



УДК 574.24 DOI 10.21685/2500-0578-2023-4-4

АККУМУЛЯЦИЯ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ В СИСТЕМЕ «ПОЧВА – РАСТЕНИЕ» НА ТЕРРИТОРИИ г. ЙОШКАР-ОЛЫ

Е. А. Старикова¹, О. Л. Воскресенская², Е. А. Алябышева³

^{1, 2, 3} Марийский государственный университет, Йошкар-Ола, Россия

¹ katya-starikova@mail.ru

Аннотация. Загрязнение компонентов природной среды тяжелыми металлами в настоящее время является острой экологической проблемой, которая наиболее ярко проявляется в урбозэкосистемах. Для анализа выбрали хвойный вид, распространенный в озеленении улиц г. Йошкар-Олы – ель колючая (*Picea pungens* Engelm.). Цель работы – проанализировать содержание тяжелых металлов (Pb, Cd, Cu, Fe) в почве и вегетативных органах ели колючей, произрастающей в условиях г. Йошкар-Олы. В трех функциональных зонах г. Йошкар-Олы (Республика Марий Эл), различающихся по степени антропогенной нагрузки, было определено валовое содержание тяжелых металлов в почвенных пробах, в побегах второго порядка и в хвое второго года жизни ели колючей. Была проанализирована зольность вегетативных органов ели колючей. Рассчитывали коэффициенты биологического поглощения и биогеохимической активности ели колючей. Статистическую обработку полученных результатов проводили с использованием программ Microsoft Excel и Statistica 6. В почвах исследуемых функциональных зон не было превышений гигиенических нормативов по свинцу, меди и железу, но несколько выше было содержание кадмия (1,1 ОДК) в промышленной зоне. Зольность и содержание тяжелых металлов как в побегах, так и хвое у растений, произрастающих в промышленной зоне, была наибольшей. Коэффициент биологического поглощения Pb, Cd, Fe ели колючей во всех зонах г. Йошкар-Олы был меньше 1,0, что свидетельствует о низкой интенсивности их поглощения. Согласно рядам биологического поглощения, Pb и Cd в органах ели колючей относились к элементам слабого накопления и среднего захвата, а Fe – к элементам слабого накопления и среднего захвата, а также к элементам слабого захвата. Коэффициент биологического поглощения меди был выше 1,0, что указывает на то, что он относился к элементам сильного накопления. Биогеохимическая активность ели колючей была наибольшей в рекреационной зоне города.

Ключевые слова: *Picea pungens* Engelm., загрязнение почвы, урбозэкосистема, побеги, тяжелые металлы, хвоя

Для цитирования: Старикова Е. А., Воскресенская О. Л., Алябышева Е. А. Аккумуляция тяжелых металлов в системе «почва – растение» на территории г. Йошкар-Олы // Russian Journal of Ecosystem Ecology. 2023. Vol. 8 (4). <https://doi.org/10.21685/2500-0578-2023-4-4>

ACCUMULATION OF HEAVY METALS IN THE SOIL – PLANT SYSTEM IN THE CITY OF YOSHKAR-OLA

E.A. Starikova¹, O.L. Voskresenskaya², E.A. Alyabysheva³

^{1, 2, 3} Mari State University, Yoshkar-Ola, Russia

¹ katya-starikova@mail.ru

Abstract. Pollution of environmental components with heavy metals is currently an acute environmental problem, which is most clearly manifested in urban ecosystems. For analysis, a coniferous species, common in the landscaping of the streets of Yoshkar-Ola, was chosen – *Picea pungens* Engelm. The research goal is to analyze the content of heavy metals (Pb, Cd, Cu, Fe) in the soil and vegetative organs of the *P. pungens* growing in the conditions of Yoshkar-Ola. In three functional zones of the city of Yoshkar-Ola (the Republic of Mari El), which differ in the degree of anthropogenic load, the total content of heavy metals was determined in soil samples, in shoots of the second order and in needles of the second year of life of *P. pungens*. Also, the ash content of the vegetative organs of prickly spruce was analyzed. The biological absorption coefficients and biogeochemical activity coefficients were calculated for *P. pungens*. Statistical processing of the obtained results was carried out using Microsoft Excel and Statistica 6. In the soils of the studied functional zones, there were no excesses of hygienic standards for lead, copper and iron, but the content of cadmium was somewhat higher (1.1 APC) in the industrial zone. The ash content and heavy metals content both in shoots and needles of plants growing in the industrial zone were the highest.

The coefficient of biological absorption of Pb, Cd, Fe in *P. pungens* in all areas of Yoshkar-Ola was less than 1.0, which indicates a low intensity of their absorption. According to the series of biological absorption, Pb and Cd in the organs of *P. pungens* belonged to the elements of weak accumulation and medium capture, and Fe, to the elements of weak accumulation and medium capture, as well as to the elements of weak capture. The biological absorption coefficient of copper was above 1.0, indicating that it was a highly accumulative element. The biogeochemical activity of *P. pungens* was the highest in the recreational area of the city.

Keywords: *Picea pungens* Engelm., soil pollution, urban ecosystem, shoots, heavy metals, needles

For citation: Starikova E.A., Voskresenskaya O.L., Alyabysheva E.A. Accumulation of heavy metals in the soil – plant system in the city of Yoshkar-Ola. Russian Journal of Ecosystem Ecology. 2023;8(4). (In Russ.). Available from: <https://doi.org/10.21685/2500-0578-2023-4-4>

Введение

Содержание тяжелых металлов (ТМ) в растениях – это комплексный показатель, отражающий загрязнение почвы и приземного слоя атмосферы. Поглощение ТМ растениями происходит как корневым, так и аэральным путями. Главным способом их поступления в растения является адсорбция корнями. Почвенная среда – основной источник поступления тяжелых металлов в растения [1–3].

Наиболее токсичными для растений среди ТМ в высоких концентрациях являются свинец и кадмий [4].

Хвойные растения являются одними из распространённых видов индикаторов состояния окружающей среды. Они используются для

озеленения улиц г. Йошкар-Олы, к числу таких видов относится и ель колючая.

В г. Йошкар-Оле основными источниками загрязнения атмосферного воздуха являются автотранспорт, топливно-энергетический комплекс, промышленность и коммунально-бытовое хозяйство. Основной же вклад в загрязнение воздушного бассейна в городе вносит автотранспорт [5].

Материалы и методы

Районы исследования. Исследования проводились в трех функциональных зонах г. Йошкар-Олы (рис. 1): рекреационная зона – Центральный парк культуры и отдыха им. XXX-летия ВЛКСМ, селитебная зона – бульвар Чавайна, промышленная зона – ул. Строителей.

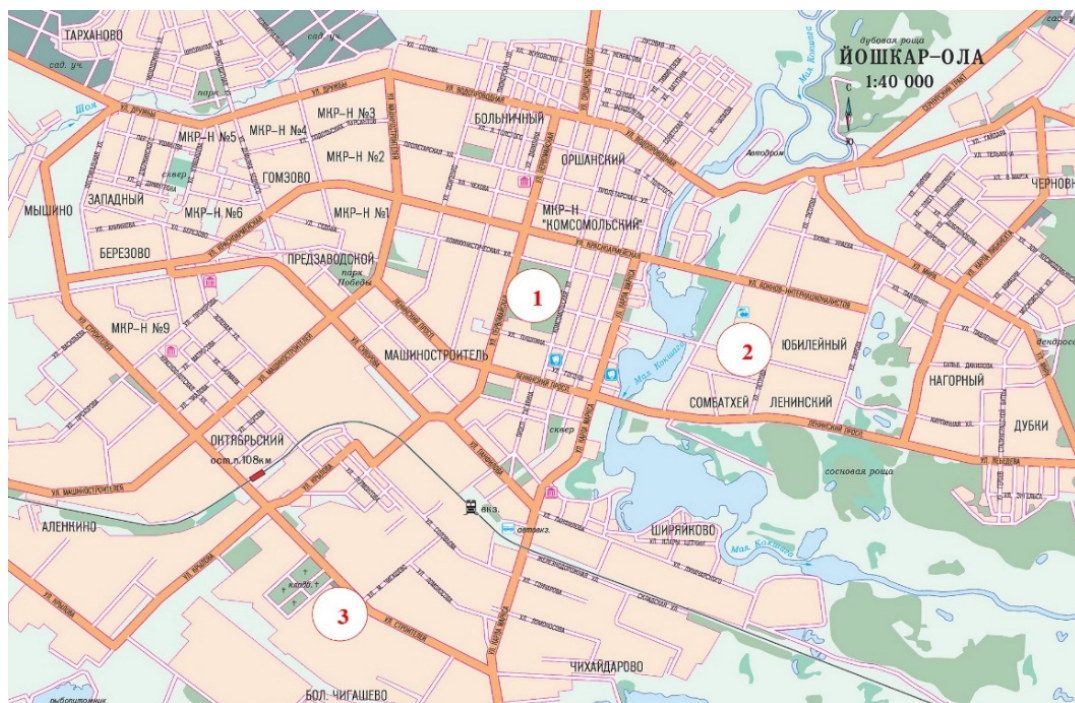


Рис. 1. Районы исследования:

- 1 – рекреационная зона – ЦПКиО им. XXX-летия ВЛКСМ;
2 – селитебная зона – бульвар Чавайна; 3 – промышленная зона – ул. Строителей

Fig. 1. Study areas:

- 1 – recreational zone – Central Culture and Leisure Park named after 30th anniversary of the Komsomol;
2 – residential zone – Chavain Boulevard; 3 – industrial zone – Stroitelei Street

Объектами исследования были средневозрастные генеративные особи ели колючей (*Picea pungens* Engelm.). Ель колючая – это дерево высотой до 30–45 м, интродуцированный вид из Северной Америки, с плотной, конусовидной кроной, кора шелушащаяся, коричнево-серая, молодые побеги толстые, оранжево-коричневые, голые или опушенные. Ветви образуют правильные плотные ярусы, горизонтальные либо свисающие под разным углом. Хвоя жесткая, грубая, колкая, в среднем длиной около 2–3 см, четырехгранная. Окраска хвои разная: зеленая, серебристая, сизо-голубая, реже – золотистая. Благодаря чему *P. pungens* ценится в озеленении, особенно формы с серебристой и голубой хвоей первого года. Продолжительность жизни хвои составляет 4–6 (9) лет [6–12].

Ель колючая обладает высокими ландшафтно-эстетическими достоинствами. Относительная неприхотливость в культуре, оригинальная окраска хвои и форма кроны делают ель колючую одной из самых декоративных елей из рода *Picea* A. Dietr.

Особенно декоративны следующие формы ели колючей: сизая (*f. glauca* Beissn.), зеленая (*f. viridis* Regel.), серебристо-голубая (*f. argentea* Beissn.) и Костера (*f. Kosteriana* Mast) [7]. И. И. Крючкова, З. Я. Нагимов [13] отмечают, что голубая и серебристая формы ели колючей эффектны на зеленом фоне лиственных видов.

Известно, что насаждения *P. pungens* отличаются достаточной устойчивостью и долговечностью. Из хвойных видов наиболее устойчивыми

против копоты и сухости воздуха считаются ель колючая (сизая и серебристая). К дыму и газу особенно устойчивы декоративные формы с сизой и голубой хвоей [7].

Методика исследований. Определение валового содержания тяжелых металлов (мг/кг) проводили атомно-абсорбционным методом на спектрометре «AAnalyst-400» (PerkinElmer, USA). Для анализа побеги второго порядка, хвою второго года жизни и пробы почвы из корнеобитаемого слоя (0–20 см) отбирали одновременно в сентябре 2022 г. Все образцы высушивали до воздушно-сухого состояния при $t = 105\text{ }^{\circ}\text{C}$ до постоянной массы и измельчали. Далее высушенный растительный материал предварительно озоляли в муфельной печи ($t = 450\text{ }^{\circ}\text{C}$) и определяли массу золы и рассчитывали зольность. Рассчитывали также коэффициент биологического поглощения (КБП), равный отношению содержания металла в золе растений к его содержанию в почве [14–16]. Корреляционный анализ данных проводили с использованием коэффициента корреляции Пирсона. Статистическая обработка данных проводилась с использованием программ Microsoft Excel и Statistica 6.

Результаты и их обсуждение

На рис. 2 показано валовое содержание тяжелых металлов (мг/кг) в почвах различных функциональных зон г. Йошкар-Олы.

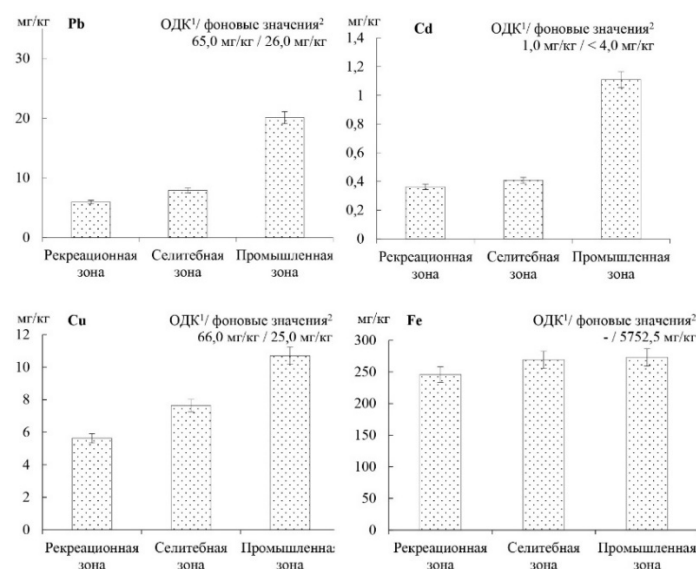


Рис. 2. Содержание тяжелых металлов в почвах г. Йошкар-Олы: 1 – СанПиН 1.2.3685-21 Раздел IV. Почва населенных мест и сельскохозяйственных угодий. М., 2021. 11 с.; 2 – Эколого-географический атлас Республики Марий Эл: <http://geo12.pf/atlas>

Fig. 2. Content of heavy metals in soils of Yoshkar-Ola: 1 – SanPiN 1.2.3685-21 Section IV. Soil of populated areas and agricultural land. М., 2021. P. 11; 2 – Ecological and geographical atlas of the Republic of Mari El: <http://geo12.pf/atlas>

Как видно из рис. 2, наименьшее валовое содержание свинца и кадмия было в почвенном покрове рекреационной зоны, 5,94 мг/кг и 0,36 мг/кг соответственно. Почва промышленной зоны характеризовалась наибольшим содержанием ТМ: концентрация свинца увеличилась в 3,4 раза ($p = 10^{-6}$), кадмия – в 3,1 раза ($p = 10^{-6}$) по сравнению с рекреационной зоной. Содержание кадмия незначительно превышало ОДК (ОДК Cd = 1,0 мг/кг). Концентрация меди в почвах исследуемых зон изменялась от 5,63 мг/кг до 10,70 мг/кг (рис. 2). Содержание данного металла в почвенном покрове жилой зоны было больше в 1,4 раза ($p = 10^{-6}$), а в промышленной зоне – в 1,9 раза ($p = 10^{-6}$), чем в рекреационной зоне. Содержание железа в почвах исследуемых функциональных зон равнялась 24 570–27 304 мг/кг и было в 1,1–1,2 раза выше содержания в почвах населенных пунктов [17].

Таким образом, в ходе проведенных исследований максимальное валовое содержание ТМ

было в почвенном покрове промышленной зоны г. Йошкар-Олы. Содержание ТМ в почвах г. Йошкар-Олы не превышало гигиенические нормативы (ОДК) по содержанию валовых форм свинца, меди, железа, кроме кадмия (1,1 ОДК).

Важным биогеохимическим показателем является зольность растений – соотношение минеральных и органических веществ в нем. Зольность листового аппарата растений различных видов определяется видовой принадлежностью, внутренними структурными особенностями и условиями окружающей среды (почвенные условия, гидротермический режим, техногенное загрязнение), подвержена сезонной динамике, что наиболее отчетливо прослеживается на начальном и завершающем этапах вегетационного периода [17–19].

Содержание золы в побегах *P. pungens* составляло 4,53–6,31 %, в хвое – 4,47–5,33 % (рис. 3).

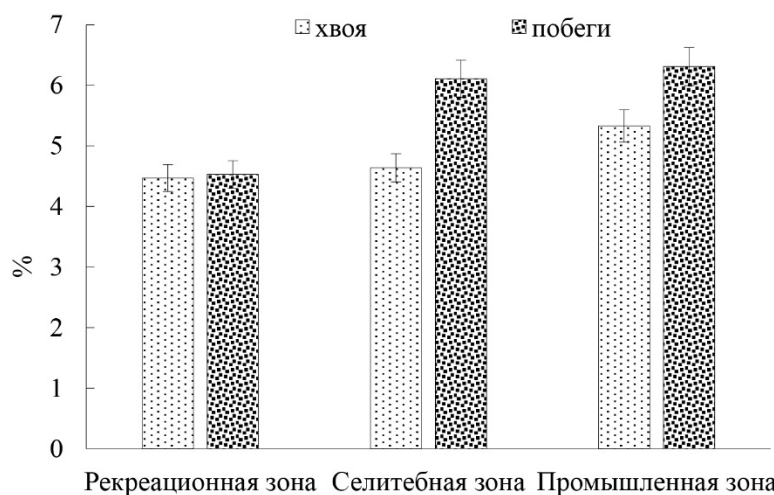


Рис. 3. Зольность вегетативных органов ели колючей, произрастающей в г. Йошкар-Оле

Fig. 3. Ash content of vegetative organs of blue spruce growing in Yoshkar-Ola

Несколько бо́льшая зольность была характерна для растений ели колючей, произрастающих в промышленной зоне. Так, содержание золы в побегах было в 1,4 раза больше, чем в побегах растений, произрастающих в рекреационной зоне. Зольность хвои была наименьшей, как и у побегов *P. pungens*, произрастающих в рекреационной зоне (4,47 %). По сравнению с рекреационной зоной зольность хвои у растений промышленной зоны была в 1,3 раза выше. По результатам наших исследований, содержание золы в побегах исследуемого вида было выше, чем в хвое во всех функциональных зонах.

В результате исследований, проведенных С. В. Соболевой, О. А. Есяковой, И. С. Почкутовым [20], содержание золы в хвое ели сибирской и сосны обыкновенной уменьшалось при удалении от промышленных к лесным районам.

М. Д. Уфимцева и Н. В. Терехина [21] указывают, что, чем больше зольность, тем лучше приспособлено растение к условиям произрастания.

В озеленении г. Йошкар-Олы ель колючая встречается в трех типах композиционного расположения растений – одиночные деревья, группы деревьев и рядовые посадки, высаженные в аллеи или по однорядной схеме. Наиболее часто встречаются рядовые посадки. Такое композиционное решение применяется как элемент сквера/парка, санитарно-защитная зона предприятий, примыкающее озеленение для защиты прилегающих жилых кварталов от негативного влияния транспорта [22].

В табл. 1 представлены результаты содержания тяжелых металлов в вегетативных органах ели колючей, произрастающей на территории г. Йошкар-Олы.

Таблица 1

Содержание ТМ в вегетативных органах ели колючей

Table 1

HM content in vegetative organs of blue spruce

Функциональная зона	Содержание ТМ, мг/кг							
	Pb		Cd		Cu		Fe	
	Побеги	Хвоя	Побеги	Хвоя	Побеги	Хвоя	Побеги	Хвоя
Рекреационная зона	2,48 ± 0,041	2,09 ± 0,057	0,13 ± 0,002	<0,01	6,17 ± 0,061	3,09 ± 0,038	27,23 ± 0,466	9,75 ± 0,348
Селитебная зона	2,52 ± 0,045	2,14 ± 0,058	0,15 ± 0,005	<0,01	7,71 ± 0,074	3,39 ± 0,063	41,67 ± 0,348	19,60 ± 0,517
Промышленная зона	3,82 ± 0,035	2,62 ± 0,059	0,18 ± 0,004	<0,01	8,61 ± 0,037	3,58 ± 0,056	60,00 ± 0,509	23,10 ± 0,562

Наименьшие значения содержания свинца были характерны для побегов *P. pungens* рекреационной зоны (2,48 мг/кг), в промышленной зоне отмечалось повышение концентрации металла в 1,5 раза ($p = 10^{-6}$). Содержание Pb в хвое *P. pungens* колебалось от 2,09 мг/кг до 2,62 мг/кг. При увеличении техногенного загрязнения городской среды (промышленная зона) в 1,3 раза увеличилось содержание Pb в хвое. Аккумуляция Pb в побегах ели колючей была в среднем в 1,3 раза выше, чем в хвое (табл. 1).

По мнению Н. С. Шиховой [23], высокая аккумуляция свинца хвойными видами в городских условиях объясняется рядом специфических свойств, присущих данной систематической группе растений: накопление загрязняющих веществ у хвойных происходит в течение нескольких лет, а не одного вегетационного сезона, как у листопадных видов, к тому же высокая ассимилирующая поверхность хвои, специфика биохимических и биофизических процессов у них способствует высокой сорбции элементов-загрязнителей на поверхности хвои с последующим вовлечением их в биологический круговорот.

Содержание Cd в побегах особей *P. pungens*, произрастающих в различных функциональных зонах города, изменялось от 0,13 до 0,18 мг/кг. В промышленной зоне концентрация кадмия увеличилась в 1,4 раза по сравнению с рекреационной зоной ($p = 10^{-6}$). В хвое кадмия содержалось ничтожно мало (менее 0,01 мг/кг).

Концентрация меди в побегах ели колючей была в пределах от 6,17 мг/кг до 8,61 мг/кг, а в хвое – от 3,09 мг/кг до 3,58 мг/кг (табл. 1). В хвое количество данного элемента было ниже в 2,3 раза.

Содержание железа варьировало в побегах от 27,23 мг/кг до 60,00 мг/кг, а в хвое – от 9,75 мг/кг до 23,10 мг/кг.

Содержание элементов в почвенном покрове является одним из факторов, определяющих

микроэлементный состав растений. Коэффициент линейной корреляции Пирсона показал наличие парных высоко значимых положительных корреляций ($p < 0,05$) между содержанием Pb ($r = 0,95$), Cd ($r = 0,82$), Cu ($r = 0,92$), Fe ($r = 0,88$) в побегах ели колючей с их концентрацией в почве. Была установлена также корреляционная зависимость между накоплением Pb ($r = 0,81$), Cu ($r = 0,73$) и Fe ($r = 0,95$) в хвое и его валовым содержанием в почве. Таким образом, накопление исследуемых ТМ в вегетативных органах ели колючей зависит от их содержания в почве.

Т. В. Зубкова и О. А. Дубровина [24] исследовали содержание меди, свинца, цинка и кадмия в хвое 1-го года жизни *P. pungens* и *T. occidentalis* в различных функциональных зонах г. Ельца. Так, максимальное накопление ТМ они обнаружили в хвое растений, произрастающих в зоне с высокой транспортной нагрузкой.

А. С. Кабанова с соавторами [25] провели сравнительный анализ накопления тяжелых металлов в хвое интродуцентов (ель черная, ель сибирская, ель колючая, ель Энгельмана, пихта сибирская, лиственница сибирская) в зеленой зоне г. Нур-Султан. В ходе исследования выяснили, что наименьшей способностью к поглощению тяжелых металлов обладает ель колючая.

Нами было проанализировано суммарное содержание тяжелых металлов в вегетативных органах ели колючей (рис. 4, 5).

Так, суммарное содержание свинца, кадмия, меди и железа в побегах растений *P. pungens*, произрастающих в рекреационной зоне (рис. 4), составило 36,0 мг/кг, в селитебной зоне – 52,0 мг/кг, в промышленной зоне – 72,6 мг/кг. В процентном соотношении можно построить следующий убывающий ряд по содержанию тяжелых металлов: Fe > Cu > Pb > Cd.

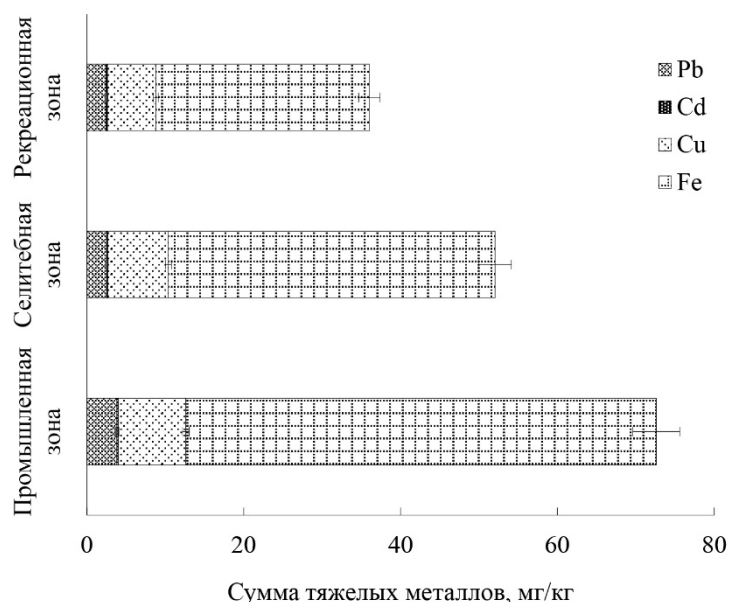


Рис. 4. Суммарное содержание тяжелых металлов в побегах ели колючей, произрастающей на территории г. Йошкар-Олы

Fig. 4. Total content of heavy metals in the shoots of blue spruce, growing in the territory of Yoshkar-Ola

В ходе анализа суммарного содержания ТМ в хвое *P. pungens*, произрастающих в исследуемых функциональных зонах г. Йошкар-Олы (рис. 5), выявили, что содержание исследуемых ТМ у растений рекреационной зоны составило

14,93 мг/кг, селитебной зоны – 25,13 мг/кг, промышленной зоны – 29,30 мг/кг, так же как и в побегах в процентном соотношении преобладало железо.

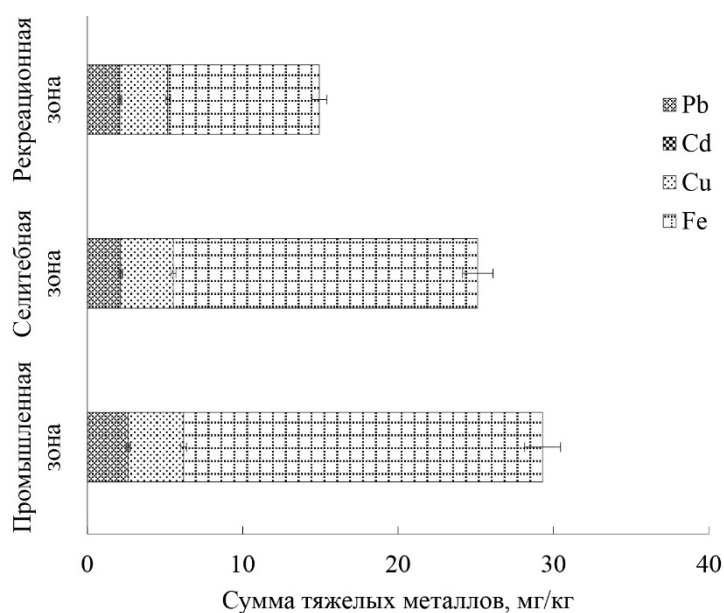


Рис. 5. Суммарное содержание тяжелых металлов в хвое ели колючей, произрастающей на территории г. Йошкар-Олы

Fig. 5. Total content of heavy metals in the needles of blue spruce, growing in the territory of Yoshkar-Ola

В ходе работы был рассчитан КБП, характеризующий общую способность растений к биоаккумуляции элементов из почвы и атмосферы фолларным путем [14–16].

Коэффициент биологического поглощения свинца в побегах изменялся от 0,19 до 0,41 (табл. 2).

Наибольшие значения КБП свинца отмечались в побегах растений рекреационной зоны, а наименьшие – в промышленной зоне. КБП в хвое был в 1,2 раза меньше, чем в побегах; КБП кадмия в побегах растений изменялся от 0,16 до 0,36. Наибольшим значением коэффициентом

биологического поглощения Cd характеризовались растения рекреационной и селитебной зон (0,36). КБП меди в побегах *P. pungens* в рекреационной и селитебной зонах был больше 1,0,

а коэффициент биологического поглощения Cu в хвое был меньше 1,0 во всех функциональных зонах. КБП железа среди исследуемых ТМ был минимальным как в побегах, так и в хвое.

Таблица 2

Коэффициент биологического поглощения *Picea pungens* Engelm.,
произрастающей на территории г. Йошкар-Олы

Table 2

Biological absorption coefficient of *Piceapungens*Engelm., growing in the territory of Yoshkar-Ola

Функциональная зона	Содержание ТМ, мг/кг							
	Pb		Cd		Cu		Fe	
	Побеги	Хвоя	Побеги	Хвоя	Побеги	Хвоя	Побеги	Хвоя
Рекреационная зона	0,41 ± 0,007	0,35 ± 0,010	0,36 ± 0,007	–	1,09 ± 0,059	0,52 ± 0,031	0,0011±0,002	0,0003±0,002
Селитебная зона	0,31 ± 0,006	0,27 ± 0,005	0,36 ± 0,014	–	1,01 ± 0,009	0,46 ± 0,023	0,0015±0,002	0,0007±0,002
Промышленная зона	0,19 ± 0,001	0,13 ± 0,002	0,16 ± 0,004	–	0,80 ± 0,003	0,33 ± 0,005	0,0021±0,001	0,0008±0,002

Коэффициенты биологического поглощения ТМ в органах ели колючей уменьшались в ряду: рекреационная зона → селитебная зона → промышленная зона. С увеличением техногенной нагрузки снижалась интенсивность поглощения вегетативными органами ели колючей исследуемых ТМ. Расчеты КБП ТМ для *P. pungens* показали, что величина коэффициента была меньше 1,0, что свидетельствует о низкой интенсивности их поглощения (табл. 2).

Согласно рядам биологического поглощения, разработанным А. И. Перельманом, свинец, кадмий, железо в побегах ели колючей относились к элементам слабого накопления и среднего

захвата, что свидетельствовало о низкой интенсивности поглощения этих ТМ. У хвойных растений, произрастающих в рекреационной и селитебной зонах, медь относилась к элементам сильного накопления. В хвое ели колючей свинец и медь относились к элементам слабого накопления и среднего захвата, а железо – к элементам слабого захвата.

Биогеохимическая активность вида (БХА) – это суммарная величина, получаемая при сумме КБП отдельных элементов [14, 26].

Расчет данного коэффициента выявил изменения биогеохимической активности вида в зависимости от уровня загрязнения урбаноcреды (рис. 6).

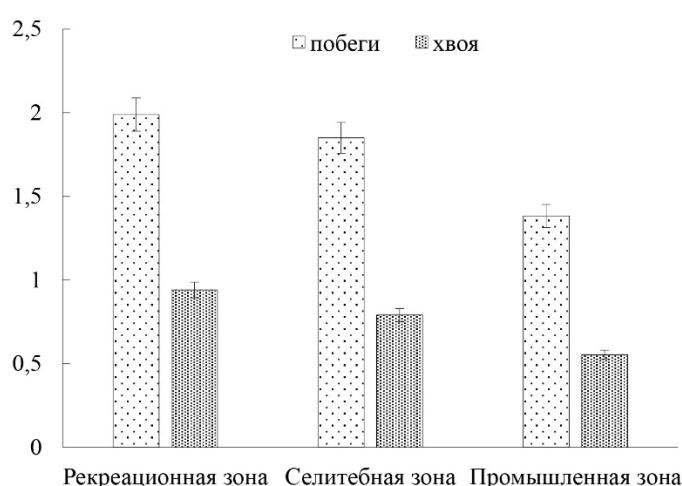


Рис. 6. Биогеохимическая активность ели колючей в условиях г. Йошкар-Олы

Fig. 6. Biogeochemical activity of blue spruce under the conditions of Yoshkar-Ola

Так, максимальные значения БХА были характерны для растений рекреационной зоны (в побегах – 1,98, в хвое – 0,94). Таким образом,

особи ели колючей, произрастающие в рекреационной зоне города активнее участвуют в поглощении ТМ. У особей, произрастающих

в промышленной зоне, данный показатель был ниже в побегах в 1,4 раза, а в хвое – в 1,7 раза. По-видимому, это связано с активацией биохимических защитных механизмов, приводящих к торможению избыточного поступления ТМ в растительные ткани.

Заключение

Таким образом, содержание тяжелых металлов в почвах рекреационной зоны г. Йошкар-Олы было наименьшим, наибольшее содержание валовых форм Pb, Cd, Cu и Fe было характерно для почвы промышленной зоны города.

Согласно полученным данным, наблюдалось увеличение в 1,3 раза содержания золы в вегетативных органах ели колючей, произрастающей в промышленной зоне, что означает увеличение вклада минеральных компонентов, в том числе ТМ.

Растения ели колючей, произрастающие в зоне промышленного загрязнения, характеризовались наибольшим содержанием свинца, кадмия, меди и железа как в побегах, так и в хвое.

В результате расчетов КБП ТМ выяснили, что значения КБП свинца, кадмия, железа были меньше 1,0 в вегетативных органах растений во всех функциональных зонах, что свидетельствовало о низкой интенсивности их поглощения.

Максимальные значения биогеохимическая активность *P. pungens* были характерны для растений рекреационной зоны, при возрастании антропогенного загрязнения городской среды биогеохимическая активность вида снижалась.

Таким образом, изучение содержания ТМ в почвенных и растительных образцах ели колючей можно отнести к одному из способов контроля экологической обстановки в городе.

Список литературы

1. Воскресенская О. Л., Воскресенский В. С., Алябышева 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).
2. Медведев И. Ф., Деревягин С. С. Тяжелые металлы в экосистемах. Саратов : Ракурс, 2017. 178 с.
3. Sulaiman F. R., Hamzah H. A. Heavy metals accumulation in suburban roadside plants of a tropical area (Jengka, Malaysia) // Ecological Processes. 2018. Vol. 7. P. 28. doi: 10.1186/s13717-018-0139-3
4. Kandziora-Ciupa M., Ciepał R., Nadgórska-Socha A., Barczyk G. Accumulation of heavy metals and antioxidant responses in *Pinus sylvestris* L. needles in polluted and non-polluted sites // Ecotoxicology (London, England). 2016. Vol. 25. P. 970–981. doi: 10.1007/s10646-016-1654-6
5. Доклад об экологической ситуации в Республике Марий Эл за 2021 год. Ижевск : Принт, 2022. 188 с.
6. Александрова М. С. Хвойные растения в вашем саду. М. : Фитон+, 2003. 224 с.
7. Чернышов М. П., Арефьев Ю. Ф., Титов Е. В. [и др.]. Хвойные породы в озеленении Центральной России / под общ. ред. проф. М. П. Чернышова. М. : Колос, 2007. 328 с.
8. Бухарина И. Л., Поварничина Т. М. Эколого-биологическая характеристика ели колючей (*Picea pungens* Engelm.) в условиях городской среды (на примере г. Ижевска) // Самарская Лука. 2008. Т. 17, № 3. С. 618–625.
9. Вернигора Е. Г. Морфологические реакции эпидермы хвойных пород на изменение климатических условий роста // Вестник КрасГАУ. 2008. Вып. 4. С. 122–130.
10. Лоскутов Р. И. Рост и развитие древесных растений-интродуцентов семейства *Pinaceae* Lindl. в дендрарии института леса им. В. Н. Сукачева СО РАН // Хвойные бореальной зоны. 2008. Т. XXV, № 1-2. С. 113–116.
11. Бирючев Ф. М. Особенности использования *Picea pungens* Engelm. и *Picea excelsa* (Lam.) Link в зеленом строительстве г. Евпатория // Бюллетень Государственного Никитского ботанического сада. 2012. Вып. 105. С. 28–32.
12. Титова М. С. Особенности фотосинтезирующей активности хвои интродуцированных видов *Picea* A. Dietr. в дендрарии горнотаежной станции // Фундаментальные исследования. 2013. № 11. С. 128–132.
13. Крючкова И. И., Нагимов З. Я. Особенности строения групп деревьев ели колючей в условиях г. Бугуруслан // Современные проблемы науки и образования. 2015. № 1-1. URL: <https://science-education.ru/ru/article/view?id=17307> (дата обращения: 30.12.2022).
14. 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
15. 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.
16. 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.

17. Алексеенко В. А., Алексеенко А. В. Химические элементы в геохимических системах. Кларк почв селитебных ландшафтов : монография. Ростов н/Д : Изд-во Южн. федер. ун-та, 2013. 388 с.
18. Подоль С. Р., Попова З. И. Распределение и динамика химических элементов в сосновых биогеоценозах Мещерского полесья // Российский медико-биологический вестник имени академика И. П. Павлова. 2015. № 2. С. 87–92.
19. Сибиркина А. Р., Лихачев С. Ф. Сравнение содержания соединений кобальта в органах и тканях древесных растений // Самарский научный вестник. 2017. Т. 6. № 2. С. 84–87.
20. Тюлькова Е. Г. Зольность растений в условиях городской среды (на примере города Гомеля) // Вестник Балтийского федерального университета им. И. Канта. Сер. : Естественные и медицинские науки. 2017. № 1. С. 58–65.
21. Соболева С. В., Есякова О. А., Почекутов И. С. Оценка загрязнения экосистемы города Красноярска биоиндикационным методом // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2019. № 12-2. С. 175–181.
22. Уфимцева М. Д., Терехина Н. В. Фитоиндикация экологического состояния урбогеосистем Санкт-Петербурга. СПб. : Наука, 2005. 339 с.
23. Авдеева Е. В., Извеков А. А. Исследование фенологического цикла ели сибирской и колючей в условиях сибирского города // Хвойные бореальной зоны. 2021. Т. XXXIX, № 2. С. 81–89.
24. Шихова Н. С. Некоторые закономерности в накоплении свинца растениями в условиях урбанизации (на примере г. Владивостока) // Сибирский экологический журнал. 2012. № 2. С. 285–294.
25. Зубкова Т. В., Дубровина О. А. Анализ содержания тяжелых металлов в однолетней хвое ели колючей (*Picea pungens*) и туи западной (*Thuja occidentalis*), произрастающих в разных функциональных зонах г. Ельца // АгроЭкоИнфо. 2020. № 3. URL: http://agroecoinfo.narod.ru/journal/STATYI/2020/3/st_316.pdf (дата обращения: 09.01.2023).
26. Кабанова С. А., Данченко М. А., Скотт С. А. [и др.]. Сравнительный анализ накопления тяжелых металлов в хвое интродуцентов в зеленой зоне г. Нур-Султан // Лесотехнический журнал. 2021. Т. 11, № 4. С. 57–67. doi: 10.34220/issn.2222-7962/2021.4/5
27. Самойленко Г. Ю., Бондаревич Е. А., Борискин И. А. Мониторинг загрязненности тяжелыми металлами почвенного покрова и растений (на примере *Potentilla tanacetifolia* Willd. Ex Schlecht.) природных экосистем в условиях урбанизированной территории г. Читы // Самарский научный вестник. 2018. Т. 7, № 1. С. 110–115.

References

1. Voskresenskaya O.L., Voskresenskiy V.S., Alyabysheva E.A. Accumulation of heavy metals by soil and plants in places of collection and temporary storage of solid household waste. *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya* = Current issues of science and education. 2013;(2). (In Russ.). Available at: <https://science-education.ru/ru/article/view?id=8659> (accessed 09.01.2023).
2. Medvedev I.F., Derevyagin S.S. *Tyazhelye metally v ekosistemakh* = Heavy metals in ecosystems. Saratov: Rakurs, 2017:178. (In Russ.)
3. Sulaiman F.R., Hamzah H.A. Heavy metals accumulation in suburban roadside plants of a tropical area (Jengka, Malaysia). *Ecological Processes*. 2018;7:28. doi: 10.1186/s13717-018-0139-3
4. Kandziora-Ciupa M., Ciepał R., Nadgórska-Socha A., Barczyk G. Accumulation of heavy metals and antioxidant responses in *Pinus sylvestris* L. needles in polluted and non-polluted sites. *Ecotoxicology (London, England)*. 2016;25:970–981. doi: 10.1007/s10646-016-1654-6
5. *Doklad ob ekologicheskoy situatsii v Respublike Mariy El za 2021 god* = Report on the environmental situation in the Republic of Mari El for 2021. Izhevsk: Print, 2022:188. (In Russ.)
6. Aleksandrova M.S. *Khvoynye rasteniya v vashem sadu* = Coniferous plants in your garden. Moscow: Fiton+, 2003:224. (In Russ.)
7. Chernyshov M.P., Arefev Yu.F., Titov E.V. et al. *Khvoynye porody v ozelenenii Tsentral'noy Rossii* = Coniferous species in landscaping in Central Russia. Moscow: Kolos, 2007:328. (In Russ.)
8. Bukharina I.L., Povarnitsina T.M. Ecological and biological characteristics of blue spruce (*Picea pungens* Engelm.) in an urban environment (using the example of Izhevsk). *Samarskaya Luka* = The Samara Bend. 2008;17(3):618–625. (In Russ.)
9. Vernigora E.G. Morphological reactions of the epidermis of conifers to changes in climatic growth conditions. *Vestnik KrasGAU* = Bulletin of Krasnoyarsk State Agrarian University. 2008;(4):122–130. (In Russ.)
10. Loskutov R.I. Growth and development of introduced woody plants of the family Pinaceae Lindl. to the arboretum of the Institute of Forest of the Siberian Division of the Russian Academy of Sciences. *Khvoynye boreal'noy zony* = Conifers of the boreal zone. 2008;XXV(1-2):113–116. (In Russ.)
11. Biryuchev F.M. Features of using *Picea pungens* Engelm. and *Picea excelsa* (Lam.) Link in green construction of the city of Evpatoria. *Byulleten' Gosudarstvennogo Nikitskogo botanicheskogo sada* = Bulletin of the State Nikitsky Botanical Garden. 2012;(105):28–32. (In Russ.)
12. Titova M.S. Features of photosynthetic activity of needles of introduced species *Picea* A. Dietr. to the arboretum of the mountain taiga station. *Fundamental'nye issledovaniya* = Fundamental research. 2013;(11):128–132. (In Russ.)

13. Kryuchkova I.I., Nagimov Z.Ya. Features of the structure of groups of spruce trees in the conditions of Buguruslan. *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya* = Current issues of science and education. 2015;(1-1). (In Russ.). Available at: <https://science-education.ru/ru/article/view?id=17307> (accessed 30.12.2022).
14. Avdoshchenko V.G., Klimova A.V. Content of heavy metals in plants of the city of Petropavlovsk-Kamchatsky (Kamchatka Territory) in 2017–2018. *Vestnik Kamchatskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* = Bulletin of Kamchatka State Technical University. 2020;(54):48–64. (In Russ.). doi: 10.17217/2079-0333-2020-54-48-64
15. Obushchenko S.V., Gnedenko V.V. Monitoring the content of microelements and heavy metals in soils of the Samara region. *Mezhdunarodnyy zhurnal prikladnykh i fundamental'nykh issledovaniy* = International journal of applied and fundamental research. 2014;(7):30–34. (In Russ.)
16. Pugaev S.V., Lukatkin A.S. Accumulation of heavy metals in the soil and leaf apparatus of plants of the arboretum of the Botanical Garden of Mordovia State University. *Agrokimiya* = Agrochemistry. 2015;(5):74–82. (In Russ.)
17. Alekseenko V. A., Alekseenko A. V. *Khimicheskie elementy v geokhimicheskikh sistemakh. Klark pochv selitebnykh landshaftov : monografiya* = Chemical elements in geochemical systems. Clark soils of residential landscapes : a monograph. Rostov-on-Don : Publishing House of the Southern Federal University, 2013:388. (In Russ.)
18. Podol' S.R., Popova Z.I. Distribution and dynamics of chemical elements in pine biogeocenoses of Meshchersky woodland. *Rossiyskiy mediko-biologicheskii vestnik imeni akademika I.P. Pavlova* = I.P. Pavlov Russian Medical Biological Herald. 2015;(2):87–92. (In Russ.)
19. Sibirskina A.R., Likhachev S.F. Comparison of the content of cobalt compounds in organs and tissues of woody plants. *Samarskiy nauchnyy vestnik* = Samara research bulletin. 2017;6(2):84–87. (In Russ.)
20. Tyul'kova E.G. Ash content of plants in an urban environment (using the example of the city of Gomel). *Vestnik Baltiyskogo federal'nogo universiteta im. I. Kanta. Ser.: Estestvennye i meditsinskie nauki* = Vestnik of Immanuel Kant Baltic Federal University. Series: Natural and Medical Sciences. 2017;(1):58–65. (In Russ.)
21. Soboleva S.V., Eryakova O.A., Pochekutov I.S. Assessment of pollution of the ecosystem of the city of Krasnoyarsk using the bioindication method. *Mezhdunarodnyy zhurnal prikladnykh i fundamental'nykh issledovaniy* = International journal of applied and fundamental research. 2019;(12-2):175–181. (In Russ.)
22. Ufimtseva M.D., Terekhina N.V. *Fitoindikatsiya ekologicheskogo sostoyaniya urbogeosistem Sankt-Peterburga* = Phytoindication of the ecological state of urban geosystems of St. Petersburg. Saint Petersburg: Nauka, 2005:339. (In Russ.)
23. Avdeeva E.V., Izvekov A.A. Study of the phenological cycle of Siberian and blue spruce in the conditions of a Siberian city. *Khvoynye boreal'noy zony* = Conifers of the boreal zone. 2021;XXXIX(2):81–89. (In Russ.)
24. Shikhova N.S. Some patterns in the accumulation of lead by plants under urban conditions (using the example of Vladivostok). *Sibirskiy ekologicheskii zhurnal* = Siberian journal of ecology. 2012;(2):285–294. (In Russ.)
25. Zubkova T.V., Dubrovina O.A. Analysis of the content of heavy metals in annual needles of blue spruce (*Picea pungens*) and *Thuja occidentalis*, growing in different functional zones of Elets. *AgroEkoInfo*. 2020;(3). (In Russ.). Available at: http://agroecoinfo.narod.ru/journal/STATYI/2020/3/st_316.pdf (accessed 09.01.2023).
26. Kabanova S.A., Danchenko M.A., Skott S.A. et al. Comparative analysis of the accumulation of heavy metals in the needles of introduced species in the green zone of Nur-Sultan. *Lesotekhnicheskii zhurnal* = Forestry journal. 2021;11(4):57–67. doi: 10.34220/issn.2222-7962/2021.4/5
27. Samoylenko G.Yu., Bondarevich E.A., Boriskina I.A. Monitoring of heavy metal contamination of soil cover and plants (on the example of *Potentilla tanacetifolia* Willd. Ex Schlecht.) of natural ecosystems in the urbanized territory of Chita. *Samarskiy nauchnyy vestnik* = Samara research bulletin. 2018;7(1):110–115. (In Russ.)