

УДК 581.192:582.579.2:635.9

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ЭЛЕМЕНТНОГО СОСТАВА ОРГАНОВ ПЕРСПЕКТИВНЫХ ВИДОВ РОДА *IRIS* L. (IRIDACEAE)

© А.А. Реут*, Л.Ф. Бекшенева

Южно-Уральский ботанический сад-институт – обособленное
структурное подразделение Уфимского федерального
исследовательского центра РАН, ул. Менделеева, 195/3, Уфа, 450080,
Россия, cvetok.79@mail.ru

Растения рода *Iris* L. являются перспективным лекарственным сырьем со значительной биологической и фармакологической активностью. Качество растительного сырья зависит от накопления и распределения в растительном организме потенциально опасных химических элементов. Цель настоящей работы – сравнительное изучение аккумуляции и переноса элементов по органам растений рода *Iris* L. (Iridaceae). Методом атомной абсорбции проанализировано содержание As, Cd, Cr, Cu, Mn, Ni, Pb в разных частях растений *I. orientalis*, *I. pseudacorus*, *I. sibirica*, *I. spuria*. Установлено, что в отсутствие почвенного загрязнения ирисы накапливают мышьяк в концентрации, превышающей предельно допустимую. Накопление хрома в сырье была также выше ПДК для ряда вариантов исследования. Эффективность переноса элементов из почвы к корневой системе значительно варьировала (фактор биоаккумуляции 0.2–4.4). Наиболее активно корневища ирисов поглощали никель. Ассимиляционная способность корней также отчетливо выражена в отношении Pb, As, Cr, Cu, Mn. В зависимости от элемента аккумуляция в листьях видоспецифична. Пропускная способность цветоноса наиболее выражена у *I. sibirica*, барьерная – наиболее проявлена у *I. orientalis*. Выявлены различные типы транслокации элементов по органам: акропетальная, равномерная, базипетальная. Для всех исследованных видов характерно акропетальное распределение Pb (фактор транслокации >1) и равномерное распределение Mn. Локация Cd может быть различной в зависимости от вида. Cu концентрируется в корнях (*I. orientalis*, *I. sibirica*, *I. spuria*), либо распределяется равномерно (*I. pseudacorus*). Выявленные закономерности аккумуляции и распределения элементов в органах растений рода *Iris* позволяют осуществлять прогностическую оценку качества сырья для получения безопасной продукции.

Ключевые слова: *Iris*, химические элементы, лекарственное растительное сырье, корневище, лист, цветонос, цветок, семена, фактор биоаккумуляции, фактор транслокации.

Для цитирования: Реут А.А., Бекшенева Л.Ф. Сравнительный анализ элементного состава органов перспективных видов рода *Iris* L. (Iridaceae) // Химия растительного сырья. 2024. №1. С. 251–259. DOI: 10.14258/jcprm.20240112501.

Введение

В современном мире практически не осталось территорий, так или иначе не затронутых антропогенным влиянием, поэтому проблема накопления и распределения химических элементов в растениях становится значимой. Это особенно актуально для видов, являющихся потенциальным источником лекарственного и пищевого сырья.

Род *Iris* L. (Iridaceae) насчитывает более 260 видов, большей частью распространенных в Северном полушарии. Виды рода богаты содержанием вторичных метаболитов, многие из них используются в народной и официальной медицине [1]. Активные компоненты представителей рода *Iris* проявляют антиоксидантную, цитотоксическую, антимикробную, противовирусную и иммуномодуляторную активность [2–6]. Вторичные метаболиты концентрируются в различных частях растений: листья и корневища ирисов накапливают фенольные соединения, эфирные масла, семена – глюкоманнаны, корневища – терпеноиды типа иридалов, цветы – эфирные масла и флавоны [7–14].

Накопление и распределение химических элементов по органам варьируется среди видов и сортов [15–17]. Так, некоторые элементы, относящиеся к токсичным, накапливаются в клеточной стенке, приводят к снижению общей массы растения, воздействуют на содержание пигментов и активность энзимов, приводят к росту окислительного стресса [18]. Аккумуляция потенциально опасных элементов в растениях

* Автор, с которым следует вести переписку.

сопровождается их поступлением в пищевую цепь гетеротрофов, в том числе через использование загрязненного растительного сырья в качестве лекарственного, что в итоге может быть опасным для здоровья человека.

Исходя из вышеизложенного, цель данной работы – изучение и оценка специфики аккумуляции и распределения химических элементов в растительном сырье некоторых видов рода *Iris* L., являющихся перспективными для использования в фармакологии [3].

Экспериментальная часть

За 2020–2022 годы в растительных и почвенных образцах методом атомной абсорбции проанализировано содержание As, Cd, Cr, Cu, Mn, Ni, Pb. Четыре вида ирисов, интродуцированных в Южно-Уральский ботанический сад-институт – обособленное структурное подразделение Федерального государственного бюджетного научного учреждения Уфимского федерального исследовательского центра РАН (далее ЮУБСИ УФИЦ РАН), были отобраны для исследований: *I. orientalis*, *I. pseudacorus*, *I. sibirica*, *I. spuria* (Iridaceae) (рис. 1). Отдельные здоровые неповрежденные части растений собирались в определенную фазу вегетации: цветы и цветоносы, семена, листья, корневища и корни в стадию цветения, зрелости, вторичного роста и осенний период соответственно. Корни тщательно промывали в проточной воде для удаления прикреплённых частиц почвы. Растительные образцы сушили при 60 °С до постоянного веса и измельчали до состояния порошка. Из общей пробы отбирали 5 г растительного материала и осуществляли кислотную минерализацию сырья согласно ГОСТ 26929-94. Минерализат разбавляли до 50 мл дистиллированной водой и фильтровали. С поверхностных слоев (глубина 0–20 см) почвы из 20 точек опытного участка (иридарий) отбирали пробы по 1 кг. Пробы были высушены на воздухе, и от каждой пробы отобрана гомогенизированная аликвота весом 50 г. Объединенную пробу почвы подвергали мокрому озолению (65% HNO₃/39% H₂O₂; 9 : 1) при 180 °С в течение 15 мин. Содержание элементов было проанализировано методом атомной абсорбции (Shimadzu A-6800 с электротермическим атомизатором GFA EX-7) в НИИСХ. Повторность измерения элементов в образцах – трехкратная, с расчетом средних значений. Для оценки уровня содержания элементов использовались общепринятые показатели ПДК.

Для оценки ассимиляционной способности элементов использовали фактор биоаккумуляции (ФБА) и фактор транслокации (ФТ). ФБА рассчитывали, как отношение концентрации элемента в корнях к его концентрации в почве [19]. Значения ФБА > 1 указывают на высокий потенциал аккумуляционной активности видов растений. Значения ФТ дают информацию о подвижности и переносе элементов в самом растении [20]. ФТ рассчитывали, как отношение концентрации элемента в цветах и семенах к его концентрации в цветоносах.

Обсуждение результатов

Свойства почвы опытного участка, содержание химических элементов и их ПДК представлены в таблице 1. В результате исследования выявлено наличие загрязнения по двум элементам – хрому и меди. Коэффициент загрязнения почвы (К) (отношение содержания элемента в почве к ПДК) позволяет оценить степень превышения уровня содержания химических элементов над ПДК – в 8.47 раз для хрома и в 1.44 раза для меди. Следовательно, анализ содержания и распределения химических элементов в органах растений осуществлялся на фоне повышенных концентраций двух элементов в почве.

В настоящее время в соответствии с требованиями Государственной фармакопеи Российской Федерации в лекарственном растительном сырье (ЛРС) и лекарственных растительных препаратах (ЛРП) нормируется содержание свинца, кадмия, ртути и мышьяка. Отсутствие санитарных нормативов, регламентирующих допустимые уровни содержания никеля, хрома, марганца и меди в растениях, затрудняет оценку полученных данных их содержания в исследованном сырье. Поэтому мы ориентировались на требования к содержанию элементов в пищевых продуктах (СанПиН 2.3.2 1078-01 «Гигиенические требования безопасности и пищевой ценности пищевых продуктов»).



A



B



C



D

Рис. 1. Объекты исследования: A – *I. orientalis*, B – *I. pseudacorus*, C – *I. sibirica*, D – *I. spuria*

Таблица 1. Отдельные свойства почвы иридария, содержание химических элементов и ПДК (мг/кг)

Свойства почвы		Химический элемент		Класс опасности элемента ⁴	ПДК
Нитратный азот	1.7	Pb	0.480±0.120	1	6 ¹
Обменный кальций, мг/экв. на 100 г	12.8	Cd	0.033±0.009	1	0.1–0.5 ²
Обменный магний, мг/кв. на 100 г	0.65	As	0.5925±0.189	1	2 ¹
Подвижной фосфор	140.9	Cr	0.424±0.144	2	0.05 ¹
Подвижной калий	145.0	Cu	4.320±1.080	2	3 ¹
Общий гумус, %	5.7	Mn	1.5475±0.495	3	100 ³
pH	6.33	Ni	0.3575±0.005	2	4 ¹

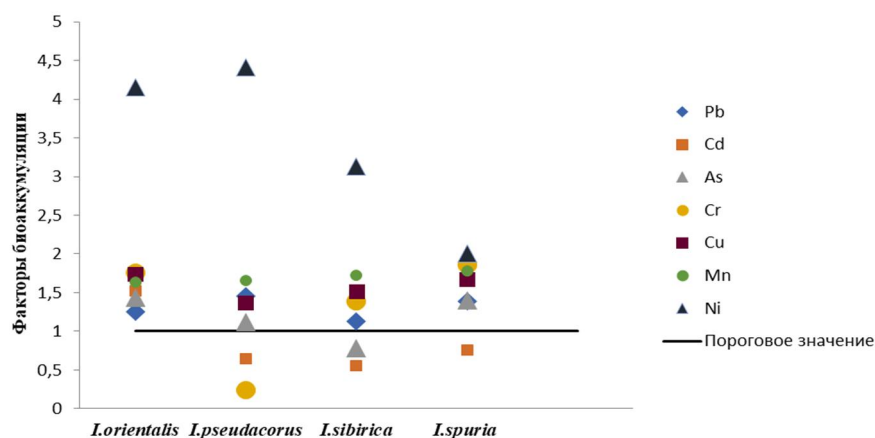
Примечание: ¹[21]; ²Высокое содержание по шкале Обухова [22]; ³ [23]; ⁴ [24].

Содержание химических элементов в органах растений представлено в таблице 2. На рисунке 2 отражены факторы биоаккумуляции. В таблице 3 показаны факторы транслокации для всех вариантов исследования.

Свинец. Общее содержание свинца в исследованных видах практически не отличается и не превышает установленного ПДК для лекарственных растений. Однако интенсивность поглощения элемента из почвы для всех видов превышает пороговое значение (ФБА>1). Содержание элемента в корневищах и корнях составляет 0.54–0.69 мг/кг, тогда как в надземных органах – листьях и цветоносах – концентрация свинца значительно возрастает, достигая уровня 0.902 мг/кг (*I. pseudacorus*). В цветах и плодах трех видов содержание элемента было ниже, чем в предшествующем органе (ФТ составляет 0.57–0.82) – вероятно, цветонос является физиологическим барьером для свинца и препятствует его поступлению в генеративные органы. Исключением стал *I. spuria* – семена и цветы аккумулируют свинец в количестве, превышающем его содержание в цветоносе в 1.8 и 1.12 раза соответственно.

Таблица 2. Содержание химических элементов в органах растений рода *Iris* L. (мг/кг)

		Pb	Cd	As	Cr	Cu	Mn	Ni
Корневища и корни	<i>I. orientalis</i>	0.600±0.150	0.050±0.013	0.849±0.272	0.744±0.253	7.502±1.876	2.516±0.805	1.485±0.535
	<i>I. pseudacorus</i>	0.695±0.124	0.021±0.005	0.663±0.212	0.101±0.034	5.895±1.474	2.576±0.824	1.575±0.567
	<i>I. sibirica</i>	0.540±0.135	0.018±0.004	0.462±0.148	0.588±0.200	6.570±1.643	2.676±0.856	1.120±0.403
	<i>I. spuria</i>	0.668±0.167	0.025±0.006	0.831±0.266	0.787±0.264	7.200±1.800	2.760±0.883	0.715±0.257
Листья	<i>I. orientalis</i>	0.836±0.209	0.012±0.003	0.462±0.148	0.055±0.019	5.189±1.297	2.419±0.774	1.001±0.360
	<i>I. pseudacorus</i>	0.787±0.197	0.021±0.005	0.477±0.153	0.556±0.189	6.323±1.581	2.740±0.877	1.192±0.429
	<i>I. sibirica</i>	0.744±0.186	0.054±0.014	0.534±0.171	0.881±0.299	4.770±1.193	2.554±0.817	1.232±0.444
	<i>I. spuria</i>	0.829±0.207	0.069±0.018	0.759±0.243	0.137±0.046	6.186±1.547	2.580±0.836	1.084±0.390
Цветоносы	<i>I. orientalis</i>	0.736±0.184	0.057±0.015	0.423±0.135	0.478±0.162	6.223±1.556	2.599±0.832	1.090±0.392
	<i>I. pseudacorus</i>	0.902±0.226	0.024±0.006	0.465±0.149	0.325±0.111	6.479±1.620	2.576±0.824	1.158±0.417
	<i>I. sibirica</i>	0.893±0.223	0.029±0.007	0.783±0.251	0.237±0.081	3.015±0.754	2.090±0.669	0.843±0.304
	<i>I. spuria</i>	0.470±0.118	0.024±0.006	0.516±0.165	0.715±0.243	6.084±1.521	2.684±0.859	0.876±0.315
Цветы	<i>I. orientalis</i>	0.522±0.131	0.033±0.009	0.510±0.163	1.154±0.392	6.546±1.637	2.552±0.816	1.650±0.594
	<i>I. pseudacorus</i>	0.570±0.144	0.027±0.007	0.333±0.107	0.185±0.063	5.535±1.384	2.885±0.923	1.305±0.470
	<i>I. sibirica</i>	0.513±0.128	0.048±0.012	0.750±0.240	1.047±0.356	4.766±1.192	2.025±0.648	0.933±0.336
	<i>I. spuria</i>	0.526±0.132	0.009±0.002	0.537±0.172	0.728±0.247	5.657±1.414	2.696±0.863	1.161±0.418
Семена	<i>I. orientalis</i>	0.502±0.125	0.027±0.007	0.384±0.123	0.296±0.101	5.600±1.400	2.898±0.927	1.284±0.462
	<i>I. pseudacorus</i>	0.471±0.118	0.024±0.006	0.687±0.220	0.137±0.046	6.750±1.688	2.934±0.939	1.288±0.464
	<i>I. sibirica</i>	0.547±0.137	0.033±0.009	0.607±0.194	0.208±0.070	3.150±0.788	2.894±0.926	1.111±0.400
	<i>I. spuria</i>	0.834±0.208	0.033±0.009	0.516±0.165	0.332±0.011	5.430±1.358	2.898±0.927	1.292±0.465
Общее содержание	<i>I. orientalis</i>	3.2	0.18	2.63	2.73	31.06	12.98	6.51
	<i>I. pseudacorus</i>	3.43	0.12	2.63	1.3	30.98	13.71	6.52
	<i>I. sibirica</i>	3.24	0.18	3.14	2.96	22.27	12.24	5.24
	<i>I. spuria</i>	3.33	0.16	3.16	2.7	30.56	13.62	5.13
ПДК		6 ¹	1 ¹	0.5 ¹	0.5 ²	0.5–50 ²	500 ³	0.7–2 ²

Примечание: ¹[25]; ²[26]; ³[27].Рис. 2. Факторы биоаккумуляции химических элементов в видах рода *Iris* L.Таблица 3. Значения фактора транслокации у изученных видов рода *Iris* L.

	<i>I. orientalis</i>		<i>I. pseudacorus</i>		<i>I. sibirica</i>		<i>I. spuria</i>	
	цв/ц	с/ц	цв/ц	с/ц	цв/ц	с/ц	цв/ц	с/ц
Pb	0.71	0.68	0.64	0.82	0.57	0.61	1.12	1.77
Cd	0.58	0.47	1.13	1	1.68	1.16	0.375	1.38
As	1.1	0.91	0.72	1.48	0.96	0.78	1.04	1
Cr	2.41	0.62	0.57	0.42	4.41	0.88	1.02	0.46
Cu	1.05	0.9	0.85	1.04	1.58	1.04	0.93	0.89
Mn	0.98	1.12	1.12	1.14	0.97	1.38	1	1.08
Ni	1.51	1.18	1.13	1.11	1.11	1.32	1.33	1.47

Примечание: цв/ц – цветок/цветонос, с/ц – семена/цветонос; значения в сером поле – выше порогового значения, используемого для оценки переноса элементов от цветоносов к цветам и семенам.

Кадмий. Кадмий не является необходимым элементом для роста растений, однако он легко поглощается корнями и перемещается в надземную часть, подавляя рост, фотосинтез и поглощение питательных веществ [28]. Об интенсивности поглощения видами кадмия из почвы можно судить по полученному ФБА (рис. 2). Для большинства вариантов исследования «корни – почва» кадмий является элементом биологического захвата (ФБА<1). И лишь для *I. orientalis* металл становится составляющей биологического накопления (ФБА>1). Общее содержание кадмия в изученных видах не превышает ПДК для ЛРС. Наименьшее общее содержание элемента отмечено для *I. pseudacorus* (0.12 мг/кг). Этот вид характеризуется практически равномерным распределением Cd по всем органам. Разница между минимальным (*I. orientalis*) и максимальным (*I. spuria*) содержанием элемента в листьях ирисов составляет 5.75 раз. Цветонос *I. orientalis* ограничивает накопление элемента в цветах и семенах (ФТ=0.58 и 0.47 соответственно). В то же время корни и цветоносы других видов не препятствуют перемещению токсиканта в генеративные органы (ФТ=1–1.68).

Мышьяк. Экологически безопасным является растительное сырье, содержащее мышьяк в количестве не более 0.5 мг/кг [25]. В нашем исследовании содержание мышьяка в различных органах растений колеблется от 0.33 до 0.85 мг/кг. Наиболее значительные концентрации токсиканта установлены для корневищ и корней трех видов ирисов – *I. orientalis*, *I. pseudacorus* и *I. spuria*, их подземные органы выполняют барьерную функцию в отношении элемента. Расчет индексов биоаккумуляции также показал, что эти виды на незагрязненной почве являются растениями базипетального накопления мышьяка (ФБА>1). Напротив, защитная функция корневой системы *I. sibirica* в отношении мышьяка наименее проявлена – элемент не аккумулируется в корневищах и корнях выше установленного ПДК, однако листья и генеративные органы являются накопителями поллютанта. Листья *I. spuria* также содержат токсикант в количестве, превышающем ПДК, но в меньшей степени, чем корни (0.76 мг/кг). Несмотря на значительную корневую аккумуляцию, генеративные органы *I. spuria* также концентрируют мышьяк в количествах немного превышающих ПДК (0.52–0.54 мг/кг). В исследовании отмечена тенденция к накоплению мышьяка в семенах *I. pseudacorus* (0.69 мг/кг). За этим исключением цветоносы выполняют защитную роль по отношению к цветам и плодам (ФТ=0.78–1.1).

Хром. Накопление и распределение хрома в растениях изучали в условиях почвенного загрязнения, превышающего ПДК для почв в 8.5 раза. В соответствии с данными нашей работы, суммарная концентрация элемента минимальна для *I. pseudacorus*. Во всех органах этого вида, за исключением листьев, содержание токсиканта ниже ПДК, установленной для пищевых продуктов (0.1–0.33 мг/кг). Подземные органы остальных видов накапливают хром в количествах, превышающих ПДК (0.59–0.79 мг/кг). Высокое содержание хрома в корнях было ожидаемым, поскольку концентрация этого элемента в почве была повышена. Как следствие, факторы биоаккумуляции для трех видов были больше 1. Металл плохо переносится в корни *I. pseudacorus*, на что указывает низкое значение ФБА (<1). Разница между минимальным (*I. orientalis*) и максимальным (*I. sibirica*) содержанием элемента в листьях ирисов составляет 16 раз. В надземных органах концентрации хрома, превышающие ПДК, обнаружены в листьях (*I. sibirica*, *I. pseudacorus*), цветоносах (*I. spuria*), цветах (*I. orientalis*, *I. sibirica*, *I. spuria*). Плоды всех исследованных видов защищены от высоких концентраций хрома (0.14–0.33 мг/кг). Транслокация хрома по генеративным органам имеет различный характер – с одной стороны, цветонос выполняет барьерную функцию, ограничивая поступление металла в плоды (ФТ=0.42–0.88), но, с другой, – не препятствует его поступлению в цветы (ФТ=1.02–4.41) (за исключением *I. pseudacorus*).

Медь. Распределение меди по органам растений изучали в условиях загрязнения данным элементом почвы, превышающего ПДК в 1.44 раза. Общее содержание металла в растениях, а также по органам не превышает ПДК для растительных продуктов. Среди исследованных видов *I. sibirica* отличается наименьшим суммарным содержанием меди – 22.3 мг/кг. Остальные виды содержат приблизительно равное общее количество элемента – от 30.6 до 31.1 мг/кг. Металл хорошо переносится из почвы в растения – фактор биоаккумуляции варьировал от 1.37 до 1.74. Содержание меди в листьях варьирует от 4.8 до 6.3 мг/кг. Распределение меди по генеративным органам практически эквивалентно его содержанию в цветоносах (ФТ=0.85–1.05), однако в цветах *I. sibirica* металла содержится в 1.58 раза больше, чем в цветоносе.

Марганец. Установлено, что почва опытного участка относится к группе почв с низкой обеспеченностью подвижными формами марганца (<10 мг/кг). В данных условиях накопление марганца в растениях не превышает ПДК, содержание элемента в органах варьирует в пределах 2–2.9 мг/кг. Разница в суммарном содержании элемента у разных видов практически не выражена. Значения ФБА различались для исследованных видов незначительно (1.63–1.78), что свидетельствует об одинаковой силе поглощения элемента из почвы. Значения фактора транслокации свидетельствуют об относительно равномерном распределении

марганца по генеративным органам растений с незначительным накоплением в цветах ($\Phi T=0.98-1.12$) и семенах ($\Phi T=1.08-1.38$).

Никель. Содержание никеля в почве не превышает установленного ПДК для почв, а содержание металла в органах растений не превышает ПДК, установленного для пищевых продуктов. Однако исследованные виды способны аккумулировать Ni в концентрациях выше, чем в почве: ФБА составляет максимальные значения среди всех исследованных элементов (от 2 до 4.4), что свидетельствует о биологическом накоплении металла в корневищах и корнях ирисов. Различий в накоплении никеля в листьях исследованных видов ирисов не обнаружено. Факторы транслокации, определенные для генеративных органов, показывают согласованный отток элемента из цветоносов в цветы и семена для всех исследованных видов ($\Phi T=1.1-1.5$).

Выводы

Сопоставление наших данных с утвержденными ПДК показало, что загрязненная почва не всегда способствует накоплению тяжелых металлов в растительном сырье, и наоборот – элемент, находящийся в почве в пределах нормы, способен накапливаться в растениях. Первое утверждение иллюстрирует характер поглощения и накопления меди в исследованных видах. В то же время ирисы склонны накапливать другой элемент (мышьяк) даже в отсутствие почвенного загрязнения. Металлоид концентрируется в количествах, превышающих ПДК для ЛРС, в корнях у трех видов, в листьях двух видов, в генеративных органах четырех видов. Увеличение биоаккумуляции As в биомассе исследованных растений может быть опасно для человека при использовании в лечебных целях. Классическая картина накопления наблюдается для хрома – загрязнение почвы поллютантом привело к превышающей ПДК аккумуляции в подземных органах (*I. orientalis*, *I. sibirica*), листьях (*I. sibirica*), цветоносах (*I. spuria*) и цветах (*I. orientalis*, *I. sibirica*, *I. spuria*). Таким образом, поскольку некоторые таксоны показали превышение пределов по потенциально опасным элементам, следует принимать меры предосторожности при употреблении их в качестве лекарственного сырья.

Эффективность переноса элементов из почвы к корням варьировала между видами растений и элементами, что подтверждается значительным интервалом факторов биоаккумуляции (0.24–4.4). Наиболее эффективно корни ирисов поглощали никель. За исключением *I. orientalis*, показан низкий уровень поглощения кадмия корневищами и корнями изученных видов. В исследованиях других авторов [30] показано, что *I. pseudacorus* признается эффективным ризофильтратором хрома из водных растворов гидропонной системы, однако из почвы поллютант этим видом поглощается слабо. Слабое поглощение мышьяка ($\Phi BA < 1$) корнями отмечено также для *I. sibirica*. Помимо данных единичных случаев ассимиляционная способность корней ирисов в отношении Pb, As, Cr, Cu, Mn отчетливо выражена ($\Phi BA=1.12-1.86$), что имеет значение при заготовке и использовании сырья подземных органов.

В распределении элементов по листьям прослеживаются два варианта аккумуляции – содержание элемента не зависит от вида ирисов (Pb, Ni, Mn), либо накопление элемента в листьях видоспецифично (Cd, As, Cr).

Хотя в нашем исследовании получены результаты от заготовки растительного сырья в период наибольшей зрелости каждого из органов, можно говорить о трех основных стратегиях в ходе накопления и распределения элементов по органам растений: металлы либо сосредоточены в надземных частях растений, либо их транслокация к побегам ограничена, либо элемент распределен по растительному организму равномерно. Акропетальная концентрация свинца и равномерное распределение марганца характерно для всех исследованных видов. Остальные элементы в зависимости от вида растения могут распределяться по-разному. Так, локация токсиканта первого класса опасности кадмия может быть базипетальной (*I. orientalis*), надземной (*I. sibirica*, *I. spuria*), равномерной (*I. pseudacorus*). Хром накапливается в корнях (*I. orientalis*, *I. spuria*), либо в надземной части (*I. pseudacorus*, *I. sibirica*). Медь в большей степени концентрируется в корнях (*I. orientalis*, *I. sibirica*, *I. spuria*), либо распределена равномерно (*I. pseudacorus*).

Пропускная способность цветоноса, контролирующего поступление элементов в цветы и семена, наиболее выражена у *I. spuria* – 10 вариантов из 14 находятся на уровне, либо выше аккумуляции элемента в цветоносе. Задерживающая функция цветоноса наиболее проявлена у *I. orientalis* – только 4 варианта из 14 превышают пороговый уровень элемента. Если рассматривать восходящий ток отдельных элементов, то следует отметить активную транслокацию никеля в цветы и семена для всех исследованных видов; хрома, меди и кадмия в цветы *I. sibirica*; хрома в цветы *I. orientalis*; мышьяка в плоды *I. pseudacorus*; свинца в цветы и семена, кадмия в семена *I. spuria*. Ограниченная транслокация хрома в семена исследованных видов в условиях загрязнения свидетельствует об эффективных механизмах, защищающих органы размножения растений от токсиканта.

Финансирование

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 № 122033100041-9.

Конфликт интересов

Авторы данной работы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Открытый доступ

Эта статья распространяется на условиях международной лицензии Creative Commons Attribution 4.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>), которая разрешает неограниченное использование, распространение и воспроизведение на любом носителе при условии, что вы дадите соответствующие ссылки на автора(ов) и источник и предоставите ссылку на Лицензию Creative Commons и укажете, были ли внесены изменения.

Список литературы

1. Kaššák P. Secondary metabolites of the choosen genus *Iris* species // Acta Universitatis Agriculturae et Silviculturae Mendelianae Brunensis. 2012. Vol. LX, no. 8. Pp. 269–280.
2. Mothana R.A., Abdo S.A., Hasson S., Althawab F.M., Alaghbari S.A., Lindequist U. Antimicrobial, antioxidant and cytotoxic activities and phytochemical screening of some yemeni medicinal plants // Evidence-based Complementary and Alternative Medicine. 2010. Vol. 7, no. 3. Pp. 323–330. DOI: 10.1093/ecam/nen004.
3. Тихомирова Л.И., Базарнова Н.Г., Микушина И.В., Долганова З.В. Фармаколого-биохимическое обоснование практического использования некоторых представителей рода *Iris* L. (обзор) // Химия растительного сырья. 2015. №3. С. 25–34. DOI: 10.14258/jcprm.201503837.
4. Singab A.N., Ayoub I.M., El-Shazly M., Korinek M., Wu T.-Y., Cheng Y.-B., Chang F.-R., Wu Y.-C. Shedding the light on Iridaceae: Ethnobotany, phytochemistry and biological activity // Industrial Crops and Products. 2016. Vol. 92. Pp. 308–335. DOI: 10.1016/j.indcrop.2016.07.040.
5. Kostić A.Ž., Gašić U.M., Pešić M.B., Stanojević S.P., Barać M.B., Mačukanović-Jocić M.P., Avramov S.N., Tešić Ž.L. Phytochemical analysis and total antioxidant capacity of rhizome, above-ground vegetative parts and flower of three *Iris* species // Chem. Biodivers. 2019. Vol. 16, no. 3. Article 1800565. DOI: 10.1002/cbdv.201800565.
6. Khatib S., Faraloni C., Bouissane L. Exploring the Use of *Iris* Species: Antioxidant Properties, Phytochemistry, Medicinal and Industrial Applications // Antioxidants. 2022. Vol. 11, no. 3. P. 526. DOI: 10.3390/antiox11030526.
7. Singab A.N. Flavonoids from *Iris spuria* (Zeal) cultivated in Egypt // Arch. Pharm. Res. 2004. Vol. 27, no. 10. Pp. 1023–1028. DOI: 10.1007/BF02975425.
8. Farag S.F., Kimura Y., Ito H., Takayasu J., Tokuda H., Hatano T. New isoflavone glycosides from *Iris spuria* L. (Calizona) cultivated in Egypt // J. Nat. Med. 2009. Vol. 63. Pp. 91–95. DOI: 10.1007/s11418-008-0291-7.
9. Roger B., Fernandez X., Jeannot V., Chahboun J. An alternative method for irones quantification in iris rhizomes using headspace solid-phase microextraction // Phytochem. Anal. 2010. Vol. 21, no. 5. Pp. 483–488. DOI: 10.1002/pca.1223.
10. Kaššák P. Total flavonoids and phenolics content of the chosen genus *Iris* species // Acta Universitatis Agriculturae et Silviculturae Mendelianae Brunensis. 2012. Vol. LX, no. 8. Pp. 119–126.
11. Mizuno T., Yabu T., Sasaki N., Iwashina T. Phenolic compounds, including novel C-glycosylflavone, from the flowers of the tall bearded *Iris* cultivar ‘Victoria Falls’ // Nat. Prod. Commun. 2012. Vol. 7, no. 12. Pp. 1591–1594.
12. Базарнова Н.Г., Ильичева Т.Н., Тихомирова Л.И., Сеницына А.А. Скрининг химического состава и биологической активности *Iris sibirica* L. Сорт Cambridge // Химия растительного сырья. 2016. №3. С. 49–57. DOI: 10.14258/jcprm.2016031227.
13. Мукчайленко О.О., Ковалыов М.В. Phenolic compounds of the genus *Iris* plants (Iridaceae) // Ceska Slov. Farm. 2016. Vol. 65, no. 2. Pp. 70–77.
14. Седельникова Л.Л., Кукушкина Т.А. Содержание некоторых групп соединений в листьях и корневищах *Iris hybrida hort.* Сорт Coronation // Химия растительного сырья. 2018. №2. С. 131–136. DOI: 10.14258/jcprm.2018023476.
15. Hazra M., Avishek K., Pathak G. Phytoremedial Potential of *Typha latifolia*, *Eichornia crassipes* and *Monochoria hastata* found in contaminated water bodies across Ranchi City (India) // Int. J. Phytoremediation. 2015. Vol. 17, no. 9. Pp. 835–840. DOI: 10.1080/15226514.2014.964847.
16. Седельникова Л.Л., Чанкина О.В. Содержание тяжелых металлов в вегетативных органах красоднева гибридного (*Hemerocallis hybrida*) в урбанизированной среде // Вестник КрасГАУ. 2016. №2. С. 34–43.
17. Базарнова Н.Г., Тихомирова Л.И., Сеницына А.А., Афанасенкова И.В. Сравнительный анализ химического состава растительного сырья *Iris sibirica* L. // Химия растительного сырья. 2017. №4. С. 137–144. DOI: 10.14258/jcprm.2017042741.
18. Zhou Y.Q., Huang S.Z., Yu S.L., Gu J.G., Zhao J.Z., Han Y.L., Fu J.J. The physiological response and sub-cellular localization of lead and cadmium in *Iris pseudacorus* L. // Ecotoxicology. 2010. Vol. 19, no. 1. Pp. 69–76. DOI: 10.1007/s10646-009-0389-z.
19. Blaylock M.J., Salt D.E., Dushenkov S., Zakharova O., Gussman C., Kapulnik Y., Ensley B.D., Raskin I. Enhanced accumulation of Pb in Indian mustard by soil-applied chelating agents // Environ Sci. Technol. 1997. Vol. 31. Pp. 860–865.
20. Ali H., Khan E., Sajad M.A. Phytoremediation of heavy metals – Concepts and applications // Chemosphere. 2013. Vol. 91. Pp. 869–881.
21. Предельно допустимые концентрации (ПДК) химических веществ в почве: Гигиенические нормативы. М., 2006. 15 с.
22. Обухов А.И. Методические основы разработки ПДК тяжелых металлов и классификация почв по загрязнению // Система методов изучения почвенного покрова, деградированного под влиянием химического загрязнения. М., 1992. С. 13–20.

23. Гигиенические нормативы 2.1.7.2041-06. Предельно допустимые концентрации (ПДК) химических веществ в почве. М., 2006. 16 с.
24. Пименова Е.В. Нормирование качества окружающей среды и сельскохозяйственной продукции. Пермь, 2009. 74 с.
25. СанПиН 2.3.2.1078-01. Гигиенические требования безопасности и пищевой ценности пищевых продуктов. М., 2001. 269 с.
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. М., 2018. Т. 2. С. 2370–2382.
27. Ильин В.Б. Тяжелые металлы в системе почва-растение. Новосибирск, 1991. 151 с.
28. Mishra V.K., Tripathi B.D. Concurrent removal and accumulation of heavy metals by the three aquatic macrophytes // Bioresource Technology. 2008. Vol. 99, no. 15. Pp. 7091–7097. DOI: 10.1016/j.biortech.2008.01.002.
29. Caldelas C., Araus J.L., Febrero A., Bort J. Accumulation and toxic effects of chromium and zinc in *Iris pseudacorus* L. // Acta. Physiol. Plant. 2012. Vol. 34. Pp. 1217–1228. DOI: 10.1007/s11738-012-0956-4.

Поступила в редакцию 23 января 2023 г.

После переработки 22 марта 2023 г.

Принята к публикации 31 августа 2023 г.

*Reut A.A.**, *Beksheneva L.F.* COMPARATIVE ANALYSIS OF THE ELEMENTAL COMPOSITION OF ORGANS OF PROMISING SPECIES OF THE GENUS *IRIS* L. (IRIDACEAE)

South-Ural Botanical Garden-Institute of Ufa Federal Research Center of the RAS, Mendeleeva st., 195/3, Ufa, 450080, Russia, e-mail: cvetok.79@mail.ru

Plants of the genus *Iris* L. are promising medicinal raw materials with significant biological and pharmacological activity. The quality of plant raw materials depends on the accumulation and distribution of potentially hazardous chemical elements in the plant body. The aim of this work was a comparative study of the accumulation and transfer of elements through the organs of plants of the genus *Iris* L. (Iridaceae). The content of As, Cd, Cr, Cu, Mn, Ni, and Pb in different parts of *I. orientalis*, *I. pseudacorus*, *I. sibirica* and *I. spuria* plants was analyzed by atomic absorption. It has been established that in the absence of soil pollution, irises accumulate arsenic in concentrations exceeding the maximum allowable. The accumulation of chromium in the raw material was also above the maximum allowable concentration for a number of study options. The efficiency of element transfer from the soil to the root system varied significantly (bioaccumulation factor 0.2–4.4). Iris rhizomes absorbed nickel most actively. The assimilation ability of the roots is also clearly expressed in relation to Pb, As, Cr, Cu, Mn. Depending on the element, accumulation in leaves is species-specific. The carrying capacity of the peduncle is most pronounced in *I. sibirica*, the barrier capacity is most pronounced in *I. orientalis*. Various types of translocation of elements in organs were revealed: acropetal, uniform, basipetal. All studied species are characterized by acropetal distribution of Pb (translocation factor >1) and uniform distribution of Mn. The location of Cd may vary depending on the species. Cu is concentrated in the roots (*I. orientalis*, *I. sibirica*, *I. spuria*) or evenly distributed (*I. pseudacorus*). The revealed patterns of accumulation and distribution of elements in the organs of plants of the genus *Iris* make it possible to carry out a prognostic assessment of the quality of raw materials to obtain safe products.

Keywords: *Iris*, chemical elements, medicinal plant material, rhizome, leaf, peduncle, flower, seeds, bioconcentration factor, translocation factor.

For citing: Reut A.A., Beksheneva L.F. *Khimiya Rastitel'nogo Syr'ya*, 2024, no. 1, pp. 251–259. (in Russ.). DOI: 10.14258/jcprm.20240112501.

References

1. Kaššák P. *Acta Universitatis Agriculturae et Silviculturae Mendelianae Brunensis*, 2012, vol. LX, no. 8, pp. 269–280.
2. Mothana R.A., Abdo S.A., Hasson S., Althawab F.M., Alaghbari S.A., Lindequist U. *Evidence-based Complementary and Alternative Medicine*, 2010, vol. 7, no. 3, pp. 323–330. DOI: 10.1093/ecam/nen004.
3. Tikhomirova L.I., Bazarnova N.G., Mikushina I.V., Dolganova Z.V. *Khimiya Rastitel'nogo Syr'ya*, 2015, no. 3, pp. 25–34. DOI: 10.14258/jcprm.201503837. (in Russ.).

* Corresponding author.

4. Singab A.N., Ayoub I.M., El-Shazly M., Korinek M., Wu T.-Y., Cheng Y.-B., Chang F.-R., Wu Y.-C. *Industrial Crops and Products*, 2016, vol. 92, pp. 308–335. DOI: 10.1016/j.indcrop.2016.07.040.
5. Kostić A.Ž., Gašić U.M., Pešić M.B., Stanojević S.P., Barać M.B., Mačukanović-Jocić M.P., Avramov S.N., Tešić Ž.L. *Chem. Biodivers.*, 2019, vol. 16, no. 3, article 1800565. DOI: 10.1002/cbdv.201800565.
6. Khatib S., Faraloni C., Bouissane L. *Antioxidants*, 2022, vol. 11, no. 3, p. 526. DOI: 10.3390/antiox11030526.
7. Singab A.N. *Arch. Pharm. Res.*, 2004, vol. 27, no. 10, pp. 1023–1028. DOI: 10.1007/BF02975425.
8. Farag S.F., Kimura Y., Ito H., Takayasu J., Tokuda H., Hatano T. *J. Nat. Med.*, 2009, vol. 63, pp. 91–95. DOI: 10.1007/s11418-008-0291-7.
9. Roger B., Fernandez X., Jeannot V., Chahboun J. *Phytochem. Anal.*, 2010, vol. 21, no. 5, pp. 483–488. DOI: 10.1002/pca.1223.
10. Kaššák P. *Acta Universitatis Agriculturae et Silviculturae Mendelianae Brunensis*, 2012, vol. LX, no. 8, pp. 119–126.
11. Mizuno T., Yabuy T., Sasaki N., Iwashina T. *Nat. Prod. Commun.*, 2012, vol. 7, no. 12, pp. 1591–1594.
12. Bazarnova N.G., Ilyicheva T.N., Tikhomirova L.I., Sinitsyna A.A. *Khimiya Rastitel'nogo Syr'ya*, 2016, no. 3, pp. 49–57. DOI: 10.14258/jcprm.2016031227. (in Russ.).
13. Mykchailenko O.O., Kovalyov M.V. *Ceska Slov. Farm.*, 2016, vol. 65, no. 2, pp. 70–77.
14. Sedel'nikova L.L., Kukushkina T.A. *Khimiya Rastitel'nogo Syr'ya*, 2018, no. 2, pp. 131–136. DOI: 10.14258/jcprm.2018023476. (in Russ.).
15. Hazra M., Avishek K., Pathak G. *Int. J. Phytoremediation*, 2015, vol. 17, no. 9, pp. 835–840. DOI: 10.1080/15226514.2014.964847.
16. Sedel'nikova L.L., Chankina O.V. *Vestnik KrasGAU*, 2016, no. 2, pp. 34–43. (in Russ.).
17. Bazarnova N.G., Tikhomirova L.I., Sinitsyna A.A., Afanasenkova I.V. *Khimiya Rastitel'nogo Syr'ya*, 2017, no. 4, pp. 137–144. DOI: 10.14258/jcprm.2017042741. (in Russ.).
18. Zhou Y.Q., Huang S.Z., Yu S.L., Gu J.G., Zhao J.Z., Han Y.L., Fu J.J. *Ecotoxicology*, 2010, vol. 19, no. 1, pp. 69–76. DOI: 10.1007/s10646-009-0389-z.
19. Blaylock M.J., Salt D.E., Dushenkov S., Zakharova O., Gussman C., Kapulnik Y., Ensley B.D., Raskin I. *Environ Sci. Technol.*, 1997, vol. 31, pp. 860–865.
20. Ali H., Khan E., Sajad M.A. *Chemosphere*, 2013, vol. 91, pp. 869–881.
21. *Predel'no dopustimyye kontsentratsii (PDK) khimicheskikh veshchestv v pochve: Gigiyenicheskiye normativy*. [Maximum permissible concentrations (MPC) of chemical substances in soil: Hygienic standards]. Moscow, 2006, 15 p. (in Russ.).
22. Obukhov A.I. *Sistema metodov izucheniya pochvennogo pokrova, degradirovannogo pod vliyaniem khimicheskogo zagryazneniya*. [System of methods for studying soil cover degraded under the influence of chemical pollution]. Moscow, 1992, pp. 13–20. (in Russ.).
23. *Gigiyenicheskiye normativy 2.1.7.2041-06. Predel'no dopustimyye kontsentratsii (PDK) khimicheskikh veshchestv v pochve*. [Hygienic standards 2.1.7.2041-06. Maximum permissible concentrations (MPC) of chemicals in soil]. Moscow, 2006, 16 p. (in Russ.).
24. Pimenova Ye.V. *Normirovaniye kachestva okruzhayushchey sredy i sel'skokhozyaystvennoy produkcii*. [Standardization of environmental quality and agricultural products]. Perm, 2009, 74 p. (in Russ.).
25. *SanPiN 2.3.2.1078-01. Gigiyenicheskiye trebovaniya bezopasnosti i pishchevoy tsennosti pishchevykh produktov*. [SanPiN 2.3.2.1078-01. Hygienic requirements for the safety and nutritional value of food products]. Moscow, 2001, 269 p. (in Russ.).
26. *Gosudarstvennaya farmakopeya Rossiyskoy Federatsii. XIV izd.* [State Pharmacopoeia of the Russian Federation. XIV ed.]. M., 2018, vol. II, pp. 2370–2382. (in Russ.).
27. Il'in V.B. *Tyazhelyye metally v sisteme pochva-rasteniye*. [Heavy metals in the soil-plant system]. Novosibirsk, 1991, 151 p. (in Russ.).
28. Mishra V.K., Tripathi B.D. *Bioresource Technology*, 2008, vol. 99, no. 15, pp. 7091–7097. DOI: 10.1016/j.biortech.2008.01.002.
29. Caldelas C., Araus J.L., Febrero A., Bort J. *Acta. Physiol. Plant*, 2012, vol. 34, pp. 1217–1228. DOI: 10.1007/s11738-012-0956-4.

Received January 22, 2023

Revised March 22, 2023

Accepted August 31, 2023

Сведения об авторах

Реут Антонина Анатольевна – ведущий научный сотрудник лаборатории цветоводства и селекции, cvetok.79@mail.ru

Бекшенева Лилия Файзиевна – младший научный сотрудник, linden7@rambler.ru

Information about authors

Reut Antonina Anatolyevna – leading researcher at the Laboratory of Floriculture and Selection, cvetok.79@mail.ru

Beksheneva Liliya Fayzievna – junior researcher, linden7@rambler.ru