

УДК 504.05: 581.55

**П. В. Масленников, В. П. Дедков, М. В. Куркина
А. С. Ващейкин, И. О. Журавлев, Н. В. Бавтрук**

АККУМУЛЯЦИЯ МЕТАЛЛОВ В РАСТЕНИЯХ УРБООКОСИСТЕМ

57

Представлены результаты исследования накопления металлов (Cu, Zn, Mn, Sr, Ni, Ca, Fe, Br, Rb) в листьях древесных, кустарниковых и травянистых растений (22 вида) урбосреды Калининграда. Район исследования – основные геохимические ландшафты: селитебный, промышленно-коммунальный, рекреации и отдыха. Изучено фоновое содержание металлов в растениях. В листьях растений городской среды наблюдается превышение фоновых концентраций железа, марганца, цинка и стронция. Максимальное содержание поллютантов в растениях отмечалось в промышленных и селитебных многоэтажных зонах с повышенной транспортной нагрузкой. Выявлены видовые особенности аккумуляции металлов. Растения с высокой аккумулирующей способностью металлов могут быть полезны для фиторемедиации загрязненных городских территорий.

The paper presents the results of a study of metal accumulation (Cu, Zn, Mn, Sr, Ni, Ca, Fe, Br, Rb) in the leaves of trees, shrubs, and herbaceous plants (a total of 22 species) in the urban environment of Kaliningrad. The study area includes major geochemical landscapes – residential, industrial, and recreational districts. The background concentration of metals in plants is studied. The study establishes the presence of significant anthropogenic sources of metal pollution of vegetation in Kaliningrad. The leaves of plants found in the urban environment show excessive background concentrations of iron, manganese, zinc, and strontium. The maximum content of pollutants in plants is registered in industrial areas with high traffic load. Species-specific features of metal accumulation are established. Plants with a high metal accumulation capacity can be used in the phytoremediation of polluted urban areas.

Ключевые слова: загрязнение окружающей среды, тяжелые металлы, фитоиндикация, фитоурбозенозы, фиторемедиация.

Key words: environmental contamination, heavy metals, phytoindication, phytourbanecosis, phytoremediation.

Урбанизацию можно охарактеризовать как глобальный социально-экономический процесс, сопровождающийся глубоким антропогенным изменением природной среды, заменой естественных экосистем урбо-экосистемами. Наиболее сильно техногенное воздействие на природную среду и население проявляется в крупных промышленных городах, которые по интенсивности и площади аномалий загрязняющих веществ представляют собой техногенные и биогеохимические провинции [1 – 3].



В спектре загрязняющих веществ городской среды тяжелые металлы (ТМ) занимают значительное место, поскольку, не подвергаясь существенной физико-химической и биологической деградации, они накапливаются в поверхностном слое почв, в течение длительного времени остаются доступными для корневого поглощения растениями и активно включаются в процессы миграции по трофическим путям.

Поступая в растения, ТМ оказывают токсическое действие на многие биохимические и физиологические процессы: водный режим, минеральное питание, дыхание, фотосинтез, рост и другие [4]. Известно, что ТМ негативно влияют на фотосинтетические процессы не только за счет нарушения водного статуса и газообмена, но и путем инактивации ключевых ферментов метаболических путей и белков тилакоидных мембран, снижения содержания пигментов [5]. Отрицательное влияние ТМ на растения также опосредовано повреждающим действием активных форм кислорода, которые генерируются в этих условиях. В растениях в ответ на их действие формируются защитные механизмы двух типов: неспецифические и специализированные. К первым относят повышенный синтез антиоксидантных ферментов (супероксиддисмутазы, аскорбатпероксидазы, монодигидроаскорбатредуктазы, дигидроаскорбатредуктазы, глутатионредуктазы, каталазы, глутатионпероксидазы) и протекторных низкомолекулярных органических соединений (аскорбиновая кислота, глутатион, каротиноиды, низкомолекулярные фенолы) [6–9]. К специфическим механизмам адаптации к высоким концентрациям ТМ относятся синтез фитохелатинов и металлотионеинов, инактивирующих их избыток [5].

Во многих исследовательских работах показано, что между химическим составом растений и элементным составом среды существует определенная связь, но прямая зависимость содержания ТМ в растениях от их содержания в почве часто нарушается из-за избирательной способности растений к накоплению элементов в необходимом количестве [10]. По-видимому, существует генетический и экологический факторы формирования элементного состава растений. Их приоритетность меняется в зависимости от условий окружающей среды, при техногенном загрязнении экологический фактор становится ведущим [3; 10].

Вместе с тем, благодаря механизмам устойчивости, действующих на разных уровнях организации, некоторые виды растений способны расти и развиваться без серьезных нарушений физиологических процессов при довольно высоких концентрациях ТМ в окружающей среде [10; 11]. Поиск таких растений, способных накапливать поллютанты в наземных органах в высоких концентрациях, представляет особый интерес с точки зрения фиторемедиации. Виды, чувствительные по отношению к ТМ и способные наиболее объективно отражать степень загрязнения городской среды, имеют практическое значение для биоиндикации загрязнения ТМ, что также весьма актуально. Изучение биогеохимического перераспределения ТМ в важнейших компонентах урбоэкосистемы — растениях и почвах — позволяет получить ре-



альное представление об интенсивности процессов техногенеза и основных миграционных потоках этих токсикантов на урбанизированной территории.

Цель настоящей работы — изучить накопление металлов в доминирующих видах растений городской среды.

В работе исследовалось накопление металлов (Cu, Zn, Mn, Sr, Ni, Ca, Fe, Vg, Rb) в наиболее распространенных в городских ландшафтах видах древесных, кустарниковых и травянистых растений. Район исследования — основные геохимические ландшафты Калининграда (селитебный, промышленно-коммунальный, рекреации и отдыха). В качестве контрольных использовались ландшафты рекреации и отдыха (ЛРО), обладающие минимальной техногенной нагрузкой и природным фоновым уровнем поллютантов, удаленные на 40–50 км от крупных промышленных источников загрязнения окружающей среды (г. Светлогорск). Селитебная зона Калининграда (СЛ) занимает до 27 % от его площади (2833 га), и на ее территории формируются техногенные педогеохимические аномалии, контрастность которых зависит от высоты и расположения сооружений. Промышленно-коммунальные и транспортные территории (ПКитП) занимают 15 % городской площади (2430 га) [1].

Для биогеохимического апробирования применялись наиболее распространенные в городских ландшафтах виды древесных: береза повислая (*Betula pendula* Roth), тополь черный (*Populus nigra* L.), липа сердцевидная (*Tilia cordata* Mill.), клен остролистный (*Acer platanoides* L.) и травянистых растений: подорожник большой (*Plantago major* L.), ежа сборная (*Dactylis glomerata* L.), одуванчик лекарственный (*Taraxacum officinale* Wigg. s.l.), пижма обыкновенная (*Tanacetum vulgare* L.), клевер луговой (*Trifolium pratense* L.), тысячелистник обыкновенный (*Achillea millefolium* L.), клевер белый (*Trifolium repens* L.). Из кустарников: бирючина обыкновенная (*Ligustrum vulgare* L.), облепиха крушиновая (*Hippophae rhamnoides* L.), таволга Вангутта (*Spiraea vanhouttei* (Briot.) Zab.), сирень обыкновенная (*Syringa vulgaris* L.), чубушник вечнозеленый (*Philadelphus coronarius* L.), снежноягодник белый (*Symphoricarpos rivularis* Suksdorf.), барбарис обыкновенный (*Berberis vulgaris* L.), бузина черная (*Sambucus nigra* L.), смородина альпийская (*Ribes alpinum* L.), калина обыкновенная «Розеум» (*Viburnum opulus* 'Roseum'), роза морщинистая (*Rosa rugosa* Thunb.). Сбор растительного материала осуществлялся в течение вегетационного периода (июнь-июль) 2012 г.

Отбор проб проводился в сухую погоду в соответствии с общепринятыми методиками [1; 12]. Содержание металлов в пробах выявляли методом рентгенофлуоресцентного анализа на приборе «Спектроскан Макс – G» (ООО НПО «Спектрон», Россия). Образцы растений для анализа подготавливали в соответствии с методикой М049-П/10 [13]. Содержание металлов определялось в сухих, неозоленных пробах, измельченных с помощью дискового истирателя ЛДИ-60М до крупности частиц 71 мкм. Анализ проводился в трехкратной биологической по-



вторности. Полученные данные обработаны статистически с использованием пакета программ «MS Excel» и «StatSoft STATISTICA». Данные представлены на графиках и таблицах в виде средних арифметических значений и их стандартных ошибок. Статистическая значимость устанавливалась с помощью t-критерия Стьюдента ($p \leq 0,05$). Корреляционный анализ проводился с помощью критерия Пирсона.

Основной источник поступления ТМ в главные компоненты биогеоценоза города, почву и растения, — атмотехногенные выбросы, Калининград в этом отношении не исключение. Загрязнение атмосферного воздуха обусловлено выбросами более 200 промышленных предприятий, ТЭЦ, котельных. Существенный вклад в среднегодовой суммарный выброс в атмосферу загрязняющих веществ вносит автотранспорт, обладающий низкими эксплуатационно-техническими характеристиками. Его удельный вес — 83,8 % от общего объема, что превышает более чем в 6 раз выбросы от стационарных городских источников [14]. В целом уровень концентрации загрязняющих веществ на территории Калининградской области в большей мере формируется под воздействием трансграничного переноса: дополнительное количество загрязняющих веществ, превышающее ежегодные выбросы области в 5–7 раз поступает из Германии, Польши, Швеции других стран [15]. Преобладающие в зимний период юго-западные ветры способствуют распространению ореолов загрязнения ТМ со стороны Польши и Германии. В летний период существенное влияние оказывают ветры северного и северо-западного направлений, обуславливающие трансграничный перенос ТМ в Калининградскую область из Литвы [15; 16].

Почвенные геохимические аномалии часто не отражают всей картины загрязнения экосистемы. Ареалы повышенных концентраций ТМ, фиксируемые по растительности, могут выходить за пределы аналогичных ареалов, фиксируемых по почвенному покрову [1]. В связи с этим анализ содержания ТМ в растениях — необходимый элемент при комплексной оценке загрязненности городских экосистем.

Урбоэкосистемы Калининграда, которые мы использовали для биогеохимического мониторинга, представлены парками, насаждениями придомовых территорий, газонами, посадками вдоль дорог и др. Это в основном рукотворные системы (декоративные, культурные и полукультурные), все они подвержены антропогенному воздействию. Растительный состав городских экосистем отличается очень слабым разнообразием и представлен кустарниками, деревьями, которые традиционно применяются в озеленении города, газонными травами, сорными видами.

Анализ данных о содержании металлов в исследуемых растениях, произрастающих на фоновых и загрязненных участках, позволил выявить виды растений, аккумулирующих их в наибольших количествах. Максимальное содержание металлов в растениях наблюдалось на промышленно-коммунальных и транспортных территориях (ПКитЛ). Накопление ТМ в изучаемых растениях зависело от видовых особенностей, а также от специфичности элемента и его концентрации в почве.



Для марганца в большей степени характерно накопление в листьях древесных растений, чем кустарников или трав. Максимальное содержание металла наблюдалось в листьях березы повислой и клена остролистного (ПКИТЛ), концентрация Mn в этих растениях превышала фон в 27,5 и 32,7 раза соответственно (табл. 1). В листьях кустарников содержание Mn составило: у облепихи крушиновой — 46,7 мг/кг, сирени обыкновенной — 43,4 мг/кг, что превышало фоновую концентрацию металла в 2,7 и 3,6 раза соответственно. В листьях бузины черной содержание Mn также было высоким, но не изменялось по сравнению с фоном. В листьях смородины альпийской наблюдался высокий фоновый уровень Mn, но аккумуляция металла в растениях на загрязненном участке была значительно менее выражена. В травянистых растениях больше всего марганца накапливалось в листьях тысячелистника обыкновенного, содержание металла в них превышало фон в 2,7 раза.

Фоновое содержание железа в исследуемых растениях превышено в 1,4–5,9 раза (табл. 1). Среди древесных видов предельная концентрация Fe выявлена в листьях липы сердцевидной и березы повислой (545,1–647,5 мг/кг), у кустарников — в листьях чубушника вечнозеленого и розы морщинистой (542,1–702,4 мг/кг), у травянистых растений — в листьях клевера белого (740,6 мг/кг), ежи сборной (379,4 мг/кг), одуванчика лекарственного (290,8 мг/кг). В листьях клена остролистного, тополя черного, облепихи крушиновой, бузины черной, подорожника большого, тысячелистника обыкновенного и клевера лугового на загрязненном участке содержание железа по сравнению с фоном изменялось незначительно.

Среди видов, активно накапливающих цинк: сирень обыкновенная и роза морщинистая. Содержание металла в листьях *S. vulgaris* в условиях сильного загрязнения почвы поллютантами (ПКИТЛ) превышало фон в 3,9 раза, в листьях *R. rugosa* — в 4,9 раза (табл. 2). В листьях тысячелистника обыкновенного, смородины альпийской, пижмы обыкновенной, калины обыкновенной содержание Zn было выше фона в 1,9–2,9 раза. В листьях бирючины обыкновенной, клевера белого, березы повислой, барбариса обыкновенного, ежи сборной, облепихи крушиновой, одуванчика лекарственного, снежноягодника белого, чубушника вечнозеленого, клевера лугового, тополя черного концентрация металла превышала фон в 1,3–1,8 раза. В листьях липы сердцевидной, клена остролистного, таволги Вангутта, бузины черной и подорожника большого накопление цинка было незначительным.

Наибольшее содержание стронция выявлено в образцах клевера лугового (80,7 мг/кг), накопление металла в листьях *Tr. pratense* превысило фоновый уровень в 3,2 раза (табл. 2). В листьях древесных растений содержание Sr в среднем было выше фона в 1,3–1,9 раза, в листьях кустарников — в 1,3–2,2 раза. Среди травянистых растений стронций накапливали листья подорожника большого и тысячелистника обыкновенного, содержание металла было выше фона в среднем на 34,1–38,8%. Облепиха крушиновая, чубушник вечнозеленый, ежа сборная, пижма обыкновенная, одуванчик лекарственный, клевер белый не накапливали в листьях металл.

Содержание марганца и железа в листьях растений урбозокосистем Калининграда

Вид	Mn, мг/кг		Fe, мг/кг			
	ЛРО	СЛ	ЛРО	СЛ		
Древесные виды						
Береза повислая	13,2±1,2	186,7±19,1	363,6±38,4	173,7±18,2	312,6±30,5	545,1±55,4
Липа сердцевидная	76,4±7,6	164,9±16,8	207,2±20,8	184,3±17,9	427,8±43,3	647,5±63,9
Клен остролистный	43,3±4,4	809,7±81,2	1437,2±150,9	249,5±25,1	264,6±27,6	286,4±27,3
Тополь черный	24,6±2,5	56,8±6,3	102,6±10,3	141,2±13,7	139,2±14,2	137,8±14,5
Кустарники						
Бирючина обыкновенная	11,2±1,0	13,8±1,3	15,4±1,4	95,6±9,6	135,1±14,2	155,4±14,7
Облепиха крушиновая	17,3±1,6	38,6±3,7	46,7±4,5	134,3±13,5	129,7±13,5	132,2±13,4
Таволга Вангутта	12,4±1,2	19,7±1,9	24,8±2,5	110,7±11,3	163,8±17,2	253,8±24,2
Сирень обыкновенная	12,1±1,2	30,5±3,0	43,4±4,3	126,7±12,1	192,3±20,1	387,5±37,4
Чубушник вечнозеленый	19,2±1,8	23,4±2,5	28,6±2,7	225,4±21,8	347,9±35,6	542,1±55,2
Снежноягодник белый	15,6±1,4	24,7±2,3	29,7±2,8	84,3±8,2	125,5±13,7	167,5±15,9
Барбарис обыкновенный	12,1±1,1	18,5±1,7	23,2±2,2	95,2±9,1	143,6±14,2	197,8±19,3
Бузина черная	50,9±4,8	49,6±5,1	51,2±5,2	179,3±17,5	198,3±18,6	217,6±20,1
Смородина альпийская	29,4±2,8	49,8±4,8	63,1±6,2	163,6±16,7	215,4±20,9	330,9±34,4
Калина обыкновенная	17,1±1,6	22,3±2,3	26,7±2,7	181,2±19,3	206,1±20,3	255,7±23,9
Роза морщинистая	12,7±1,4	19,5±1,8	23,4±2,4	119,5±12,4	489,6±47,5	702,4±69,8
Травянистые растения						
Ежа сборная	54,6±5,4	79,5±8,1	86,2±8,5	139,4±14,6	269,7±27,3	379,4±38,5
Пижма обыкновенная	77,6±7,8	89,4±9,2	111,9±10,6	317,2±30,4	381,6±37,8	438,3±40,7
Подорожник большой	39,2±3,6	48,7±4,7	53,7±5,2	485,3±47,9	501,2±49,7	524,4±51,6
Одуванчик лекарственный	18,1±1,7	29,6±2,8	35,4±3,5	112,1±12,3	212,4±20,5	290,8±28,5
Тысячелистник обыкновенный	51,2±5,1	126,4±12,1	136,4±14,2	233,4±22,7	247,5±23,9	288,3±27,5
Клевер луговой	61,3±6,1	89,6±8,9	110,8±10,5	129,7±13,2	137,5±14,2	140,4±15,3
Клевер белый	34,4±3,3	49,8±5,1	55,8±5,6	187,4±17,5	300,5±29,7	740,6±73,2

Примечание. ЛРО – ландшафты рекреации и отдыха (фон); СЛ – селитебный ландшафт, ПКигЛ – промышленно-коммунальный и транспортный ландшафт.

Содержание цинка и стронция в листьях растений урбозкосистем Калининграда

Вид	Zn, мг/кг		Sr, мг/кг			
	ЛРО	СЛ	ПКиГЛ	ЛРО	СЛ	ПКиГЛ
Древесные виды						
Береза повислая	57,3±5,6	74,3±7,2	81,2±8,1	13,8±1,2	18,7±1,9	21,5±2,1
Липа сердцевидная	22,1±2,0	24,2±2,3	26,6±2,5	25,4±2,4	29,4±3,0	32,9±3,3
Клен остролистный	33,1±3,1	35,5±3,6	37,8±3,7	28,5±2,8	30,2±2,9	33,2±3,4
Тополь черный	83,2±8,2	122,9±13,1	148,6±14,3	26,8±2,7	34,5±3,5	49,6±5,0
Кустарники						
Бирючина обыкновенная	20,2±2,1	23,7±2,2	26,8±2,5	18,8±1,9	22,7±2,3	26,8±2,6
Облепиха крупнолиная	14,1±1,4	18,6±1,9	21,6±2,1	14,3±1,4	14,8±1,5	13,2±1,3
Таволга Вангутта	18,5±1,9	20,3±1,8	19,8±1,8	18,4±1,8	19,7±2,0	23,9±2,4
Сирень обыкновенная	24,2±2,3	59,4±6,1	94,5±9,3	17,5±1,7	21,9±2,2	28,2±2,8
Чубушник вечнозеленый	19,7±1,8	24,7±2,5	30,9±2,9	36,7±3,6	39,6±4,0	41,5±3,9
Снежноягодник белый	24,6±2,5	31,8±3,1	37,8±3,8	25,5±2,5	29,6±2,8	31,8±3,1
Барбарис обыкновенный	17,1±1,7	20,5±1,9	24,6±2,4	17,1±1,7	23,4±2,2	27,9±2,7
Бузина черная	30,2±3,1	34,2±3,3	32,4±3,3	23,8±2,3	26,7±2,7	31,4±3,1
Смородина альпийская	19,6±1,9	27,3±2,8	38,5±3,8	23,8±2,3	31,2±2,9	47,5±4,6
Калина обыкновенная	24,4±2,4	48,2±4,8	69,7±6,8	25,9±2,6	34,6±3,3	54,9±5,5
Роза морщинистая	17,3±1,8	46,7±4,8	85,4±8,6	22,4±2,2	31,2±3,2	48,2±4,8
Травянистые растения						
Ежа сборная	20,3±2,1	23,2±2,4	29,8±2,8	17,7±1,8	18,1±1,9	19,7±2,0
Пижма обыкновенная	27,2±2,7	42,4±4,1	57,6±5,7	23,1±2,2	24,7±2,3	26,4±2,6
Полорожник большой	34,5±3,5	36,3±3,5	33,4±3,2	44,4±4,5	49,6±4,8	59,7±5,8
Одуванчик лекарственный	23,1±2,3	30,2±3,1	34,7±3,4	20,1±2,1	19,7±2,0	18,2±1,9
Тысячелистник обыкновенный	25,4±2,5	41±4,1	49,3±4,9	20,6±1,9	22,6±2,3	28,6±2,8
Клевер луговой	38,6±3,8	58,1±5,7	62,4±6,2	25,1±2,5	38,4±3,9	80,7±8,1
Клевер белый	28,0±2,7	34,7±3,4	38,2±3,8	24,6±2,4	26,7±2,5	25,8±2,6

Примечание. ЛРО – ландшафты рекреации и отдыха (фон); СЛ – селитебный ландшафт, ПКиГЛ – промышленно-коммунальный и транспортный ландшафт.



Рубидий содержался в растениях фонового участка в количествах от 2,9 до 20,1 мг/кг. В листьях древесных растений содержание металла в среднем составило 4,6–5,9 мг/кг, в листьях кустарников – 2,9–8,3 мг/кг. В травянистых растениях Rb выявлен в значительно больших количествах – 7,3–20,1 мг/кг. На загрязненных участках наибольшая активность в накоплении рубидия выявлена у снежноягодника белого и таволги Вангутта, содержание металла в листьях этих кустарников превышало фон в 4,4 и 3,7 раза соответственно. В листьях клена остролистного, розы морщинистой, чубушника венечного, калины обыкновенной, ежи сборной, бузины черной, облепихи крушиновой, липы сердцевидной, одуванчика лекарственного, клевера белого и барбариса обыкновенного содержание Rb было на 35,2–81,4 % выше фонового. В листьях березы повислой, тополя черного, бирючины обыкновенной, сирени обыкновенной, смородины альпийской, пижмы обыкновенной, подорожника большого, тысячелистника обыкновенного, клевера лугового уровень металла не изменялся.

Фоновая концентрация брома изменялась от 0,4 до 7,9 мг/кг. Максимальное естественное накопление металла выявлено в листьях травянистых растений тысячелистника обыкновенного (11,5 мг/кг), пижмы обыкновенной (3,6 мг/кг) и клевера белого (3,6 мг/кг). В листьях чубушника венечного, снежноягодника белого, барбариса обыкновенного содержание Br было ниже НПКО. На загрязненных участках бром активно накапливался в листьях бузины черной, пижмы обыкновенной и ежи сборной: содержание металла в этих растениях было выше фонового в среднем в 11,5–13,5 раза. В листьях других видов растений коэффициент концентрации достигал 1,5–4,4. Исключение составили: береза повислая, чубушник венечный, снежноягодник белый, барбарис обыкновенный, роза морщинистая – в листьях этих видов накопление брома не наблюдалось.

Такие металлы, как никель и медь, в листьях растений города накапливались незначительно. Содержание Ni в растениях варьировало от 1 до 4 мг/кг и по сравнению с фоном не имело достоверных различий. Накопление меди наблюдалось преимущественно травянистыми растениями (1–11 мг/кг), в листьях кустарников и деревьев содержание Cu – ниже предела количественного определения. Содержание Ca в исследуемых растениях составило 0,01–0,04 %.

В исследуемых растениях (ПКиТЛ) было изучено валовое содержание ТМ и показан вклад каждого элемента в их совокупном накоплении у растений. Наибольший вклад в суммарное содержание металлов внесли шесть элементов: Mn, Fe, Zn, Sr, Br, Rb. Их сумма в листьях растениях составила 221,7–1807,7 мг/кг. Наиболее высокий суммарный уровень металлов был отмечен в листьях клена остролистного (1807,7 мг/кг), березы повислой (1020,6 мг/кг) и липы сердцевидной (928 мг/кг) (рис. 1). Среди кустарников – в листьях чубушника венечного (654,5 мг/кг), розы морщинистой (867 мг/кг) (рис. 2).

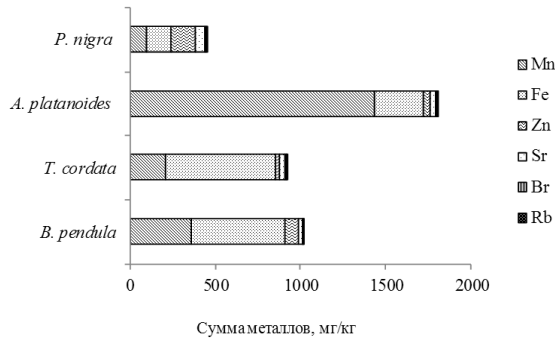


Рис. 1. Суммарное содержание металлов в листьях древесных растений на загрязненных участках (ПКИТЛ)

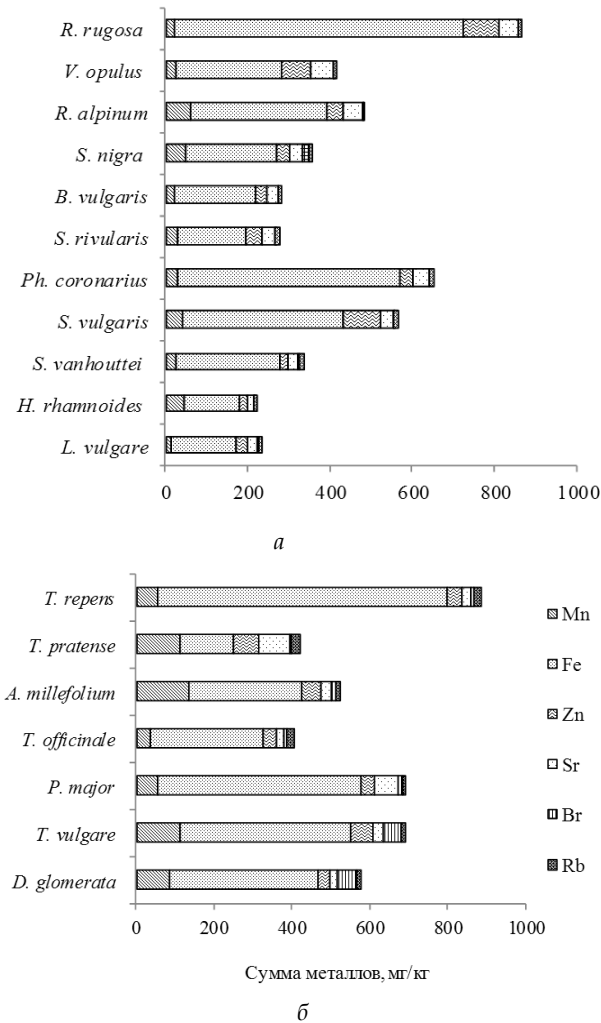


Рис. 2. Суммарное содержание металлов в листьях кустарников (а) и травянистых растений (б) на загрязненных участках (ПКИТЛ)



У травянистых растений больше всего металлы накапливались в листьях клевера белого (884 мг/кг), пижмы обыкновенной (692 мг/кг) и подорожника большого (690,1 мг/кг) (рис. 2). Из изученных элементов растения больше всего накапливали марганец и железо, но их процентное содержание в листьях разных видов было неодинаково. В листьях клена остролистного доля марганца была наиболее высокой по сравнению с другими металлами — 79,5 %, но в листьях других растений марганец накапливался значительно менее активно, процентное содержание металла варьировало в пределах 2,7—35,6 %. В листьях клевера белого, розы морщинистой и чубушника вечноного наблюдалось преимущественное накопление железа, его содержание в листьях — 81,0—83,8 %.

Высокое процентное содержание Fe отмечено в листьях подорожника большого (76 %), таволги Вангутта (75 %), одуванчика лекарственного (71,7 %), барбариса обыкновенного (70,5 %). В листьях других растений содержание железа составило 30,2—69,9 %. В листьях клена содержание железа в процентном отношении было минимальным (15,8 %). В листьях тополя черного наблюдалось максимальное накопление цинка (32,5 %), в листьях других растений — 2,2—16,8 % от суммы металлов. В листьях клевера лугового (19,1 %) и калины обыкновенной (13,2 %) накапливался стронций, в листьях других растений доля металла была значительно ниже (1,8—11,4 %). Максимальное содержание Br наблюдалось в листьях ежи сборной (8,8 %), Rb — в листьях клевера лугового (5,8 %).

Поступление ТМ с техногенными выбросами — существенный фактор загрязнения урбозкосистем, о чем свидетельствуют данные по их аккумуляции в городских растениях. О выраженном техногенном загрязнении городской среды свидетельствует значительное превышение в растениях фоновых концентраций железа, марганца, цинка и стронция. Максимальное содержание поллютантов в растениях наблюдалось в промышленных и селитебных многоэтажных зонах с повышенной транспортной нагрузкой.

Древесные, кустарниковые и травянистые виды растений обладают неодинаковой способностью аккумулировать металлы и содержат различные количества поллютантов. Поглощение элементов видоспецифично. Наиболее высокий суммарный уровень металлов (Mn, Fe, Zn, Sr, Br, Rb) был отмечен в листьях древесных растений: клена остролистного, березы повислой и липы сердцевидной.

Из изученных элементов растения больше всего накапливали марганец и железо. Накопление марганца в листьях в большей степени характерно для древесных растений, чем для кустарников или трав. Максимальное содержание Mn выявлено в листьях клена остролистного (79,5 %), в листьях других растений марганец накапливался значительно менее активно (2,7- 35,6 %).

В листьях клевера белого, розы морщинистой и чубушника вечноного наблюдалось преимущественное накопление железа, его содержание в листьях — 81,0—83,8 %. Среди древесных видов предельная кон-



центрация железа обнаружена в листьях липы сердцевидной (69,9 %) и березы повислой (53,4 %). Среди видов, активно накапливающих Zn, — тополь черный (32,5 %), в листьях других растений содержание цинка — 2,2–16,8 % от суммы поллютантов. Наибольшее содержание стронция выявлено в образцах клевера лугового (19,1 %), в листьях других растений доля металла была значительно ниже (1,8–11,4 %).

Анализ накопления металлов в листьях исследуемых растений выявил положительную корреляционную зависимость между содержанием Fe и Sr ($r = 0,71$). Накопление ТМ в растениях зависит не только от их видовой принадлежности, физико-химических свойств металла, но и от типа поступления поллютанта в растения. С повышением антропогенного воздействия нарушается существующая связь между содержанием ТМ в почве и растениях за счет значительной доли участия атмосферных загрязнителей. По всей видимости, с увеличением антропогенной нагрузки роль фоллиарного пути поступления поллютантов в растения возрастает, увеличивая концентрацию металлов в листьях растений в загрязненных зонах [2; 17; 18].

Таким образом, растения аккумулируют значительные количества ТМ и способны к их выводу из круговорота веществ, поэтому для максимального очищения атмосферы и почвы от ТМ необходимо создавать разнообразные насаждения с высокой биологической устойчивостью, позволяющие эффективно улучшить качество окружающей городской среды.

Список литературы

1. Станченко Л. Ю. Распределение тяжелых металлов в почвах и растительности городских экосистем Калининградской области // Вестник Российского государственного университета им. И. Канта. 2009. №1. С. 81–85.
2. Неверова О. А. Применение фитоиндикации в оценке загрязнения окружающей среды // Биофизика. 2010. Т.1, №1. С. 82–92.
3. Масленников П. В., Чупахина Г. Н., Дедков В. П., Куркина М. В., Садовников П. В., Мельник А. С. Аккумуляция цинка в растениях урбоэкосистем Калининграда // Растительные ресурсы. 2014. Т.50, №4. С. 83–98.
4. Шевякова Н. И., Нетронина И. А., Аронова Е. Е., Кузнецов В. В. Распределение Cd и Fe в растениях *Mesembryanthemum crystallinum* L. при адаптации к Cd-стрессу // Физиология растений. 2003. Т. 50, №5. С. 756–763.
5. Титов А. Ф., Таланова В. В., Казнима Н. М., Лайдинен Г. Ф. Устойчивость растений к тяжелым металлам. Петрозаводск, 2007.
6. Масленников П. В. Экологические аспекты накопления антоциановых пигментов в растениях: автореф. дис. ... канд. биол. наук. Калининград, 2003.
7. Дедков В. П., Масленников П. В., Гребенев Н. Н. Содержание антоцианов как показатель нефтяного загрязнения растений и растительных сообществ дюн Куршской косы // Вестник Российского государственного университета им. И. Канта. 2006. №1. С. 102–108.
8. Чупахина Г. Н., Масленников П. В., Скрытник Л. Н. Природные антиоксиданты (экологический аспект): монография. Калининград, 2011.
9. Чупахина Г. Н., Масленников П. В., Скрытник Л. Н., Чупахина Н. Ю., Полтавская Р. Л., Федурев П. В. Влияние условий Балтийского региона на накопление в растениях водорастворимых антиоксидантов // Известия Академии наук. Сер. химическая. 2014. №9. С. 1946–1954.



10. Позняк С. С. Содержание тяжелых металлов в растительности агрофитоценозов в зоне воздействия крупных промышленных центров // Экологический вестник : научно-практический журнал. 2010. №3. С. 5–14.

11. Масленников П. В., Чупахина Г. Н., Красноперов А. Г. Использование метода газоразрядной визуализации при оценке антиоксидантного статуса растений в условиях токсического действия кадмия // Вестник Балтийского федерального университета им. И. Канта. 2013. №7. С. 14–21.

12. Ващейкин А. С., Садовников П. В., Куркина М. В., Дедков В. П. О содержании тяжелых металлов в почвогрунтах урбанизированных экосистем Калининграда // Вестник Балтийского федерального университета им. И. Канта. 2014. №1. С. 86–92.

13. Методика выполнения измерения массовой доли металлов и оксидов металлов в порошковых пробах почв рентгенофлуоресцентным методом М049-П/10. СПб., 2010.

14. Чупахина Г. Н., Масленников П. В., Скрыпник Л. Н., Бессережнова М. И. Реакция пигментной и антиоксидантной систем растений на загрязнение окружающей среды г. Калининграда выбросами автотранспорта // Вестник Томского государственного университета. Биология. 2012. №2. С. 171–185.

15. Королева Ю. В., Пухлова И. А. Новые данные о биоконцентрировании тяжелых металлов на территории Балтийского региона // Вестник Балтийского федерального университета им. И. Канта. 2012. №1. С. 99–106.

16. Чупахина Г. Н., Масленников П. В., Мальцева Е. Ю., Фролов Е. М., Бессережнова М. И. Антиоксидантный статус растений в условиях загрязнения кадмием городской среды // Вестник Балтийского федерального университета им. И. Канта. 2011. №7. С. 16–23.

17. Никитенко М. А. Видовая специфика поглощения тяжелых металлов (Cu, Zn, Mn и Fe) древесными растениями г. Камбарки Удмуртской Республики // Вестник Ижевского государственного технического университета им. М. Т. Калашникова. 2007. Вып. 2 (34). С. 158–159.

18. Шарифзянов Р. Б. Факториальная зависимость содержания тяжелых металлов в древесных насаждениях на урбанизированной территории // Вестник Нижегородского университета им. Н. И. Лобачевского. Сер. Общая биология. 2011. №2. С. 161–164.

Об авторах

Павел Владимирович Масленников – канд. биол. наук, доц., Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Калининград.

E-mail: pashamaslennikov@mail.ru

Виктор Павлович Дедков – д-р биол. наук, проф., Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Калининград.

E-mail: VDedkov@kantiana.ru

Марина Викторовна Куркина – канд. биол. наук, доц., Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Калининград.

E-mail: MKurkina@kantiana.ru

Алексей Сергеевич Ващейкин – асп., Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Калининград.

E-mail: AVashcheikin@kantiana.ru

Илья Олегович Журавлев – магистрант, Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Калининград.

E-mail: ilyazur88@mail.ru



Наталья Викторовна Бавтрук – магистрант, Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Калининград.

E-mail: bavtruk@list.ru

About the authors

Dr Pavel Maslennikov, Associate Professor, I. Kant Baltic Federal University, Kaliningrad.

E-mail: pashamaslennikov@mail.ru

Prof. Viktor Dedkov, I. Kant Baltic Federal University, Kaliningrad.

E-mail: VDedkov@kantiana.ru

Dr Marina Kurkina, Associate Professor, I. Kant Baltic Federal University, Kaliningrad.

E-mail: MKurkina@kantiana.ru

Aleksey Vascheykin, PhD Student, I. Kant Baltic Federal University, Kaliningrad.

E-mail: AVashcheikin@kantiana.ru

Ilya Zhuravlev, MSc Student, I. Kant Baltic Federal University, Kaliningrad.

E-mail: ilyazur88@mail.ru

Natalia Bavtruk, MSc Student, I. Kant Baltic Federal University, Kaliningrad.

E-mail: bavtruk@list.ru