

НАКОПЛЕНИЕ ТЯЖЁЛЫХ МЕТАЛЛОВ И МЕТАЛЛОИДОВ В ОРГАНАХ НЕКОТОРЫХ ПРЕДСТАВИТЕЛЕЙ РОДА *PAEONIA* L. В УСЛОВИЯХ ТЕХНОГЕННОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ

© 2021

Реут А.А., Денисова С.Г.

Южно-Уральский ботанический сад-институт Уфимского федерального исследовательского центра РАН
(г. Уфа, Российская Федерация)

Аннотация. В статье рассматриваются особенности накопления тяжелых металлов и металлоидов декоративными цветочными культурами на примере родового комплекса *Paeonia* L. в условиях урбанизированной среды города Уфы. Объектами исследований являются четыре вида *P. peregrina* Mill., *P. lactiflora* Pall., *P. lactiflora* f. *rosea*, *P. delavayi* Franch. (сем. Paeoniaceae Rudolphi) и три сорта пиона гибридного 'Аппассионата', 'Мустай Карим', 'Jeanne d'Arc'. Изучение элементного состава надземной и подземной частей проводили по методике «Определение As, Pb, Cd, Sn, Cr, Cu, Fe, Mn и Ni в пробах пищевого сырья атомно-абсорбционным методом с электротермической атомизацией». Математическую обработку данных осуществляли с помощью методов вариационной статистики с использованием пакета программ AgCStat в виде надстройки Excel. Выявлено, что в изученных образцах содержание меди в 4,15–2520,00 раз выше, а содержание кадмия в 0,43–2520,0 раз ниже, чем других элементов. Отмечено, что минимальные концентрации мышьяка, хрома, марганца и железа отмечены в корнях; свинца, кадмия и меди – в листьях; никеля – в цветках изучаемых пионов. Максимальное содержание мышьяка и хрома обнаружено в листьях; свинца, никеля, марганца и железа – в стеблях; кадмия и меди – в цветках. Результаты корреляционного анализа показали, что абсолютные значения концентраций изучаемых элементов у рассматриваемых таксонов пионов коррелируют между собой в средней и сильной степени.

Ключевые слова: *Paeonia*; тяжелые металлы; металлоиды; надземные органы; подземная масса; Республика Башкортостан.

HEAVY METALS AND METALLOIDS ACCUMULATION IN ORGANS OF SOME REPRESENTATIVES OF THE GENUS *PAEONIA* L. UNDER TECHNOGENIC POLLUTION CONDITIONS

© 2021

Reut A.A., Denisova S.G.

South-Ural Botanical Garden-Institute of the Ufa Federal Research Centre of Russian Academy of Sciences
(Ufa, Russian Federation)

Abstract. The paper examines features of heavy metals and metalloids accumulation by decorative flower crops on the example of the generic complex *Paeonia* L. in the urbanized environment of Ufa. The objects of the research are four species (*P. peregrina* Mill., *P. lactiflora* Pall., *P. lactiflora* f. *rosea*, *P. delavayi* Franch.) (Family Paeoniaceae Rudolphi) and three varieties of hybrid paeony ('Appassionata', 'Mustai Karim', 'Jeanne d'Arc'). The study of the elemental composition of the aboveground and underground parts was carried out according to the method «Determination of As, Pb, Cd, Sn, Cr, Cu, Fe, Mn and Ni in samples of food raw materials by atomic absorption method with electrothermal atomization». Mathematical data processing was carried out using generally accepted methods of variation statistics using the AgCStat software package in the form of an Excel add-in. It was revealed that in the studied samples the copper content is 4,15–2520,00 times higher, and the cadmium content is 0,43–2520,0 times lower than that of other elements. The minimum concentrations of arsenic, chromium, manganese and iron were noted in the roots; lead, cadmium and copper – in the leaves; nickel – in the flowers of the studied paeonies. The maximum content of arsenic and chromium was found in the leaves; lead, nickel, manganese and iron – in stems; cadmium and copper – in flowers. The results of the correlation analysis showed that the absolute values of the concentrations of the studied elements in the considered taxon of paeonies correlate with each other to a moderate and strong degree.

Keywords: *Paeonia*; heavy metals; metalloids; aboveground organs; underground mass; Republic of Bashkortostan.

Введение

Влияние тяжелых металлов весьма разнообразно и зависит от содержания в окружающей среде. Это обусловлено, во-первых, их химическими особенностями, во-вторых, отношением к ним организмов, в-третьих, условиями окружающей среды [1, с. 214].

Химические элементы в растениях выполняют определенные функции в физиологических процессах. Для ультрамикроэлементов (Cu, Cd, Pb, As), от-

носящихся к группе тяжелых металлов, оптимальный интервал концентрации очень низок [2, с. 293]. Часто высшие растения без каких-либо морфологических изменений могут содержать опасные для человека и животных концентрации химических элементов [3, с. 52].

Металлы распределяются по органам растений неравномерно. Согласно литературным источникам, в наибольшей степени металлы накапливаются в ли-

стях [4, с. 53]. Это обусловлено многими причинами, одна из которых – локальное накопление элементов в результате перехода их в малоподвижную форму.

Цель данной работы – определение содержания тяжелых металлов и металлоидов (мышьяка, свинца, кадмия, хрома, меди, железа, марганца, никеля) в вегетативных и генеративных органах некоторых представителей рода *Paeonia* L., интродуцированных на территории Южно-Уральского ботанического сада-института УФИЦ РАН.

Методы исследования

В качестве объектов исследования были использованы некоторые таксоны рода *Paeonia* L., произрастающие на коллекционных участках Южно-Уральского ботанического сада-института УФИЦ РАН (далее – ЮУБСИ УФИЦ РАН): *P. peregrina* Mill., *P. lactiflora* Pall., *P. lactiflora* Pall. f. *rosea*, *P. delavayi* Franch., *P. hybrida* ‘Аппассионата’, ‘Жанна д’Арк’, ‘Мустай Карим’.

Для изучения содержания тяжелых металлов в растениях применяли атомно-абсорбционный метод анализа [5, с. 4] на спектрофотометре «Shimadzu AA-6300» на базе аналитической лаборатории научно-исследовательского института сельского хозяйства.

Подготовку анализируемого растительного материала проводили в трехкратной повторности для каждой партии исследуемого сырья. Для фитохимического исследования были взяты цветки, стебли, листья и корни семи таксонов пиона, выращенных на базе ЮУБСИ УФИЦ РАН.

Для проведения анализа с 10 растений каждого таксона брали пробы растительного материала согласно общепринятым методикам [6, с. 34]. Для количественного анализа цветки, стебли, листья и корни высушивали до воздушно-сухого состояния, затем измельчали до размера частиц, проходящих сквозь сито с диаметром отверстий 1 мм [7, с. 219; 8, с. 203]. Масса лабораторной пробы, необходимой для выполнения измерений, составляет 50 г.

Изучение элементного состава образцов проводили по методике количественного химического анализа. Определяли содержание As, Pb, Cd, Cr, Cu, Fe, Mn и Ni в лабораторных пробах атомно-абсорбционным методом с электротермической атомизацией № М-02-1009-08 [5, с. 7; 9, с. 81; 10, с. 143].

Для оценки уровня содержания тяжелых металлов были использованы предельно допустимые концентрации (ПДК) в соответствии с методикой по определению содержания тяжелых металлов и мышьяка в лекарственном растительном сырье и лекарственных растительных препаратов [11, с. 31].

Математическую обработку данных осуществляли с помощью общепринятых методов вариационной статистики [12, с. 47] с использованием пакета программ AgCStat в виде надстройки Excel и пакета программ статистического и биометрико-генетического анализа AGROS 2.09 [13; 14, с. 36; 15; 16, с. 97; 17, с. 103].

Результаты и обсуждение

Мышьяк входит в состав растений, но его биохимическая роль практически не изучена. Наиболее высокие количества As фиксируются в листьях и корнеплодах [2, с. 292]. Концентрация мышьяка в растениях, произрастающих на незагрязненных почвах, изменяется в пределах 0,01–1,5 мг/кг сухой мас-

сы. Концентрация As в исследуемых растениях варьирует в широких пределах от 0,022 (‘Мустай Карим’) до 0,92 мг/кг (*P. lactiflora*), что не превышает предельно допустимую концентрацию по тяжелым металлам. Максимальное накопление данного элемента обнаружено в листьях, минимальное – в корнях у большинства образцов (рис. 1).

Содержание свинца в разных частях растений, произрастающих в незагрязненных областях, по данным разных авторов, составляет 0,05–3 мг/кг сухой массы [2, с. 293]. Известно, что свинец в природных популяциях присутствует во всех растениях, при этом его роль в метаболизме не установлена [18, с. 78]. В исследуемых растениях содержание Pb варьирует от 0,505 (‘Аппассионата’) до 7,758 мг/кг (*P. delavayi*), что не превышает верхний предел ПДК [18, с. 79], т.е. 10 мг/кг. Наибольшее содержание данного элемента отмечено в листьях у большинства образцов (рис. 2).

Кадмий хорошо известен, как токсичный элемент, но он же относится к группе «новых» микроэлементов [19, с. 58]. Согласно литературным данным, наибольшие концентрации кадмия в загрязненных растениях всегда обнаруживаются в корнях и листьях [18, с. 65]. Нормальное содержание Cd в растениях составляет 0,05–0,2 мг/кг воздушно-сухой массы. В исследованном сырье содержание кадмия находится в пределах допустимого (согласно ПДК) и колеблется от 0,01 (*P. delavayi*) до 0,118 мг/кг (*P. lactiflora* f. *rosea*). Максимальное накопление элемента выявлено в стеблях и цветках, минимальное – в корнях и листьях (рис. 3).

Содержание хрома в высших растениях варьирует в пределах 0,02–0,20 мг/кг сухой массы [20, с. 112]. Некоторые растения, главным образом из районов развития серпентинитов или хромитовых месторождений, могут накапливать хром до 0,3% сухой массы [2, с. 294; 21, с. 68]. Содержание Cr в исследованных растениях варьировало от 0,099 (*P. peregrina*) до 0,332 мг/кг (*P. delavayi*). Наибольшие показатели элемента выявлены в разных частях растений (цветки, листья, стебли). Наименьшие значения отмечены в корнях у большинства образцов (рис. 4).

Железо участвует в синтезе хлорофилла, что определяет зеленую окраску листьев. Недостаток Fe тормозит фотосинтез, дыхание и вызывает глубокий хлороз развивающихся листьев [22, с. 1457]. По требованиям ПДК у травянистых растений содержание железа варьирует от 50,0 до 240,0 мг/кг сухого вещества [23, с. 48]. Концентрация железа в исследуемых образцах не превышает ПДК и колеблется от 0,328 до 0,773 мг/кг (*P. peregrina*). Максимальное и минимальное содержание Fe характерно для разных частей растений (рис. 5).

Медь активно участвует в процессах фотосинтеза, дыхания, восстановления и фиксации азота у растений [24, с. 82]. Среднее содержание Cu в наземной части трав, по данным [23, с. 39], находится на уровне 8,6 мг/кг. Согласно ПДК, содержание меди в растениях изменяется в пределах от 30–40 мг/кг воздушно-сухой массы до 150 мг/кг [25, с. 11]. Концентрация меди в исследуемых растениях варьирует в широких пределах от 8,795 (*P. lactiflora*) до 16,13 мг/кг (‘Мустай Карим’). Максимальное накопление данного элемента отмечено в цветках, стеблях и корнях (рис. 6).

Марганец широко распространен в природе. Он участвует в биосинтезе хлорофилла и повышает интенсивность фотосинтеза. Также играет важную роль в регулировании генетической функции растений [22, с. 1458]. Известно, что в зависимости от видовой принадлежности и места обитания растения в

надземной части накапливают Mn от единиц до сотен мг/кг сухой массы. В исследуемых растениях концентрация марганца очень незначительна: от 0,945 (*P. lactiflora*) до 1,249 мг/кг ('Аппассионата'). Наибольшее накопление элемента отмечено в стеблях и корнях, наименьшее – в цветках (рис. 7).

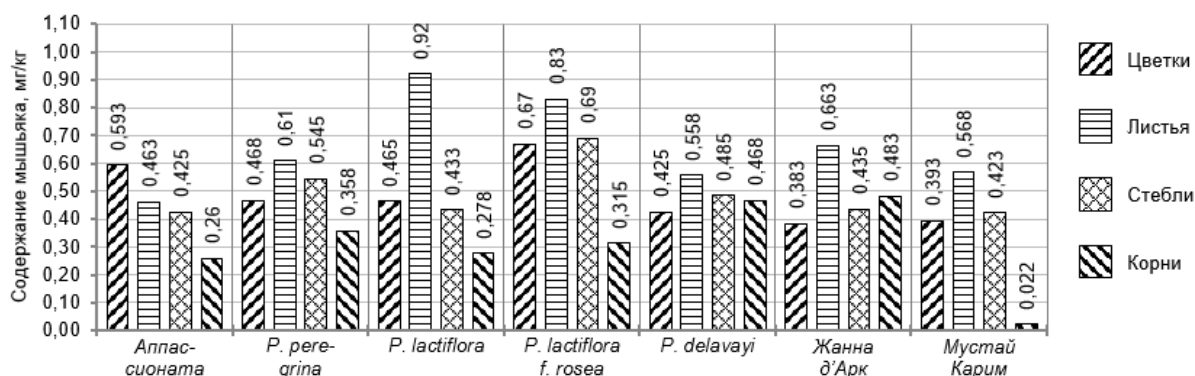


Рисунок 1 – Содержание мышьяка в органах некоторых представителей рода *Paeonia* L.

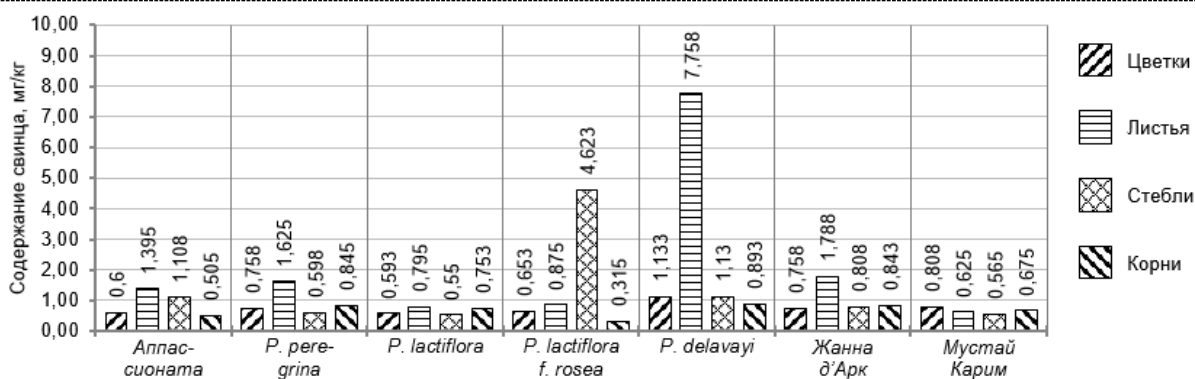


Рисунок 2 – Содержание свинца в органах некоторых представителей рода *Paeonia* L.

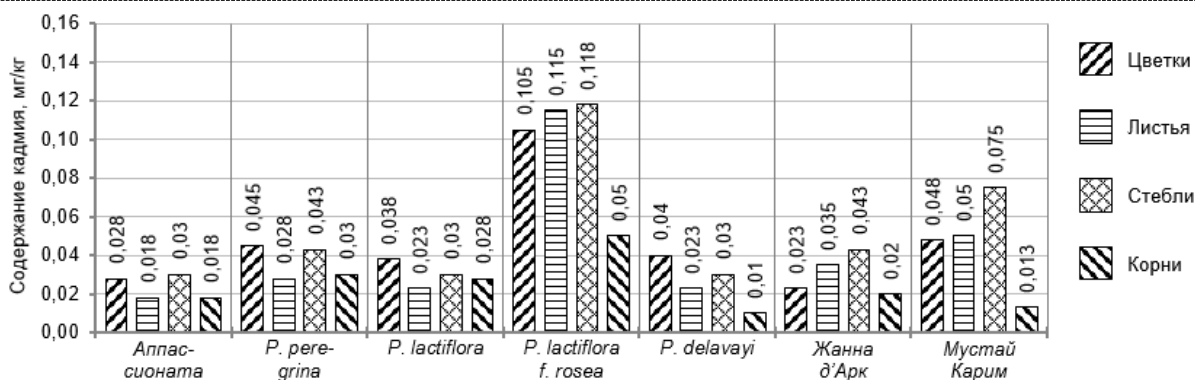


Рисунок 3 – Содержание кадмия в органах некоторых представителей рода *Paeonia* L.

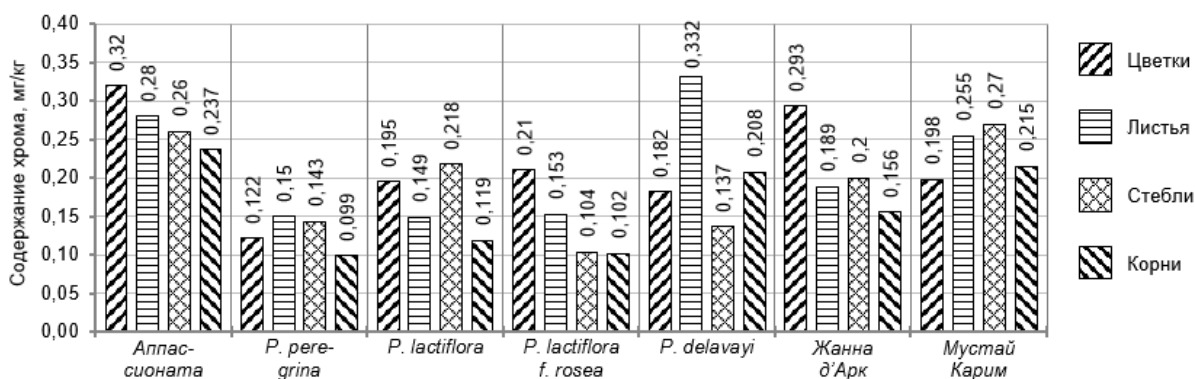


Рисунок 4 – Содержание хрома в органах некоторых представителей рода *Paeonia* L.

Биологическая роль никеля заключается в участии структурной организации и функционировании основных клеточных компонентов – ДНК, РНК и белка. Наряду с этим он присутствует и в гормональной регуляции организма [1, с. 215]. Содержание

никеля не превышает ПДК, установленную в пределах 80 мг/кг, оно варьирует от 0,481 (‘Аппассионата’) до 1,385 мг/кг (‘Жанна д’Арк’). Наибольшая концентрация элемента обнаружена в стеблях, наименьшая – в цветках у большинства образцов (рис. 8).

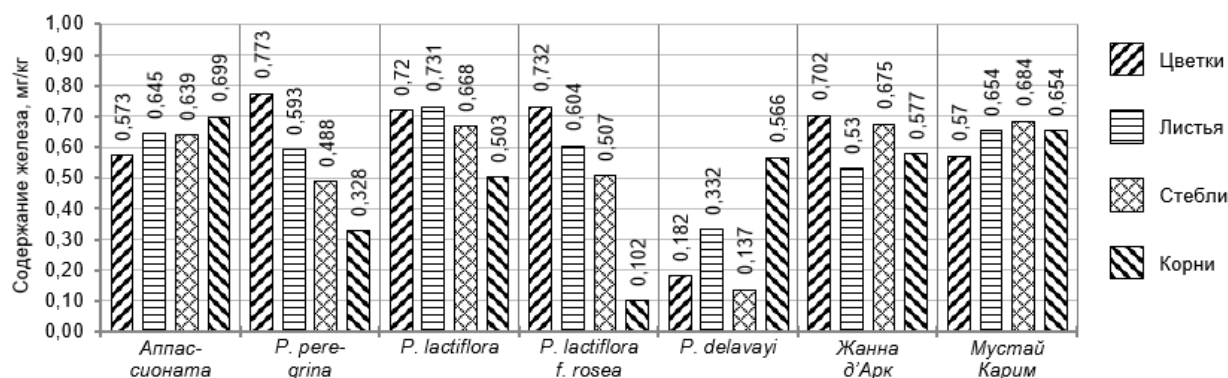


Рисунок 5 – Содержание железа в органах некоторых представителей рода *Paeonia* L.

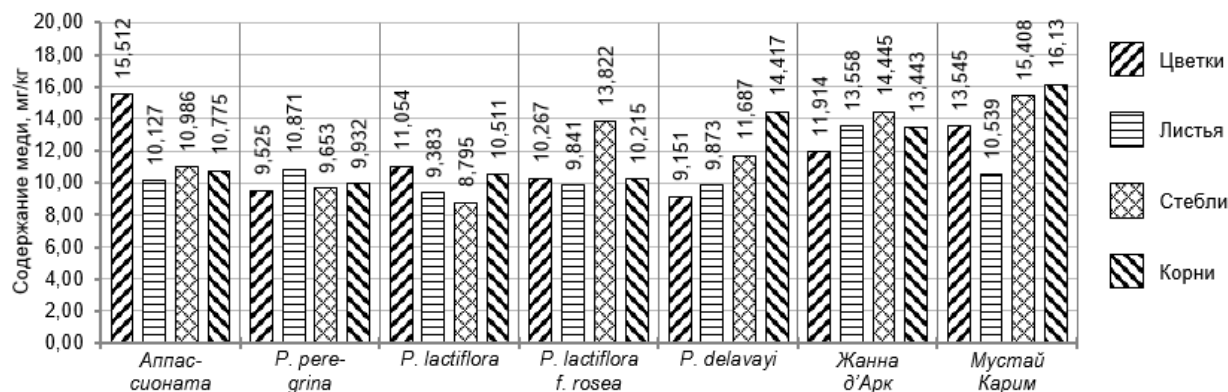


Рисунок 6 – Содержание меди в органах некоторых представителей рода *Paeonia* L.

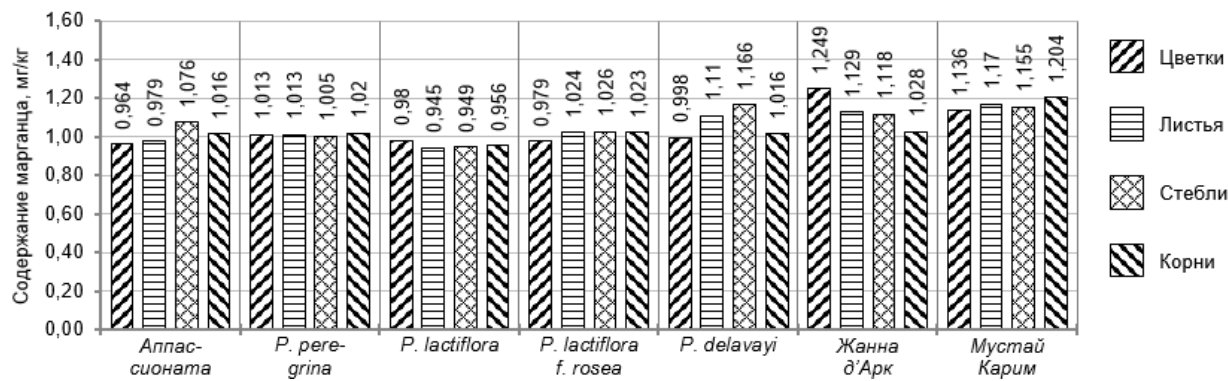


Рисунок 7 – Содержание марганца в органах некоторых представителей рода *Paeonia* L.

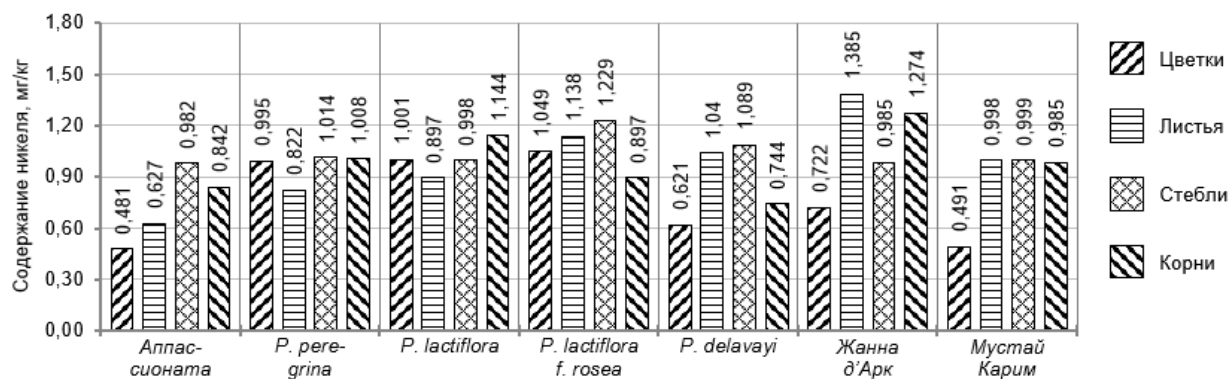


Рисунок 8 – Содержание никеля в органах некоторых представителей рода *Paeonia* L.

Результаты двухфакторного дисперсионного анализа показали значимые различия по содержанию тяжелых металлов по таксонам и частям растения. Выявлено, что основное влияние на содержание кадмия, хрома, марганца оказывают таксоны с долей влияния 56,45–70,83%; на долю второго фактора (часть растения) приходится 2,37–14,87%; вклад взаимодействия таксон – часть растения составил 17,11–29,23%. На содержание мышьяка, свинца, меди, никеля и железа основной вклад внесло взаимодействие таксон – часть растения (41,16–68,87%); на долю первого фактора приходится 14,43–44,19%, на долю второго – 9,19–33,22%.

В результате проведенного корреляционного анализа выявлены соотношения содержания изучаемых элементов друг с другом в разных частях растения. Показано, что количество свинца и кадмия в стеблях, кадмия в цветках находится в прямой зависимости от содержания мышьяка с корреляцией в диапазоне 0,62–0,74. Также выявлена обратная зависимость содержания хрома в листьях, свинца и марганца в цветках, марганца в корнях, хрома в стеблях от количества мышьяка с корреляцией в диапазоне – 0,49–0,83.

Заключение

Анализ содержания восьми элементов в разных образцах сырья некоторых представителей рода *Paeonia* позволил выявить, что минимальные концентрации мышьяка, кадмия, хрома, марганца и железа наблюдаются в корнях; свинца и никеля – в цветках; меди – в листьях изучаемых пионов. Максимальное содержание мышьяка, свинца, хрома обнаружено в листьях; кадмия, никеля, марганца – в стеблях; железа – в цветках. Показано, что все изучаемые растения имеют достаточно высокое содержание меди (в 4,15–2520,00 раз выше по сравнению с другими элементами) во всех видах сырья. Максимальное содержание отмечено в корнях, минимальное в листьях растений. Отмечена видо- и сортоспецифичность в содержании элементов в надземных и подземных частях растений.

Результаты корреляционного анализа показали, что абсолютные значения концентраций изучаемых элементов у рассматриваемых таксонов пионов коррелируют между собой в средней и сильной степени. Так, положительная сильная связь выявлена между количеством хрома и меди (0,78), никеля и железа (0,84) в цветках; мышьяком и свинцом (0,74), свинцом и кадмием (0,77) в стеблях; хромом и железом в корнях (0,80). Отрицательная сильная связь отмечена между железом и медью (–0,78) в листьях; мышьяком и хромом (–0,83) в стеблях.

Показано, что концентрация тяжелых металлов в органах некоторых представителей рода *Paeonia* L., интродуцированных в Южно-Уральский ботанический сад-институт УФИЦ РАН находится в пределах фоновых значений и укладывается в диапазон нормального функционирования растений.

Список литературы:

1. Гагиева Л.Ч., Кайтмазов Т.Б., Цугкиев Б.Г. Содержание металлов в эфиромасличных растениях, произрастающих на территории РСО-Алания // Известия Горского государственного аграрного университета. 2014. Т. 51, № 1. С. 213–218.

2. Мешкинова С.С., Ельчиногова О.А., Шаховцева Е.В. Микроэлементы в растениях Северного Алтая // Ползуновский вестник. 2006. № 2. С. 291–295.

3. Рождественская Т.А. Тяжелые металлы в почвах и растениях юго-западной части Алтайского края: дис. ... канд. биол. наук: 03.00.16, 03.00.27. Барнаул, 2003. 116 с.

4. Узаков З.З. Тяжелые металлы и их влияние на растения // Символ науки: Международный научный журнал. 2018. № 1–2. С. 52–54.

5. Методика количественного химического анализа. Определение As, Pb, Cd, Cr, Cu, Fe, Mn и Ni в пробах пищевых продуктов и пищевого сырья атомно-адсорбционным методом с электротермической атомизацией. № М-02-1009-08. Аттестовано ФГУП «ВНИИМ им. Д.И. Менделеева» свидетельство № 242/43-09 от 08.07.2009. СПб., 2009. 20 с.

6. Методические рекомендации по проведению полевых и лабораторных исследований почв и растений при контроле загрязнения окружающей среды металлами / Н.Г. Зырина, С.Г. Малахова. М.: Гидрометеоздат, 1981. 107 с.

7. Фотев Ю.В., Шевчук О.М., Сысо А.И. Изучение вариативности элементного состава семян сортообразцов *Vigna unguiculata* (L.) Walp. на юге Западной Сибири и в Крыму // Химия растительного сырья. 2021. № 2. С. 217–226. DOI: 10.14258/JCPRM.2021027543.

8. Реут А.А. Содержание биологически активных метаболитов в различном сырье некоторых видов и сортов пиона // Роль метабомики в совершенствовании биотехнологических средств производства: II междунар. науч. конф. Москва, 6–7 июня 2019 года. М.: Всероссийский научно-исследовательский институт лекарственных и ароматических растений, 2019. С. 201–206.

9. Реут А.А., Биглова А.Р., Аллаярлова И.Н. Сравнительный анализ химического состава растительного сырья некоторых представителей родов *Narcissus* L. и *Camassia* Lindl. // Аграрный вестник Урала. 2021. № 2 (205). С. 79–90. DOI: 10.32417/1997-4868-2021-205-02-79-90.

10. Симонова О.А., Симонов М.В., Товстик Е.В. Сортные особенности биоаккумуляции железа в растениях ячменя // Таврический вестник аграрной науки. 2020. № 3 (23). С. 142–150. DOI: 10.33952/2542-0720-2020-3-23-142-151.

11. Каманина И.З., Каплина С.П., Салихова Ф.С. Содержание тяжелых металлов в лекарственных растениях // Научное обозрение. 2019. № 1. С. 29–34.

12. Доспехов Б.А. Методика полевого опыта (с основами статистической обработки результатов исследований). М.: Агропромиздат, 1985. 351 с.

13. Гончар-Зайкин П.П., Чертов В.Г. Надстройка к Excel для статистической оценки и анализа результатов полевых и лабораторных опытов // Рациональное природопользование и сельскохозяйственное производство в южных регионах Российской Федерации. Рассвет, 13–14 мая 2003 г. Рассвет: Современные тетради, 2003. С. 559–565.

14. Чекин Г.В., Никифоров В.М. Развитие корневой системы яровой пшеницы на ранних стадиях онтогенеза при предпосевной обработке семян хелатными препаратами // Актуальные проблемы агротехнологий XXI века и концепции их устойчивого развития: мат-лы национал. заоч. науч.-практ. конф. / под общ. ред. Н.И. Бухтоярова, Н.М. Дерканосовой, В.А. Гулевского. Воронеж: Воронежский государственный аграрный университет им. Императора Петра I, 2016. С. 34–38.

15. Нестеров М.И., Кривохижина Л.В., Ермолаева Е.Н., Кантюков С.А. Влияние степени и срока кровопотери на уровень триглицеридов, фосфолипидов, общего хо-

лестерина, холестерина в липопротеинах [Электронный ресурс] // Современные проблемы науки и образования. 2016. № 6. <https://science-education.ru/ru/article/view?id=25632>.

16. Будко Е.В., Ямпольский Л.М., Жуков И.М., Черникова Д.А. Концентрационные корреляции элементной организации гемостатических растений // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2018. № 7. С. 95–100.

17. Захаров В.Г., Мишенькина О.Г. Адаптивные свойства новых сортов овса в условиях Средневолжского региона // Вестник Ульяновской государственной сельскохозяйственной академии. 2020. № 4 (52). С. 100–107. DOI: 10.18286/1816-4501-2020-4-100-107.

18. Кабата-Пендиас А., Пендиас Х. Микроэлементы в почвах и растениях. М.: Мир, 1989. 439 с.

19. Авцын А.П., Жаворонков А.А., Риш М.А., Строчкова Л.С. Микроэлементозы человека: этиология, классификация. М.: Медицина, 1991. 496 с.

20. Ковальский В.В. Геохимическая экология. М.: Наука, 1974. 299 с.

21. Рэнцэнбямбаа С. Фармакогностическая характеристика *Artemisia adamsii* Bess. и *Artemisia macrocephala* Jaque. ex Bess. флоры Бурятии и Монголии и разработка лекарственных средств на их основе: дис. ... канд. фарм. наук: 14.04.02. Улан-Удэ, 2020. 193 с.

22. Янтурин И.Ш., Аминова А.А. Аккумуляция железа, марганца и никеля в подземных и надземных органах *Inula helenium* L. в условиях Южного Урала // Фундаментальные исследования. 2013. № 6. С. 1456–1461.

23. Ильин В.Б. Тяжелые металлы в системе почва – растение. Новосибирск: Наука. Сиб. отделение, 1991. 151 с.

24. Школьник М.Я. Микроэлементы в жизни растений. Л.: Наука, 1974. 342 с.

25. Ильин В.Б., Юданова Л.А. Тяжелые металлы в почвах и растениях // Поведение ртути и других металлов в экосистемах. Ч. II. Процессы биоаккумуляции и эколоксикология. Новосибирск, 1989. С. 6–47.

Работа выполнена по Программе фундаментальных исследований Президиума РАН «Биоразнообразие природных систем и биологические ресурсы России» и в рамках государственного задания ЮУБСИ УФИЦ РАН по теме АААА-А18-118011990151-7.

Информация об авторе(-ах):	Information about the author(-s):
<p>Реут Антонина Анатольевна, кандидат биологических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории интродукции и селекции цветочных растений; Южно-Уральский ботанический сад-институт Уфимского федерального исследовательского центра РАН (г. Уфа, Российская Федерация). E-mail: cvetok.79@mail.ru.</p> <p>Денисова Светлана Галимулловна, кандидат биологических наук, старший научный сотрудник лаборатории интродукции и селекции цветочных растений; Южно-Уральский ботанический сад-институт Уфимского федерального исследовательского центра РАН (г. Уфа, Российская Федерация). E-mail: svetik-7808@mail.ru.</p>	<p>Reut Antonina Anatolyevna, candidate of biological sciences, leading researcher of Introduction and Selection of Floral Plants Laboratory; South-Ural Botanical Garden-Institute of the Ufa Federal Research Centre of Russian Academy of Sciences (Ufa, Russian Federation). E-mail: cvetok.79@mail.ru.</p> <p>Denisova Svetlana Galimullovna, candidate of biological sciences, senior researcher of Introduction and Selection of Floral Plants Laboratory; South-Ural Botanical Garden-Institute of the Ufa Federal Research Centre of Russian Academy of Sciences (Ufa, Russian Federation). E-mail: svetik-7808@mail.ru.</p>

Для цитирования:

Реут А.А., Денисова С.Г. Накопление тяжёлых металлов и металлоидов в органах некоторых представителей рода *Paeonia* L. в условиях техногенного загрязнения // Самарский научный вестник. 2021. Т. 10, № 4. С. 99–104. DOI: 10.17816/snv2021104115.