03.2022). DOI: 10.1051/e3sconf/202126502019.

10. Lavrishchev A. V., Litvinovich A. V. Stabil'nyy strontsiy v agroekosistemakh [Stable strontium in agroecosystems]. Saint Petersburg: Izd-vo Lan', 2019. 192 p. (In Russian.)

11. Vetrova O. A. Agrotekhnicheskiye sposoby regulirovaniya urovnya nikelya v yagodakh zemlyaniki sadovoy [Agrotechnical methods for regulating the level of nickel in garden strawberries] // Contemporary Horticulture. 2018. No. 3. Pp. 139–146. DOI: 10.24411/2312-6701-2018-10318. (In Russian.)

12. Askerova L. A. Ekologicheskaya valentnost' nekotorykh vidov irisov zapadnoy chasti Azerbaydzhana [Ecological valence of some species of irises of the western part of Azerbaijan] // Bulletin of Science and Practice. 2019. Vol. 5. No. 10. Pp. 50–55. DOI: 10.33619/2414-2948/47/06. (In Russian.)

13. Krasnaya kniga Respubliki Bashkortostan: v 2 t. T. 1: Rasteniya i griby [Red Data Book of the Bashkortostan Republic: in 2 volumes. Vol. 1: Plants and mushrooms] / Under the editorship of doctor of biological sciences V. B. Martynenko. Moscow: Studiya onlayn, 2021392 p. (In Russian.)

14. Trots N. M., Prokhorova N. V., Trots V. B., Akhmatov D. A., Chernyakova G. I., Gorshkova O. V., Vinogradov D. V., Kostin Ya. V. Tyazhelye metally v agrolandshaftakh Samarskoy oblasti [Heavy metals in agricultural landscapes of the Samara region]. Kinel: Samarskaya gosudarstvennaya sel'skokhozyaystvennaya akademiya, 2018. 220 p. (In Russian.)

15. Metodika vypolneniya izmereniy massovoy doli elementov v probakh pochv, gruntov i donnykh otlozheniyakh metodami atomno-emissionnoy i atomno-absorbtsionnoy spektrometrii. M-MVI-80-2008 [Method for performing measurements of the mass fraction of elements in samples of soils, soils and bottom sediments using atomic emission and atomic absorption spectrometry methods. M-MVI-80-2008] [e-resource]. Saint Petersburg, 2008. URL: <https://files.stroyinf.ru> (date of reference: 10.01.2022). (In Russian.)

16. Metodika kolichestvennogo khimicheskogo analiza. Opredeleniye As, Pb, Cd, Sn, Cr, Cu, Fe, Mn i Ni v probakh pishchevykh produktov i pishchevogo syr'ya atomno-absorbtsionnym metodom s elektrotermicheskoy atomizatsiyey. No. M-02-1009-08 [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] [e-resource]. Saint Petersburg, 2009. 20 p. URL: <https://analit-spb.ru> (date of reference: 12.01.2022). (In Russian.)

17. Zhuykov D. V. Sera i mikroelementy v agrotsenozakh (obzor) [Sulfur and microelements in agrocenoses (review)] // Achievements of Science and Technology of AIC. 2020. Vol. 34. No. 11. Pp. 32–42. DOI: 10.24411/0235-2451-2020-11105. (In Russian.)

18. OFS.1.5.3.0009.15. Opredeleniye sodержaniya tyazhelykh metallov i mysh'yaka v lekarstvennom rastitel'nom syr'ye i lekarstvennykh rastitel'nykh preparatakh. Gosudarstvennaya farmakopeya Rossiyskoy Federatsii. XIV izd. T. II. [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. Pp. 1815–3262. (in Russian.)

19. 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. Pp. 118–125. DOI: 10.1016/j.ecoeng.2019.07.

20. Baybotayeva A. D., Kenzhaliyeva G. D., Bosak V. N. Tyazhelye metally v pochvakh urbanizirovannykh territoriy [Heavy metals in the soils of urban areas] // Vestnik Belorusskoy gosudarstvennoy sel'skokhozyaystvennoy akademii. 2019. No. 4. Pp. 126–130. (In Russian.)

21. Baktybayeva Z. B., Suleymanov R. A., Valeev T. K., Rakhmatullin N. R., Stepanov E. G., Davletnurov N. Kh. Ekologo-gigiyenicheskaya otsenka zagryazneniya atmosfernogo vozdukha na nefte dobyvayushchikh i neftepererabatyvayushchikh territoriyakh Respubliki Bashkortostan i sostoyaniye zdorov'ya naseleniya [Ecological and hygienic assessment of atmospheric air pollution in the oil-producing and oil-refining territories of the Republic of Bashkortostan and the state of health of the population] // Public Health and Life Environment. 2020. No. 2 (323). Pp. 26–32. (In Russian.)

Authors' information:

Liliya F. Beksheneva¹, junior researcher of the laboratory for the introduction and selection of floral plants, ORCID 0000-0002-2506-4559, AuthorID 1039806; +7 917 413-21-68, flowers-ufa@yandex.ru

Antonina A. Reut¹, candidate of biological sciences, leading researcher of the laboratory for the introduction and selection of floral plants, ORCID 0000-0002-4809-6449, AuthorID 625318; +7 917 465-18-89, cvetok.79@mail.ru

¹South-Ural Botanical Garden-Institute – the separate structural subdivision of the Ufa Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences, Ufa, Russia