

Научная статья

УДК 581:502(470.343-25)

DOI: 10.32516/2303-9922.2023.46.9

Аккумуляция тяжелых металлов в почве и надземных вегетативных органах *Juniperus sabina* L. в условиях г. Йошкар-Олы

Екатерина Александровна Старикова¹, Ольга Леонидовна Воскресенская²,
Елена Александровна Алябышева³

¹⁻³ Марийский государственный университет, Йошкар-Ола, Россия

¹ katya-starikova@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4986-9693>

² voskres2006@rambler.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4710-6641>

³ e_alab@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8101-7941>

Аннотация. В статье представлены результаты исследований по содержанию и накоплению свинца, кадмия, меди, а также железа в почве и вегетативных органах (побеги и хвоя) можжевельника казацкого (*Juniperus sabina* L.), произрастающего в трех функциональных зонах г. Йошкар-Олы. В ходе работы было обнаружено, что почвенные образцы содержали неодинаковое количество тяжелых металлов (ТМ). Промышленная и селитебная зоны г. Йошкар-Олы характеризовались наибольшим уровнем загрязнения почв тяжелыми металлами. Такая же тенденция была отмечена и для вегетативных органов растений, произрастающих в данных зонах. По полученным результатам было выявлено, что в побегах можжевельника казацкого металлы накапливались следующим образом: Fe > Cu > Pb > Cd. Коэффициент биологического поглощения был выше у таких элементов, как свинец и медь. Наибольший показатель биогеохимической активности обнаружен в растениях *J. sabina*, произрастающих в рекреационной зоне, а наименьший — в промышленной зоне. В то же время жизнеспособность растений *J. sabina*, произрастающих в условиях повышенного содержания ТМ в почве, была хорошей.

Ключевые слова: урбоэкосистема, г. Йошкар-Ола, почвенный покров, загрязнение почвы, тяжелые металлы, металлоаккумуляция, биоиндикация, можжевельник казацкий, побеги, хвоя.

Для цитирования: Старикова Е. А., Воскресенская О. Л., Алябышева Е. А. Аккумуляция тяжелых металлов в почве и надземных вегетативных органах *Juniperus sabina* L. в условиях г. Йошкар-Олы // Вестник Оренбургского государственного педагогического университета. Электронный научный журнал. 2023. № 2 (46). С. 129—139. URL: http://vestospu.ru/archive/2023/articles/9_46_2023.pdf. DOI: 10.32516/2303-9922.2023.46.9.

Original article

Accumulation of heavy metals in the soil and aboveground vegetative organs of *Juniperus sabina* L. in the conditions of Yoshkar-Ola

Ekaterina A. Starikova¹, Olga L. Voskresenskaya², Elena A. Alyabysheva³

¹⁻³ Mari State University, Yoshkar-Ola, Russia

¹ katya-starikova@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4986-9693>

² voskres2006@rambler.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4710-6641>

³ e_alab@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8101-7941>

Abstract. The paper presents the results of studies on the content and accumulation of heavy metals: lead, cadmium, copper and iron in the soil and vegetative organs (shoots and needles) of the Savin juniper (*Juniperus sabina* L.), growing in three functional zones of the city of Yoshkar-Ola. It was found that soil samples contained unequal amounts of heavy metals. The industrial and residential areas of Yoshkar-Ola were characterized by the

© Старикова Е. А., Воскресенская О. Л., Алябышева Е. А., 2023

highest level of soil contamination with heavy metals. The same trend was noted for the vegetative organs of plants growing in these zones. According to the results obtained, it was revealed that metals accumulated in the shoots of the *J. sabina* were as follows: Fe > Cu > Pb > Cd. The biological absorption coefficient was higher for elements such as lead and copper. The highest indicator of biogeochemical activity was found in *J. sabina* plants growing in the recreational zone, and the lowest in the industrial zone. At the same time, the vitality of *J. sabina* plants growing under conditions of high heavy metals content in the soil was good.

Keywords: urban ecosystem, city of Yoshkar-Ola, soil cover, soil pollution, heavy metals, metal accumulation, bioindication, *Juniperus sabina* L., shoots, needles.

For citation: Starikova E. A., Voskresenskaya O. L., Alyabysheva E. A. Accumulation of heavy metals in the soil and aboveground vegetative organs of *Juniperus sabina* L. in the conditions of Yoshkar-Ola. *Vestnik of Orenburg State Pedagogical University. Electronic Scientific Journal*, 2023, no. 2 (46), pp. 129—139. DOI: <https://doi.org/10.32516/2303-9922.2023.46.9>.

Введение

Загрязнение окружающей среды тяжелыми металлами (ТМ) — одна из наиболее актуальных проблем на сегодняшний день. Основными источниками загрязнения окружающей среды ТМ являются выбросы промпредприятий, тепловые и атомные электростанции, транспорт, сбросы промышленных сточных вод [18; 19; 24].

Растения активно поглощают тяжелые металлы как аэральным, так и корневым путем. Они аккумулируют ТМ в тканях или на поверхности органов, поэтому растительные организмы являются промежуточным звеном в пищевой цепи, через которое они попадают из почвы, а частично из воды и воздуха в организм человека и животных [6; 15, с. 43; 25].

Скорость накопления ТМ у растений зависит от приуроченности их местообитаний к разным функциональным зонам города, которые характеризуются специфичностью техногенных нагрузок и экологических условий для растительности [9].

Для оценки состояния окружающей среды лучшими индикаторами являются растения из класса Pinopsida. Вегетативные органы хвойных растений (побеги, хвоя) удобны в качестве объекта исследования, так как подвергаются многолетнему техногенному воздействию [2; 23]. Хвойные интродуценты широко используются для озеленения г. Йошкар-Олы, к числу таких видов относится и можжевельник казацкий.

На территории Йошкар-Олы основными источниками загрязнения воздушной среды являются автотранспорт, топливно-энергетический комплекс, промышленность, коммунально-бытовое хозяйство. Основной вклад в загрязнение атмосферного воздуха в городе вносит автотранспорт [10].

Цель работы — изучить содержание тяжелых металлов в почве и в вегетативных органах можжевельника казацкого, произрастающего в условиях г. Йошкар-Олы.

Задачи исследования:

- 1) определить содержание тяжелых металлов (Pb, Cd, Cu, Fe) в почвах трех функциональных зон г. Йошкар-Олы;
- 2) изучить содержание Pb, Cd, Cu и Fe в вегетативных органах можжевельника казацкого на территории г. Йошкар-Олы;
- 3) рассчитать коэффициенты биологического поглощения металлов и биогеохимической активности вида.

Материалы и методы исследований

Исследования проводили на территории г. Йошкар-Олы в трех функциональных зонах: рекреационная зона — Центральный парк культуры и отдыха им. XXX-летия ВЛКСМ, селитебная зона — бул. Чавайна, промышленная зона — ул. Строителей.

Объекты исследования — почва (пробы отобраны в трех зонах города) и можжевельник казацкий (*Juniperus sabina* L.) — низкорослый, со стелющимися или приподнимающимися побегами кустарник высотой до 1,5—2 м [13; 22, с. 57].

Растительные образцы (побеги второго порядка и хвоя второго года жизни) и пробы почвы из корнеобитаемого слоя (0—20 см) отбирали одновременно в сентябре 2022 г., когда вегетативные органы накапливали максимальное количество загрязняющих веществ. Образцы высушивали до воздушно-сухого состояния ($t = 105\text{ }^{\circ}\text{C}$). В работе оценивали содержание ТМ в почве (валовые формы, мг/кг) и в наземных вегетативных органах *J. sabina* (общее содержание, мг/кг). Содержание ТМ (Pb, Cd, Cu, Fe) определяли на атомно-абсорбционном спектрометре AAnalyst 400 (PerkinElmer, USA). Рассчитывали коэффициент биологического поглощения (КБП), равный отношению содержания металла в золе растений к его содержанию в почве [1; 14; 16; 17; 20], а также коэффициент биогеохимической активности вида (БХА) как сумму коэффициентов биологического поглощения ТМ [1; 11]. Анализ проводили в трехкратной биологической повторности. Статистическую обработку данных проводили с использованием программ Microsoft Excel и Statistica 6.0.

Результаты исследования и их обсуждение

Содержание ТМ в почве. Почвенный покров является специфическим компонентом биосферы: накапливает различные загрязняющие вещества; выполняет роль природного буфера, т.е. контролирует переход химических элементов и соединений в пограничные сферы и живое вещество [6]. Главным отличием урбанизированных почв от природных считается наличие почвенного горизонта «урбик», который является поверхностным, насыпным, перемешанным горизонтом, частью культурного слоя с примесью отходов промышленности и строительно-бытового мусора. Верхняя часть этого горизонта более или менее прогумусирована в зависимости от функциональной принадлежности территории (промышленная, жилая, рекреационная зоны) и возраста. Специфические признаки «урбика»: высокое содержание карбонатов, тяжелых металлов, признаки засоления, повышенное уплотнение, низкая водоемкость и др. [7, с. 57].

В почвенном покрове г. Йошкар-Олы не было отмечено превышений гигиенических нормативов (ОДК) по содержанию валовых форм Pb, Cd, Cu (табл. 1).

Как видно из таблицы 1, содержание Pb в почве варьировало от 5,94 до 20,10 мг/кг. Cd был обнаружен в небольших количествах в почвах рекреационной (0,36 мг/кг) и селитебной (0,41 мг/кг) зон; в промышленной зоне содержание Cd было в 2,7—3,1 раза больше, чем в почвах других исследуемых зон. Содержание Cu в городской почве в рекреационной зоне составляло 5,63 мг/кг, в селитебной — 7,64 мг/кг, в промышленной зоне — 10,70 мг/кг. Концентрация Fe в почвах различных зон г. Йошкар-Олы изменялась от 245,80 мг/кг до 273,13 мг/кг.

Таблица 1

Содержание валовых форм ТМ в почвах г. Йошкар-Олы

Функциональная зона	Содержание ТМ, мг/кг			
	Pb	Cd	Cu	Fe
Рекреационная	5,94±0,05	0,36±0,002	5,63±0,05	245,80±1,29
Селитебная	7,91±0,14	0,41±0,01	7,64±0,07	269,30±0,30
Промышленная	20,10±0,96	1,11±0,02	10,70±0,25	273,13±0,56
ОДК ¹ , мг/кг / фоновые значения ² , мг/кг	65,0 / 26,0	1,0 / < 4,0	66,0 / 25,0	— / 5752,5

Примечание: 1 — СанПиН 1.2.3685-21. Раздел IV. Почва населенных мест и сельскохозяйственных угодий. М., 2021. 11 с.; 2 — Эколого-географический атлас Республики Марий Эл: <http://geo12.pf/atlas>.

Таким образом, в ходе проведенных исследований была выявлена следующая тенденция накопления Pb, Cd, Cu и Fe в почвенном покрове г. Йошкар-Олы: наибольшее со-

держание валовых форм ТМ было характерно для почв промышленной зоны города. По содержанию количества металлов в почвах г. Йошкар-Олы можно построить следующий убывающий ряд: Fe > Pb > Cu > Cd.

Содержание ТМ в надземных вегетативных органах. Можжевельник казацкий характеризуется неравномерностью произрастания на территории г. Йошкар-Олы. Растения, произрастающие в разных по уровню загрязнения зонах, отличались по размерам и окраске вегетативных органов.

В таблице 2 представлены результаты определения ТМ в побегах и хвое можжевельника казацкого.

Таблица 2

Содержание ТМ в вегетативных органах *Juniperus sabina* L.

Функциональная зона	Содержание ТМ, мг/кг							
	Pb		Cd		Cu		Fe	
	Побеги	Хвоя	Побеги	Хвоя	Побеги	Хвоя	Побеги	Хвоя
Рекреационная	4,69±0,07	2,93±0,06	0,220±0,002	<0,01	3,79±0,06	3,40±0,03	17,17±0,22	14,56±0,33
Селитебная	5,05±0,07	2,94±0,04	0,280±0,003	<0,01	4,46±0,07	4,55±0,06	25,09±0,17	20,10±0,33
Промышленная	5,50±0,07	3,78±0,03	0,460±0,005	<0,01	5,41±0,06	4,50±0,04	38,53±0,35	29,10±0,24

Как отмечают О. С. Залывская с соавторами [12], количество свинца, накапливающегося на листовом аппарате хвойных растений, зависит от его изрезанности, опушенности, наличия смоляных веществ, воска и т.д.

Так, наименьшие значения концентрации Pb характерны для побегов можжевельника казацкого рекреационной зоны (4,69 мг/кг), в промышленной зоне отмечалось повышение данного элемента в 1,2 раза ($p < 0,05$). Содержание Pb в хвое *J. sabina* изменялось от 2,93 мг/кг до 3,78 мг/кг и зависело от места произрастания. При техногенном загрязнении городской среды (промышленная зона) в 1,3 раза увеличилась концентрация Pb в хвое. Аккумуляция Pb в побегах можжевельника казацкого была в среднем в 1,6 раза выше, чем в хвое (табл. 2).

Содержание Cd в побегах можжевельника казацкого, произрастающего в разных зонах города, варьировалось от 0,22 до 0,46 мг/кг. В промышленной зоне концентрация элемента была выше в 2,0 раза по сравнению с рекреационной зоной ($p = 10^{-6}$). В образцах хвои кадмия содержалось ничтожно мало (менее 0,01 мг/кг).

Содержание Cu в побегах изменялось от 3,79 до 5,41 мг/кг. Так, у особей, произрастающих в рекреационной зоне, данный показатель был минимальным. У можжевельника казацкого промышленной зоны содержание данного элемента было на 29,6% больше. В рекреационной зоне в хвое можжевельника казацкого Cu содержалось 3,40 мг/кг, а в селитебной и промышленной частях города содержание Cu было в 1,3 раза больше ($p = 10^{-6}$). У можжевельника казацкого, произрастающего в селитебной зоне, концентрация меди как в побегах, так и в хвое составляла 4,50—4,55 мг/кг. В побегах особей, произрастающих в промышленной зоне, меди накапливалось на 16,8% больше, чем в хвое.

В побегах растений рекреационной зоны содержание железа равнялось 17,17 мг/кг (табл. 2), а в промышленной зоне Fe было в 2,2 раза больше ($p = 10^{-6}$). Проведенные исследования показали, что концентрация Fe в хвое растений, произрастающих на территории г. Йошкар-Олы, изменялась от 14,56 до 29,10 мг/кг. Наименьшее накопление этого элемента наблюдалось у особей, произрастающих в рекреационной зоне, что в 2 раза меньше, чем в промышленной зоне ($p = 0,000002$). В побегах *J. sabina* железа накапливалось в 1,2 раза больше, чем в хвое.

Суммарное содержание ТМ как в побегах, так и в хвое можжевельника казацкого в промышленной зоне города было максимальным, на втором месте были растения селитебной зоны, на третьем — рекреационной зоны (рис. 1). По содержанию ТМ в надземных вегетативных органах *J. sabina* можно построить следующий убывающий ряд: Fe > Cu > Pb > Cd.

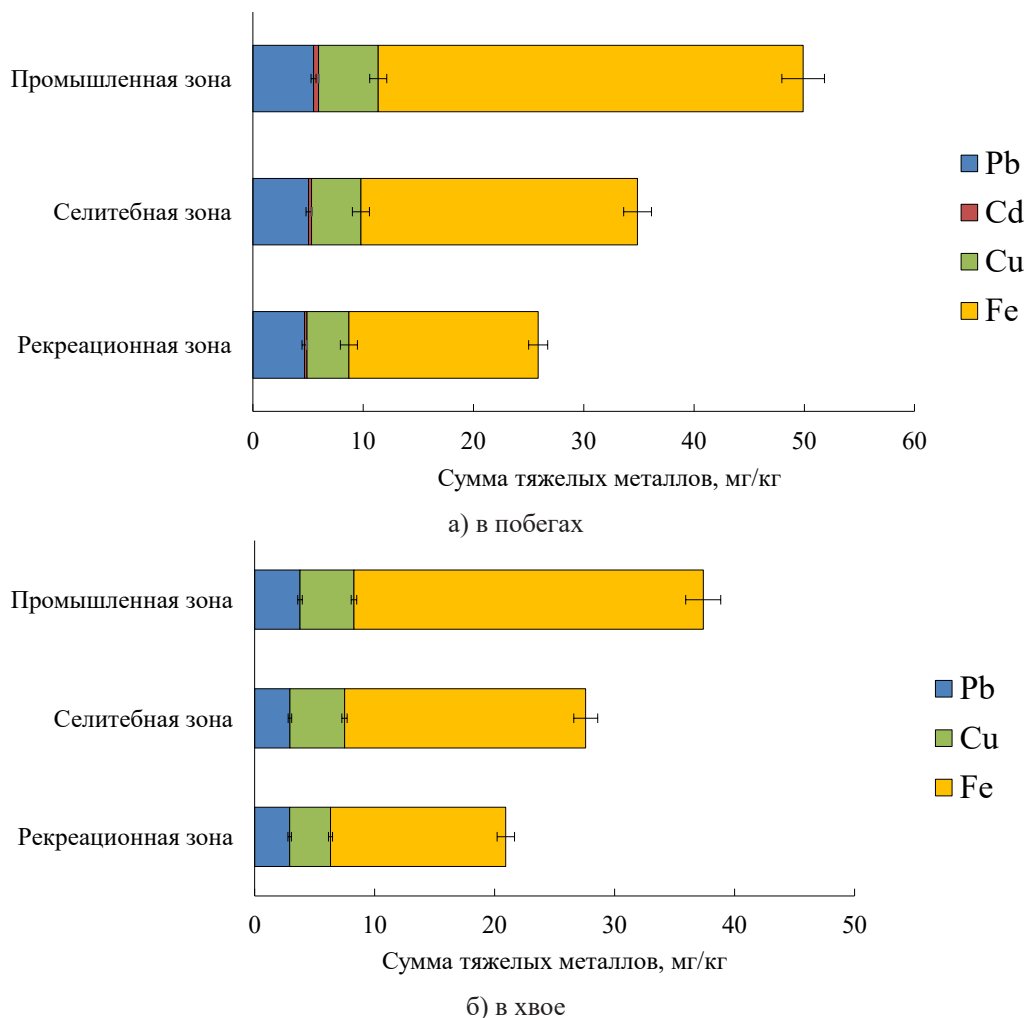


Рис. 1. Суммарное содержание тяжелых металлов в вегетативных органах можжевельника казацкого на территории г. Йошкар-Олы

Аккумуляция тяжелых металлов в растениях зависит от видовых особенностей, физико-химических свойств металла, от типа поступления в растения [1].

Для оценки степени влияния микроэлементного состава почвы на химический состав исследуемых особей провели корреляционный анализ зависимости концентрации ТМ в побегах, хвое от их содержания в почве. Так, обнаружили парные высокозначимые положительные корреляции между содержанием Cu ($r = 0,92$), Fe ($r = 0,87$), Cd ($r = 0,87$), Pb ($r = 0,84$) в побегах с их содержанием в почве. Также установлена корреляционная зависимость между накоплением ТМ в золе хвои и их валовой концентрацией в почве. Высокозначимая прямая связь была обнаружена между Fe ($r = 0,90$) в хвое и его содержанием в верхнем горизонте почв, существуют парные значимые положительные прямые связи для Pb ($r = 0,61$) и Cu ($r = 0,59$) и отрицательная связь для Cd ($r = -0,79$). Таким образом, можно предположить, что накопление данных ТМ в вегетативных органах можжевельника казацкого зависит от его содержания в почве.

Биопоглощение ТМ вегетативными органами. Для определения миграционной способности Pb, Cu, Cd и Fe в системе «почва — растение» был рассчитан коэффициент биологического поглощения (КБП). Он характеризует общую способность растений к биоаккумуляции элементов из почвы и атмосферы [1; 14; 16; 17; 20].

Расчеты КБП тяжелых металлов для *J. sabina* показали, что величина коэффициента была меньше 1,0, что свидетельствует о низкой интенсивности поглощения (табл. 3).

Таблица 3

Коэффициент биологического поглощения (КБП), биогеохимическая активность (БХА)
Juniperus sabina L., произрастающего на территории г. Йошкар-Олы

Функциональная зона	КБП								БХА	
	Pb		Cd		Cu		Fe			
	Побеги	Хвоя	Побеги	Хвоя	Побеги	Хвоя	Побеги	Хвоя	Побеги	Хвоя
Рекреационная	0,789	0,493	0,611	—	0,673	0,603	0,069	0,059	2,142	1,155
Селитебная	0,638	0,371	0,678	—	0,583	0,595	0,093	0,074	1,992	1,040
Промышленная	0,273	0,188	0,415	—	0,505	0,420	0,141	0,106	1,334	0,714

Значения коэффициента биологического поглощения свинца варьировали от 0,27 до 0,79 — побеги (табл. 3). Максимальные значения КБП свинца отмечались в побегах растений рекреационной зоны (0,79), минимальные — в промышленной зоне (0,27). КБП в хвое был меньше, чем в побегах, в 1,6 раза. Аналогичная тенденция наблюдалась по КБП свинца и в хвое. КБП уменьшался в ряду рекреационная зона → селитебная зона → промышленная зона.

КБП кадмия в побегах растений варьировал от 0,42 до 0,68. Наибольшим значением КБП кадмия характеризовались растения селитебной зоны (0,68).

Значения КБП меди варьировали в побегах от 0,51 до 0,67, а в хвое — от 0,42 до 0,60. Наименьшим поглощением меди характеризовались особи промышленной зоны, для которых КБП составлял 0,51 (побеги) и 0,42 (хвоя), соответственно.

Железо поглощалось можжевельником казацким в меньшей степени по сравнению с другими тяжелыми металлами, хотя содержание валовых форм в почвах было значительно выше, чем у других ТМ. Видимо, такая характеристика может указывать на хорошо развитые защитные механизмы корневой системы растений относительно железа. Наибольшими значениями КБП железа характеризовались растения, произрастающие в промышленной зоне: в побегах — 0,14, в хвое — 0,11.

По интенсивности поглощения в побегах можжевельника казацкого ТМ располагаются в следующий последовательный ряд: Cu > Pb > Fe > Cd, в хвое: Cu > Pb > Fe.

Исходя из анализа результатов КБП тяжелых металлов можжевельником казацким, можно сделать вывод, что с увеличением техногенной нагрузки снижалась интенсивность поглощения вегетативными органами можжевельника казацкого Pb, Cu, Cd из почвы, исключение составляло Fe.

Как отмечает Н. А. Бородина [2], с увеличением техногенной нагрузки уменьшается поглощение хвоей сосны обыкновенной (*Pinus silvestris* L.) тяжелых металлов из почвы в урбозкосистеме г. Благовещенска.

По данным Н. Н. Умарова с соавторами [21], можжевельник виргинский (*Juniperus virginiana* L.) больше всего поглощал свинец.

Для оценки способности вида к аккумуляции элементов определяли биогеохимическую активность вида (БХА). Данная величина позволяет установить основные различия в интенсивности вовлечения микроэлементов в биологический круговорот различными

видами фитоценоза, а также определить общую интенсивность биотехногенной аккумуляции в условиях конкретного ландшафта. Показатель БХА зависит в основном от формы нахождения элемента в почве и от физиологических характеристик вида [1; 4; 5; 11].

Суммарную интенсивность вовлечения элементов в биологический круговорот можжевельником казацким, произрастающим на территории г. Йошкар-Олы, определяли с помощью показателя биогеохимической активности вида.

Наибольшие значения БХА в побегах можжевельника казацкого были характерны для растений рекреационной зоны (2,14) — в 1,6 раза больше, чем в промышленной зоне (табл. 3).

Биогеохимическая активность в хвое *J. sabina* варьировала от 0,71 до 1,15 (табл. 3). Наибольший показатель биогеохимической активности обнаружен у особей, произрастающих в рекреационной зоне, наименьший — в промышленной зоне. Хотя почвенный покров промышленной зоны отличался наибольшим уровнем содержания ТМ, растения этой зоны оказались менее загрязненными, на что указывает минимальный показатель БХА. Возможно, на техногенно загрязненных территориях срабатывают биохимические и защитные механизмы, снижающие избыточное поступление ТМ в растения.

Ряды биологического поглощения металлов для можжевельника казацкого представлены в таблицах 4—5.

Таблица 4

Ряды биологического поглощения металлов в побегах *Juniperus sabina* L.

Функциональная зона	Группы элементов				
	Биологического накопления		Биологического захвата		
	Элементы энергичного накопления, КБП = 100—10	Элементы сильного накопления, КБП = 10—1,0	Элементы слабого накопления и среднего захвата, КБП = 1—0,1	Элементы слабого захвата, КБП = 0,1—0,01	Элементы очень слабого захвата, КБП = 0,01—0,001
Рекреационная	—	—	Pb (0,79), Cu (0,67), Cd (0,61)	Fe (0,069)	—
Селитебная	—	—	Cd (0,68), Pb (0,64), Cu (0,58)	Fe (0,093)	—
Промышленная	—	—	Cu (0,51), Cd (0,41), Pb (0,27), Fe (0,14)	—	—

В результате расчета КБП исследуемых металлов в побегах особей можжевельника казацкого, произрастающих на территории г. Йошкар-Олы, установили, что ТМ относятся к элементам слабого накопления и среднего захвата, а железо — к элементам слабого захвата.

Таблица 5

Ряды биологического поглощения металлов в хвое *Juniperus sabina* L.

Функциональная зона	Группы элементов				
	Биологического накопления		Биологического захвата		
	Элементы энергичного накопления, КБП = 100—10	Элементы сильного накопления, КБП = 10—1,0	Элементы слабого накопления и среднего захвата, КБП = 1—0,1	Элементы слабого захвата, КБП = 0,1—0,01	Элементы очень слабого захвата, КБП = 0,01—0,001
Рекреационная	—	—	Cu (0,60), Pb (0,49)	Fe (0,059)	—
Селитебная	—	—	Cu (0,59), Pb (0,37)	Fe (0,074)	—
Промышленная	—	—	Cu (0,42), Pb (0,19), Fe (0,11)	—	—

В ходе расчетов КБП Pb и Cu в хвое для можжевельника казацкого, произрастающего в исследуемых зонах, установлено, что они относятся к элементам слабого накопления и среднего захвата (КБП Pb составил от 0,19 до 0,49; КБП Cu — 0,42—0,60) (табл. 5). Железо относилось к элементам слабого захвата (рекреационная и селитебная зона) или к элементам слабого накопления и среднего захвата (промышленная зона).

Расчеты КБП свинца, кадмия, меди в хвое для растений рекреационной и селитебной зон показали, что данные элементы относились к элементам слабого накопления и среднего захвата. Железо относилось к группе слабого захвата (КБП = 0,059 — рекреационная зона, КБП = 0,093 — селитебная зона).

С. В. Гореловой с соавторами [8] при изучении биогеохимической активности ели колючей и можжевельника казацкого в зоне воздействия металлургических производств и автотранспорта было выявлено, что данные виды способны аккумулировать железо в хвое в 2 раза больше, чем в побегах.

Заключение

В почвах рекреационной и селитебной зон г. Йошкар-Олы содержание тяжелых металлов не превышало гигиенических нормативов и составляло: Pb — 0,09—0,12 ОДК, Cd — 0,36—0,41 ОДК, Cu — 0,09—0,12 ОДК; концентрация железа была в пределах фоновых значений.

В промышленной зоне города содержание тяжелых металлов было выше и составляло: Pb — 0,31 ОДК, Cd — 1,11 ОДК, Cu — 0,16 ОДК; концентрация железа была в пределах фоновых значений.

Содержание тяжелых металлов в вегетативных органах растений *J. sabina* в разных зонах г. Йошкар-Олы различалось. Так, растения, произрастающие в зоне промышленного загрязнения, характеризовались наибольшим содержанием тяжелых металлов как в побегах, так и в хвое.

Коэффициенты биологического поглощения тяжелых металлов были меньше 1,0 в надземных вегетативных органах растений во всех функциональных зонах, что свидетельствует о низкой интенсивности их поглощения. В вегетативные органы *J. sabina* интенсивнее поступали ионы меди и кадмия.

У особей, произрастающих при разном уровне промышленного загрязнения урбо-среды, интенсивность биотехногенной аккумуляции металлов отличалась. Максимальная биотехногенная аккумуляция была характерна для растений *J. sabina* в рекреационной зоне (побеги — БХА = 2,14; хвоя — БХА = 1,15). У особей промышленной зоны интенсивность биотехногенной аккумуляции металлов снижалась почти в 1,6 раза как в побегах, так и в хвое.

Таким образом, в результате проведенных нами исследований установлено, что интродуцированный вид — можжевельник казацкий — реагировал на изменение содержания тяжелых металлов в городских ландшафтах. При увеличении содержания ТМ в городских почвах у растений *J. sabina* интенсивность их поглощения снижалась.

Список источников

1. Авдощенко В. Г., Климова А. В. Содержание тяжелых металлов в растениях города Петропавловска-Камчатского (Камчатский край) в 2017—2018 гг. // Вестник Камчатского государственного технического университета. 2020. № 54. С. 48—64. DOI: 10.17217/2079-0333-2020-54-48-64.
2. Бородина Н. А. Аккумуляция тяжелых металлов хвоей сосны в урбоэкосистеме города Благовещенска // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2012. Т. 14, № 1 (8). С. 1958—1962.
3. Бородина Н. А. Поведение тяжелых металлов в системе «почва — растение» в условиях малопромышленного города Приамурья — Белогорска // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2013. Т. 15, № 3 (3). С. 966—969.

4. Бускунова Г. Г., Ягафарова Г. А. Биогеохимическая активность лекарственных растений в условиях техногенного загрязнения // Научный альманах. 2019. № 10-2 (60). С. 194—196.
5. Бускунова Г. Г., Ягафарова Г. А. Тяжелые металлы в системе «почва — дикорастущее лекарственное растение» (на примере *Cichorium intybus* L.) // Самарский научный вестник. 2022. Т. 11, № 1. С. 36—42. DOI: 10.55355/sn2022111103.
6. Воскресенская О. Л., Воскресенский В. С., Алябьшева Е. А. Накопление тяжелых металлов почвой и растениями в местах сбора и временного хранения твердых бытовых отходов // Современные проблемы науки и образования. 2013. № 2. URL: <https://science-education.ru/ru/article/view?id=8659> (дата обращения: 09.01.2023).
7. Воскресенский В. С., Воскресенская О. Л. Влияние факторов городской среды на функциональное состояние древесных растений. Йошкар-Ола : Мар. гос. ун-т, 2011. 194 с.
8. Горелова С. В., Фронтасьева М. В., Горбунов А. В., Ляпунов С. М., Мочалова Е. Г., Окина О. И. Биогеохимическая активность голоосеменных интродуцентов в условиях промышленно развитых урбанизированных экосистем // Вестник Балтийского федерального университета им. И. Канта. 2015. Вып. 1. С. 92—106.
9. Дегтярева Т. В., Титоренко В. А. Накопление элементов растениями в соответствии с ландшафтно-функциональной структурой города Ставрополя // Фундаментальные исследования. 2014. № 9 (3). С. 585—589.
10. Доклад об экологической ситуации в Республике Марий Эл за 2021 год. Ижевск : ООО «Принт», 2022. 188 с.
11. Енчилик П. Р., Асеева Е. Н., Семенков И. Н. Биологическое поглощение и биогеохимическая подвижность микроэлементов в лесных ландшафтах Центрально-лесного государственного природного биосферного заповедника // Проблемы региональной экологии. Биологические науки. 2018. № 4. С. 93—98. DOI: 10.24411/1728-323X-2018-14093.
12. Залывская О. С., Карбасникова Е. Б., Бабич Н. А. Аккумуляция свинца в урбаносистеме (на примере Архангельской агломерации) // Хвойные бореальной зоны. 2021. Т. 39, № 3. С. 191—196.
13. Казакова А. С., Брайшук Г. В. Применение стимуляторов роста при выращивании черенковых саженцев хвойных пород семейства кипарисовые (Cupressaceae) в условиях южной лесостепи Омской области // Омский научный вестник. 2012. № 2 (114). С. 155—158.
14. Латыпова В. З., Винокурова Р. И., Денисова О. Н. Особенности распределения микроэлементов в хвое ели обыкновенной в условиях придорожной зоны // Известия Оренбургского государственного аграрного университета. 2012. № 6 (38). С. 199—202.
15. Медведев И. Ф., Деревягин С. С. Тяжелые металлы в экосистемах. Саратов : Ракурс, 2017. 178 с.
16. Обущенко С. В., Гнеденко В. В. Мониторинг содержания микроэлементов и тяжелых металлов в почвах Самарской области // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2014. № 7. С. 30—34.
17. Опекунова М. Г. Биоиндикация загрязнений. СПб. : Изд-во С.-Петербур. ун-та, 2016. 300 с.
18. Петухов А. С., Кремлева Т. А., Хритохин Н. А., Петухова Г. А., Кайдунова П. И. Содержание тяжелых металлов (Cu, Zn, Fe, Mn, Pb, Cd) в почвах г. Тюмени // Вестник Нижневартовского государственного университета. 2020. № 1. С. 127—134. DOI: 10.36906/2311-4444/20-1/19.
19. Пугаев С. В., Лукаткин А. С. Взаимное влияние почвы и дендрофлоры на накопление тяжелых металлов (на примере Ботанического сада МГУ им. Н. П. Огарева). Хвойные растения // Агрохимия. 2014. № 7. С. 53—59.
20. Пугаев С. В., Лукаткин А. С. Накопление тяжелых металлов в почве и листовом аппарате растений дендрария Ботанического сада Мордовского государственного университета им. Н. П. Огарева // Агрохимия. 2015. № 5. С. 74—82.
21. Умаров Н. Н., Абдуманов А., Шукуров Т., Абдуллаев С. Ф. Влияние содержания тяжелых металлов на молекулярную динамику функциональных групп структуры хвойных деревьев // Экосистемы. 2021. Вып. 26. С. 78—83.
22. Хвойные породы в озеленении Центральной России / под общ. ред. М. П. Чернышова. М. : Колос, 2007. 328 с.
23. Cui N., Qu L., Wu G. Heavy metal accumulation characteristics and physiological response of *Sabina chinensis* and *Platycladus orientalis* to atmospheric pollution // Journal of Environmental Sciences. 2022. Vol. 112. P. 192—201. DOI: 10.1016/j.jes.2021.05.013.
24. Eltier L. A. A., Sivacioglu A. Determination of Heavy Metal Accumulation in Some Coniferous Species Used in Kastamonu Urban Afforestation // Asian Journal of Biological Sciences. 2021. Vol. 14, N 2. P. 33—40.
25. Sulaiman F. R., Hamzah H. A. Heavy metals accumulation in suburban roadside plants of a tropical area (Jengka, Malaysia) // Ecological Processes. 2018. Vol. 7. Art. 28. DOI: 10.1186/s13717-018-0139-3.

References

1. Avdoshchenko V. G., Klimova A. V. Soderzhanie tyazhelykh metallov v rasteniyakh goroda Petropavlovsk-Kamchatskogo (Kamchatskii kraï) v 2017—2018 gg. [Contents of heavy metals in the plants of Petropavlovsk-Kamchatsky (Kamchatka territory) in 2017—2018]. *Vestnik Kamchatskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta — Bulletin of Kamchatka State Technical University*, 2020, no. 54, pp. 48—64. DOI: 10.17217/2079-0333-2020-54-48-64. (In Russian)
2. Borodina N. A. Akkumulyatsiya tyazhelykh metallov khvoei sosny v urboekosisteme goroda Blagoveshchenska [Accumulation of heavy metals by pine needles in urban ecosystem of Blagoveshchensk city]. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiiskoi akademii nauk — Izvestia of Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*, 2012, vol. 14, no. 1 (8), pp. 1958—1962. (In Russian)
3. Borodina N. A. Povedenie tyazhelykh metallov v sisteme “pochva — rastenie” v usloviyakh malopromyshlennogo goroda Priamur’ya — Belogorska [Heavy metals in soil-plant system in the conditions of low-industrial city Belogorsk in the Amur area]. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiiskoi akademii nauk — Izvestia of Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*, 2013, vol. 15, no. 3 (3), pp. 966—969. (In Russian)
4. Buskunova G. G., Yagafarova G. A. Biogeokhimicheskaya aktivnost’ lekarstvennykh rastenii v usloviyakh tekhnogennoho zagryazneniya [Biogeochemical activity of medicinal plants in conditions of technogenic pollution]. *Nauchnyi al'manakh — Science Almanac*, 2019, no. 10-2 (60), pp. 194—196. (In Russian)
5. Buskunova G. G., Yagafarova G. A. Tyazhelye metally v sisteme “pochva — dikorastushchee lekarstvennoe rastenie” (na primere Cichorium intybus L.) [Heavy metals in the system “soil — wild medicinal plant” (on the example of Cichorium intybus L.)]. *Samarskii nauchnyi vestnik — Samara Journal of Science*, 2022, vol. 11, no. 1, pp. 36—42. DOI: 10.55355/snv2022111103. (In Russian)
6. Voskresenskaya O. L., Voskresenskii V. S., Alyabysheva E. A. Nakoplenie tyazhelykh metallov pochvoi i rasteniyami v mestakh sbora i vremennogo khraneniya tverdykh bytovykh otkhodov [Accumulation of heavy metals in soil and plants in locations gathering and temporary storage solid waste]. *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya — Modern Problems of Science and Education*, 2013, no. 2. Available at: <https://science-education.ru/ru/article/view?id=8659>. Accessed: 09.01.2023. (In Russian)
7. Voskresenskii V. S., Voskresenskaya O. L. Vliyaniye faktorov gorodskoi sredy na funktsional’noe sostoyaniye drevesnykh rastenii [Influence of urban environment factors on the functional state of woody plants]. *Yoshkar-Ola, Mar. gos. un-t Publ.*, 2011. 194 p. (In Russian)
8. Gorelova S. V., Frontas’eva M. V., Gorbunov A. V., Lyapunov S. M., Mochalova E. G., Okina O. I. Biogeokhimicheskaya aktivnost’ golosemennykh introdutsentov v usloviyakh promyshlenno razvitykh urbanizirovannykh ekosistem [The biogeochemical activity of exotic gymnosperm species in industrial urbanized ecosystems]. *Vestnik Baltiiskogo federal’nogo universiteta im. I. Kanta — IKBFU’s Vestnik. Natural and Medical Sciences*, 2015, is. 1, pp. 92—106. (In Russian)
9. Degtyareva T. V., Titorenko V. A. Nakoplenie elementov rasteniyami v sootvetstvii s landshaftno-funktsional’noi strukturoi goroda Stavropolya [Accumulation of elements by plants in accordance with the landscape-functional structure of the Stavropol city]. *Fundamental’nye issledovaniya — Fundamental Research*, 2014, no. 9 (3), pp. 585—589. (In Russian)
10. *Doklad ob ekologicheskoi situatsii v Respublike Marii El za 2021 god* [Report on the environmental situation in the Republic of Mari El for 2021]. Izhevsk, OOO “Print” Publ., 2022. 188 p. (In Russian)
11. Enchilik P. R., Aseeva E. N., Semenov I. N. Biologicheskoe pogloshchenie i biogeokhimicheskaya podvizhnost’ mikroelementov v lesnykh landshtakh Tsentral’no-lesnogo gosudarstvennogo prirodnogo biosfernogo zapovednika [Biological uptake and biogeochemical mobility of microelements in forest landscapes of the Central forest state biosphere nature reserve]. *Problemy regional’noi ekologii. Biologicheskii nauki*, 2018, no. 4, pp. 93—98. DOI: 10.24411/1728-323X-2018-14093. (In Russian)
12. Zalyvskaya O. S., Karbasnikova E. B., Babich N. A. Akkumulyatsiya svintsya v urbanosisteme (na primere Arkhangel’skoi aglomeratsii) [Accumulation of lead in the urban environment (for example of the Arkhangelsk agglomeration)]. *Khvoinye boreal’noi zony — Conifers of the Boreal Area*, 2021, vol. 39, no. 3, pp. 191—196. (In Russian)
13. Kazakova A. S., Braishchuk G. V. Primeneniye stimulyatorov rosta pri vyrashchivaniï cherenkovykh sazhentsev khvoinykh porod semeistva kiparisovye (Cupressaceae) v usloviyakh yuzhnoi lesostepi Omskoi oblasti [Application of stimulators of growth for conifer young plants of Cupressaceae under conditions of south forest-steppe of Omsk region]. *Omskii nauchnyi vestnik — Omsk Scientific Bulletin*, 2012, no. 2 (114), pp. 155—158. (In Russian)
14. Latypova V. Z., Vinokurova R. I., Denisova O. N. Osobennosti raspredeleniya mikroelementov v khvoe eli obyknovnoï v usloviyakh pridorozhnoi zony [Peculiarities of microelements distribution in the needles of

common spruce under the conditions of roadside zone]. *Izvestiya Orenburgskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*, 2012, no. 6 (38), pp. 199—202. (In Russian)

15. Medvedev I. F., Derevyagin S. S. *Tyazhelye metally v ekosistemakh* [Heavy metals in ecosystems]. Saratov, Rakurs Publ., 2017. 178 p. (In Russian)

16. Obushchenko S. V., Gnedenko V. V. Monitoring soderzhaniya mikroelementov i tyazhelykh metallov v pochvakh Samarskoi oblasti [Monitoring of micronutrient and heavy metal content in soil of Samara region]. *Mezhdunarodnyi zhurnal prikladnykh i fundamental'nykh issledovaniy*, 2014, no. 7, pp. 30—34. (In Russian)

17. Opekunova M. G. *Bioindikatsiya zagryaznenii* [Bioindication of contaminants]. St. Petersburg, S.-Peterb. un-t Publ., 2016. 300 p. (In Russian)

18. Petukhov A. S., Kremleva T. A., Khritokhin N. A., Petukhova G. A., Kaidunova P. I. Soderzhanie tyazhelykh metallov (Cu, Zn, Fe, Mn, Pb, Cd) v pochvakh g. Tyumeni [Heavy metal (Cu, Zn, Fe, Mn, Pb, Cd) concentration in soils of Tyumen]. *Vestnik Nizhnevartovskogo gosudarstvennogo universiteta — Bulletin of Nizhnevartovsk State University*, 2020, no. 1, pp. 127—134. DOI: 10.36906/2311-4444/20-1/19. (In Russian)

19. Pugaev S. V., Lukatkin A. S. Vzaimnoe vliyanie pochvy i dendroflory na nakoplenie tyazhelykh metallov (na primere Botanicheskogo sada MGU im. N. P. Ogareva). Khvoinye rasteniya [Mutual effect of soil and dendroflora on the accumulation of heavy metals by coniferous plants (with the Botanical garden of the Ogarev Mordovian State University as an example)]. *Agrokimiya*, 2014, no. 7, pp. 53—59. (In Russian)

20. Pugaev S. V., Lukatkin A. S. Nakoplenie tyazhelykh metallov v pochve i listovom apparate rastenii dendrariya Botanicheskogo sada Mordovskogo gosudarstvennogo universiteta im. N. P. Ogareva [The accumulation of heavy metals in soil and leaf apparatus of plants of the arboretum Botanical garden of the N. P. Ogarev Mordovian State University]. *Agrokimiya*, 2015, no. 5, pp. 74—82. (In Russian)

21. Umarov N. N., Abdumanonov A., Shukurov T., Abdullaev S. F. Vliyanie soderzhaniya tyazhelykh metallov na molekulyarnuyu dinamiku funktsional'nykh grupp struktury khvoinykh derev'ev [Influence of heavy metal content on molecular dynamics of functional groups of coniferous trees structure]. *Ekosistemy*, 2021, is. 26, pp. 78—83. (In Russian)

22. Chernyshov M. P. (ed.) *Khvoinye porody v ozelenenii Tsentral'noi Rossii* [Coniferous species in landscaping of Central Russia]. Moscow, Kolos Publ., 2007. 328 p. (In Russian)

23. Cui N., Qu L., Wu G. Heavy metal accumulation characteristics and physiological response of *Sabina chinensis* and *Platycladus orientalis* to atmospheric pollution. *Journal of Environmental Sciences*, 2022, vol. 112, pp. 192—201. DOI: 10.1016/j.jes.2021.05.013.

24. Eltner L. A. A., Sivacioglu A. Determination of Heavy Metal Accumulation in Some Coniferous Species Used in Kastamonu Urban Afforestation. *Asian Journal of Biological Sciences*, 2021, vol. 14, no. 2, pp. 33—40.

25. Sulaiman F. R., Hamzah H. A. Heavy metals accumulation in suburban roadside plants of a tropical area (Jengka, Malaysia). *Ecological Processes*, 2018, vol. 7, Art. 28. DOI: 10.1186/s13717-018-0139-3.

Информация об авторах

Е. А. Старикова — старший преподаватель

О. Л. Воскресенская — доктор биологических наук, профессор

Е. А. Алябышева — кандидат биологических наук, доцент

Information about the authors

E. A. Starikova — Senior lecturer

O. L. Voskresenskaya — Doctor of Biological Sciences, Professor

E. A. Alyabysheva — Candidate of Biological Sciences, Associate Professor

Статья поступила в редакцию 10.02.2023; одобрена после рецензирования 17.03.2023;
принята к публикации 20.05.2023

The article was submitted 10.02.2023; approved after reviewing 17.03.2023;
accepted for publication 20.05.2023