

АККУМУЛЯЦИЯ ЖЕЛЕЗА В РАСТЕНИЯХ УРБОЭКОСИСТЕМ Г. КАЛИНИНГРАДА

Масленников П.В., Скрыпник Л.Н., Куркина М.В., Федуреав П.В., Тюрганова А.В.,
Бабайцева Е.В., Устинова К.Ю.

ФГАОУ ВО «Балтийский федеральный университет им. И. Канта», Калининград, e-mail:
pashamaslennikov@mail.ru

Железо играет ведущую роль среди всех содержащихся в растениях тяжелых металлов. В составе соединений, содержащих гем (все цитохромы, каталаза, пероксидаза), и в негемовой форме (железосерные центры) железо принимает участие в функционировании основных редокс-систем фотосинтеза и дыхания. Цель настоящей работы – исследовать особенности накопления железа в системе почва – растения городских фитоурбоценозов г. Калининграда. Содержание железа анализировалось в аккумулятивном горизонте городских почв (агроресидентный ландшафт, селитебный, промышленно-коммунальный) и в наиболее распространенных в городских ландшафтах видах древесных, кустарниковых и травянистых растений (22 вида). Максимальное содержание Fe в почвах наблюдалось в промышленно-коммунальных ландшафтах и селитебных многоэтажных зонах с повышенной транспортной нагрузкой (2,1–2,8 %). Содержание железа в листьях растений урбоценозов зависело от его концентрации в почвах ($r=0,92-1,0$; $p<0,05$) и периода вегетации. Изучено фоновое содержание железа в растениях. Выявлены виды, активно накапливающие Fe: у древесных видов – береза повислая и липа сердцевидная (545,1–647,5 мг/кг); у кустарников – чубушник венечный (542,1 мг/кг); у травянистых растений – клевер белый (740,6 мг/кг), ежа сборная (379,4 мг/кг), одуванчик лекарственный (290,8 мг/кг). Наиболее высокие темпы биоаккумуляции металла выявлены у клевера белого (0,34), липы сердцевидной (0,29), березы повислой (0,23), чубушника венечного (0,20), сирени обыкновенной (0,16), ежи сборной (0,15). Данные виды будут полезны как потенциально пригодные в целях фиторемедиации умеренно загрязненных железом территорий. Для большинства исследуемых растений Fe – элемент слабого поглощения и среднего захвата (КБП = 0,1–0,4). При увеличении в почве железа установлено значительное снижение КБП металла для большинства видов растений. Определены виды растений, способные ограничивать поступление железа из окружающей среды.

Ключевые слова: загрязнение окружающей среды, железо, почва, растения, функциональные городские зоны.

ACCUMULATION OF IRON IN PLANTS OF KALININGRAD URBOECOSYSTEMS

Maslennikov P.V., Skrypnik L.N., Kurkina M.V., Feduraev P.V., Tyurganova A.V.,
Babaytseva E.V., Ustinova K.Yu.

Immanuel Kant Baltic Federal University, Kaliningrad, e-mail: pashamaslennikov@mail.ru

Iron is crucial to plant growth and development in comparison with other heavy metals. It plays critical role in metabolic processes such as DNA synthesis, respiration, and photosynthesis. Further, many metabolic pathways are activated by iron, and it is a heme group constituent of many enzymes (all cytochromes, catalase, peroxidase). The purpose of this work was to investigate the features of the accumulation of iron in the system soil – plant in the urban environment of Kaliningrad. The iron content was determined in in soils accumulative horizon of major functional areas of Kaliningrad (agro residential landscape, residential, industrial and municipal) and in the leaves of trees, shrubs, and herbaceous plants (a total of 22 species). The maximum content of iron in soil was observed in the industrial, residential landscape and multi-storey residential areas with high traffic load (2,1–2,8 %). The content of iron in leaves of urban plant depended on iron concentration in soil ($r=0,92-1,0$; $p<0,05$) and stage of plant vegetation. The background concentration of iron in plants is studied. It was identified the plant species that actively accumulated iron: among trees – *Betula pendula* and *Tiliacordata* (545,1–647,5 mg/kg); among shrubs – *Philadelphus coronaries* (542,1 mg/kg); among herbaceous plants – *Trifoliumrepens* (740,6 mg/kg), *Dactylisglomerata* (379,4 mg/kg), *Taraxacumofficinale* (290,8 mg/kg). The maximal bioaccumulation intensity was investigated by *Trifoliumrepens* (0,34), *Tiliacordata* (0,29), *Betula pendula* (0,23), *Philadelphus coronaries* (0,20), *Syringa vulgaris* (0,16), *Dactylisglomerata* (0,15). These plant species can be used in the phytoremediation of iron polluted urban areas. The most test plants tended to have a lower Fe accumulation (as reflected by Biological Accumulation Coefficient which is equal to 0,1–0,4) from soil. With the increasing of iron content in soil the Biological Accumulation Coefficient for most plant species was significantly decreased. The species of plants are able to limit the intake of iron from the environment was identified.

Keywords: environmental pollution, iron, soil, plants, functional urban areas.

Как известно, наиболее опасными токсичными ТМ являются элементы I группы опасности (Hg, Pb, Cd, Zn, As, Se, Be), которые, являясь примесными микроэлементами, вызывают различные нарушения и нередко приводят к гибели живых организмов. Наряду с этим важное значение приобретает содержание биогенных элементов, которые необходимы для нормального функционирования и жизнедеятельности живых организмов, в том числе и растений. Однако при повышенных содержаниях в растениях и жизненно необходимые металлы становятся опасными [6-10; 16].

К таким биогенным элементам относятся железо и марганец (III группа опасности) [3; 12]. Железо играет ведущую роль среди всех содержащихся в растениях тяжелых металлов. Среднее содержание железа в растениях составляет 0,02–0,08 % (20-80 мг/кг сухой массы) [4]. Fe^{3+} почвенного раствора восстанавливается редокс-системами плазмалеммы клеток ризодермы до Fe^{2+} и в такой форме поступает в корень.

В составе соединений, содержащих гем (все цитохромы, каталаза, пероксидаза), и в негемовой форме (железосерные центры) железо принимает участие в функционировании основных редокс-систем фотосинтеза и дыхания. Вместе с молибденом железо участвует в восстановлении нитратов и в фиксации молекулярного азота клубеньковыми бактериями, входя в состав нитратредуктазы и нитрогеназы. Органические соединения, в состав которых входит железо, необходимы в биохимических процессах, происходящих при дыхании и фотосинтезе. Это объясняется очень высокой степенью их каталитических свойств. Неорганические соединения железа также способны катализировать многие биохимические реакции, а в соединении с органическими веществами каталитические свойства железа возрастают во много раз. Каталитическое действие железа связано с его способностью менять степень окисления. Атом железа окисляется и восстанавливается сравнительно легко, поэтому соединения железа являются переносчиками электронов в биохимических процессах. В основе реакций, происходящих при дыхании растений, лежит процесс переноса электронов. Процесс этот осуществляется ферментами – дегидрогеназами и цитохромами, содержащими железо [4; 15; 17].

Железо катализирует также начальные этапы синтеза хлорофилла (образование δ -аминолевулиновой кислоты и протопорфиринов). Поэтому любая причина, ограничивающая доступность железа для растений, приводит к тяжелым заболеваниям, в частности к хлорозу. При нарушении и ослаблении фотосинтеза и дыхания вследствие недостаточного образования органических веществ, из которых строится организм растения, и дефицита органических резервов, происходит общее расстройство обмена веществ. Поэтому при остром недостатке железа неизбежно наступает гибель растений. У деревьев и кустарников

зеленая окраска верхушечных листьев исчезает полностью, они становятся почти белыми, постепенно усыхают. Недостаток железа наблюдается преимущественно на щелочных и известковых почвах, где высокие величины рН препятствуют его поглощению. На почве, обогащенной растворимыми формами железа, чрезмерное его поглощение может привести к токсическому воздействию на растения. Симптомы железистой токсичности не специфичны и проявляются по-разному в зависимости от вида и стадии развития растений [4; 15; 17].

Цель настоящей работы – исследовать особенности накопления железа в системе почва–растения городских фитоуробочинозов г. Калининграда.

Материал и методика исследования. В работе исследовалось накопление железа в аккумулятивном горизонте городских почв и в наиболее распространенных в городских ландшафтах видах древесных, кустарниковых и травянистых растений. Район исследования – 12 постоянных пробных площадок различных функциональных зон г. Калининграда. ЗРО – зоны рекреации и отдыха (фон); АС – Агроселитебные зоны; СЗ – Селитебные зоны, ПКИТЗ – Промышленно-коммунальные и транспортные зоны. В качестве контрольного использовались ландшафты рекреации и отдыха, обладающие минимальной техногенной нагрузкой и природным фоновым уровнем поллютантов, удаленные на 40–50 км от крупных промышленных источников загрязнения окружающей среды (г. Светлогорск).

Для биогеохимического апробирования применялись виды древесных: береза повислая (*Betula pendula* Roth), липа сердцевидная (*Tilia cordata* Mill.), клен остролистный (*Acer platanoides* L.), тополь черный (*Populus nigra* L.) и травянистых растений: ежа сборная (*Dactylis glomerata* L.), пижма обыкновенная (*Tanacetum vulgare* L.), подорожник большой (*Plantago major* L.), одуванчик лекарственный (*Taraxacum officinale* Wigg. s.l.), тысячелистник обыкновенный (*Achillea millefolium* L.), клевер луговой (*Trifolium pratense* 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 венечный (*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 проводился в течение вегетационного периода (май–октябрь) 2014 г. Выделение средней пробы проводилось в сухую погоду в соответствии с общепринятыми методиками [13]. Отбор литохимических проб проводился из верхнего почвенного слоя мощностью от 0 до 10 см методом конверта [2; 13]. Содержание железа в пробах определяли методом рентгенофлуоресцентного анализа на приборе «Спектроскан Макс – G» (ООО НПО «Спектрон», Россия). Образцы растений и почвы для

анализа подготавливали в соответствии с методикой М049-П/10 [11]. Полученные данные обработаны статистически и представлены в виде средних арифметических значений и их стандартных ошибок. Статистическая значимость различий между вариантами определяли с помощью t-критерия Стьюдента ($p \leq 0.05$). Корреляционный анализ проводили с помощью критерия Пирсона.

Полученные результаты и их обсуждение. Почва служит естественным барьером на пути металлов, сдерживая их поступление в растения и миграцию в сопредельные среды. Поэтому наиболее пристального внимания заслуживает установление количественных параметров содержания элементов в почвах – начальном звене пищевой цепи. В миграции химических элементов важны техногенные условия изучаемых городских ландшафтов. В связи с этим содержание железа анализировалось в аккумулятивном горизонте почв основных функциональных зон города (АС, СЗ, ПКитЗ). В качестве контроля использовался – ландшафт рекреации и отдыха (ЗРО).

Естественный уровень Fe в почве определяется, прежде всего, содержанием его в почвообразующих породах. Фоновое содержание железа в почвах – 3800,0 мг/кг [15; 17]. Оценка содержания Fe в почвах разных функциональных зон города показала, что максимальный уровень металла наблюдался в промышленных и селитебных многоэтажных зонах с повышенной транспортной нагрузкой (ПКитЗ), концентрация железа в верхнем слое почвы превышала фоновый показатель (ЗРО) в 2,3 раза. В селитебной зоне содержание Fe в аккумулятивном горизонте почв было ниже, но также превосходило его фоновый уровень в среднем в 1,8 раза (табл. 1). Содержание железа в агроселитебной зоне незначительно превышало фон (23,1 %).

Таблица 1

Содержание железа в аккумулятивном горизонте почв (0–10 см) различных функциональных зон г. Калининграда, % ($p < 0,05$)

| К* | Тип ландшафта | | | ПКитЗ |
|-------|---------------|---------|---------|---------|
| | ЗРО | АЗ | СЗ | |
| 0,5-5 | 1,2±0,1 | 1,6±0,1 | 2,1±0,2 | 2,8±0,3 |

Примечание: ЗРО – зоны рекреации и отдыха (фон); АС – агроселитебные зоны; СЗ – селитебные зоны; ПКитЗ – промышленно-коммунальные и транспортные зоны. К* – среднее содержание элемента [5].

В работе представлены данные по содержанию железа в растительных образцах. Для анализа использовались листья древесно-кустарниковых и травянистых растений. Железо играет ведущую роль среди всех содержащихся в растениях тяжелых металлов. Среднее содержание железа в растениях составляет 0,02–0,08 % (20–80 мг/кг сухой массы) [4]. Для

травянистых растений нормой считается содержание Fe в их надземной фитомассе от 50,0 до 240,0 мг/кг сухого вещества [1; 14; 17]. ПДК железа для трав не установлена, критической является 750,0 мг/кг сухого вещества [3]. Реакция растений как на токсическое воздействие железа, так и на его недостаточность весьма изменчива и зависит от их генотипа и вида [17].

Для оценки антропогенного загрязнения почв и растительности железом, в первую очередь, необходимо выявить природный фоновый уровень металла. В сравнении с ним можно определить насколько растение поглощает данный элемент. Исследования показали, что накопление железа в листьях растений происходило неравномерно и зависело от степени антропогенного загрязнения почв и вида растений. Наиболее высокое фоновое содержание железа у древесных видов выявлено в листьях клена остролистного ($249,5 \pm 25,1$ мг/кг), среди кустарников – в листьях чубушника венечного ($225,4 \pm 21,8$ мг/кг). У травянистых растений высокий уровень металла наблюдался в листьях тысячелистника обыкновенного ($233,4 \pm 22,7$ мг/кг), пижмы обыкновенной ($317,2 \pm 30,4$ мг/кг) и в листьях подорожника большого ($485,3 \pm 47,9$ мг/кг) (табл. 2–4).

Таблица 2

Содержание железа в листьях древесных растений различных функциональных зон
г. Калининграда ($p < 0,05$)

| Вид | Fe, мг/кг | | |
|-------------------|------------------|------------------|------------------|
| | ЗРО | СЗ | ПКитЗ |
| Древесные виды | | | |
| Тополь черный | 141,2 \pm 13,7 | 139,2 \pm 14,2 | 137,8 \pm 14,5 |
| Березаповислая | 173,7 \pm 18,2 | 312,6 \pm 30,5 | 545,1 \pm 55,4 |
| Клен остролистный | 249,5 \pm 25,1 | 264,6 \pm 27,6 | 286,4 \pm 27,3 |
| Липасердцевидная | 184,3 \pm 17,9 | 427,8 \pm 43,3 | 647,5 \pm 63,9 |

Примечание: ЗРО – зоны рекреации и отдыха (фон); СЗ – селитебные зоны; ПКитЗ – промышленно-коммунальные и транспортные зоны.

Увеличение степени загрязнения городских экосистем приводит к изменению баланса накопления металлов в системе почва – растение. В этих условиях растения способны накапливать тяжелые металлы гораздо более интенсивно, чем произрастающие в экологически чистой зоне аналогичные виды. Количество аккумулирующих поллютантов в растениях зависит от видовых особенностей, таких как биология, физиология и биохимия данного вида, а также от специфичности элемента, его концентрации и от наличия металлов-антагонистов в растении и почве [4].

Анализ данных о содержании железа в растениях, произрастающих на загрязненных участках (СЗ, ПКитЗ), позволил выявить виды аккумулирующие в наибольших количествах ионы железа. Фоновое содержание Fe в исследуемых растениях превышено в 1,4–5,9 раза. Среди древесных видов предельная концентрация железа выявлена в листьях липы

сердцевидной и березы повислой (545,1–647,5 мг/кг), у кустарников – в листьях чубушника венечного 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 содержание железа в растениях загрязненного участка по сравнению с фоном изменялось незначительно (ПКитЗ).

Таблица 3

Содержание железа в листьях кустарников различных функциональных зон
г. Калининграда ($p < 0,05$)

| Вид | Fe, мг/кг | | |
|--------------------------------|------------|------------|------------|
| | ЗРО | СЗ | ПКитЗ |
| Кустарники | | | |
| Бузина черная | 179,3±17,5 | 198,3±18,6 | 217,6±20,1 |
| Снежнаягодникбелый | 84,3±8,2 | 125,5±13,7 | 167,5±15,9 |
| Сирень обыкновенная | 126,7±12,1 | 192,3±20,1 | 387,5±37,4 |
| Калинаобыкновенная «Розеум» | 181,2±19,3 | 206,1±20,3 | 255,7±23,9 |
| Бирючина обыкновенная | 95,6±9,6 | 135,1±14,2 | 155,4±14,7 |
| Чубушник венечный | 225,4±21,8 | 347,9±35,6 | 542,1±55,2 |
| Смородина альпийская | 163,6±16,7 | 215,4±20,9 | 330,9±34,4 |
| Таволга Вангутта | 110,7±11,3 | 163,8±17,2 | 253,8±24,2 |
| Роза морщинистая | 119,5±12,4 | 289,6±26,3 | 302,4±28,4 |
| Барбарис обыкновенный | 95,2±9,1 | 143,6±14,2 | 197,8±19,3 |
| Облепиха крушиновая | 134,3±13,5 | 129,7±13,5 | 132,2±13,4 |

Примечание: ЗРО – зоны рекреации и отдыха (фон); СЗ – Селитебные зоны; ПКитЗ – промышленно-коммунальные и транспортные зоны.

Для характеристики биогенной миграции железа в системе почва – растение на основе данных по его валовому содержанию в почвогрунтах и в листьях растений был рассчитан геохимический показатель интенсивности биологического поглощения элементов растительностью – коэффициент биологического поглощения (КБП).

Анализ интенсивности поглощения железа растениями фонового участка показал, что для большинства исследуемых растений Fe – элемент слабого поглощения и среднего захвата (КБП = 0,1–0,4). При увеличении загрязнения почвы железом (увеличении его содержания в почве) установлено значительное снижение КБП металла для большинства видов растений. Исключение составили некоторые виды, у которых интенсивность поглощения элемента оказалась более высокой по сравнению с фоновым участком: береза повислая, липа сердцевидная, сирень обыкновенная, клевер белый, ежа сборная. Интенсивность поглощения железа у растений одуванчика лекарственного, розы морщинистой, таволги остроазубренной, чубушника венечного, снежнаягодника белого значительно не изменялась.

Содержание железа в листьях травянистых растений различных функциональных зон г. Калининграда ($p < 0,05$)

| Вид | Fe, мг/кг | | |
|-----------------------------|------------|------------|------------|
| | ЗРО | СЗ | ПКитЗ |
| Травянистые растения | | | |
| Клевер луговой | 129,7±13,2 | 137,5±14,2 | 140,4±15,3 |
| Подорожник большой | 485,3±47,9 | 501,2±49,7 | 524,4±51,6 |
| Клевер белый | 187,4±17,5 | 300,5±29,7 | 740,6±73,2 |
| Пижма обыкновенная | 317,2±30,4 | 381,6±37,8 | 438,3±40,7 |
| Тысячелистник обыкновенный | 233,4±22,7 | 247,5±23,9 | 288,3±27,5 |
| Одуванчик лекарственный | 112,1±12,3 | 212,4±20,5 | 290,8±28,5 |
| Ежа сборная | 139,4±14,6 | 269,7±27,3 | 379,4±38,5 |

Примечание: ЗРО – зоны рекреации и отдыха (фон); СЗ – Селитебные зоны, ПКитЗ – Промышленно-коммунальные и транспортные зоны.

Анализ корреляционных связей между концентрацией железа в почве и растениях выявил высокую достоверную степень сопряженности между уровнями накопления металла в почве и в листьях большинства изученных растений ($r=0,92-1,0; p < 0,05$). За исключением облепихи ($r=-0,52; p < 0,05$). Между концентрацией железа в почве и листьях растений тополя черного выявлена отрицательная корреляционная связь ($r=-0,99; p < 0,05$).

Зависимость между содержанием железа в аккумулятивном горизонте городских почв и в листьях растений описывается линейными уравнениями. Вычисленные методом наименьших квадратов соответствующие коэффициенты линейной регрессии указывают на усредненное увеличение содержания железа в растениях (в мг/кг) при увеличении его концентрации в почве на 1 мг/кг. Соответствующие коэффициенты регрессии для Fe среди древесных, кустарников и травянистых растений представлены в табл. 5–7.

Таблица 5

Зависимость между содержанием железа (x) в почве и уровнем металла в древесных растениях (y) ($p < 0,05$)

| Вид | Линейное уравнение регрессии | R^{2*} | R^{**} |
|-------------------|------------------------------|----------|----------|
| Тополь черный | $y = -0,0021x + 143,73$ | 0,9991 | -0,99 |
| Береза повислая | $y = 0,2285x - 120,81$ | 0,9538 | 0,98 |
| Клен остролистный | $y = 0,0228x + 220,54$ | 0,9692 | 0,98 |
| Липа сердцевидная | $y = 0,2886x - 166,99$ | 0,9982 | 0,99 |

* Величина достоверности аппроксимации, ** Коэффициент корреляции.

Максимальные коэффициенты регрессии и высокая степень поглощения элемента были выявлены среди древесных растений у липы сердцевидной (0,29), березы повислой (0,23). У кустарников – чубушника венечного (0,20), сирени обыкновенной (0,16); у травянистых-клевера белого (0,34), ежи сборной (0,15).

Таблица 6

Зависимость между содержанием железа (x) в почве и уровнем металла в листьях кустарников (y) ($p < 0,05$)

| Вид | Линейное уравнение регрессии | R ^{2*} | R** |
|-----------------------|------------------------------|-----------------|-------|
| Сирень обыкновенная | $y = 0,1588x - 87,389$ | 0,8815 | 0,94 |
| Роза морщинистая | $y = 0,1178x - 2,3505$ | 0,8563 | 0,93 |
| Калина обыкновенная | $y = 0,0457x + 121,45$ | 0,9333 | 0,97 |
| Смородина альпийская | $y = 0,1024x + 28,48$ | 0,9191 | 0,96 |
| Снежноягодник белый | $y = 0,0517x + 20,623$ | 0,9940 | 0,99 |
| Чубушник венечный | $y = 0,1951x - 24,811$ | 0,9597 | 0,98 |
| Барбарис обыкновенный | $y = 0,0636x + 16,127$ | 0,9891 | 0,99 |
| Облепиха крушиновая | $y = -0,0015x + 135,1$ | 0,2692 | -0,52 |
| Бирючина обыкновенная | $y = 0,0377x + 52,087$ | 0,9877 | 0,99 |
| Бузина черная | $y = 0,0238x + 150$ | 0,9941 | 0,99 |
| Таволга Вангутта | $y = 0,088x - 2,8702$ | 0,9524 | 0,97 |

* Величина достоверности аппроксимации, ** Коэффициент корреляции.

Таблица 7

Зависимость между содержанием железа (x) в почве и уровнем металла в травянистых растениях (y) ($p < 0,05$)

| Вид | Линейное уравнение регрессии | R ^{2*} | R** |
|----------------------------|------------------------------|-----------------|------|
| Пижма обыкновенная | $y = 0,0755x + 225,53$ | 0,9988 | 0,99 |
| Тысячелистник обыкновенный | $y = 0,0334x + 188,4$ | 0,8851 | 0,94 |
| Клевер луговой | $y = 0,0068x + 122,08$ | 0,9656 | 0,98 |
| Одуванчик лекарственный | $y = 0,1117x - 21,975$ | 1 | 1 |
| Клевер белый | $y = 0,3355x - 272,66$ | 0,8477 | 0,92 |
| Ежа сборная | $y = 0,1498x - 41,672$ | 0,9995 | 0,99 |
| Подорожник большой | $y = 0,0241x + 454,59$ | 0,9682 | 0,98 |

* Величина достоверности аппроксимации, ** Коэффициент корреляции.

Заключение. Таким образом, в аккумулятивном горизонте почв основных функциональных зон города (АСЛ, СЛ, ПКитЛ) выявлено превышение фонового содержания железа, максимальное содержание металла наблюдалось в промышленно-коммунальных ландшафтах и селитебных многоэтажных зонах с повышенной транспортной нагрузкой. Анализ данных о содержании железа в растениях, произрастающих на загрязненных участках (СЗ, ПКитЗ), позволил выявить виды, аккумулирующие в наибольших количествах ионы железа. Среди видов активно накапливающих Fe у древесных видов – береза повислая и липа сердцевидная (545,1-647,5 мг/кг; $K_c=3,1-3,5$), у кустарников – чубушник венечный (542,1 мг/кг; $K_c=2,4$), у травянистых растений – клевер белый (740,6 мг/кг; $K_c=3,9$), ежа сборная (379,4 мг/кг; $K_c=2,7$), одуванчик лекарственный (290,8 мг/кг; $K_c=2,6$). В листьях данных видов концентрация железа в летний вегетационный период не превышала критический уровень (750–1000 мг/кг). Анализ интенсивности поглощения железа растениями фонового участка показал, что для большинства исследуемых растений Fe – элемент слабого поглощения и среднего захвата ($K_{БП} = 0,1-0,4$). При увеличении в почве железа установлено значительное снижение $K_{БП}$ металла для большинства видов

растений. Анализ корреляционных связей между концентрацией железа в почве и растениях выявил высокую достоверную степень сопряженности между уровнями накопления металла в почве и в листьях большинства изученных растений ($r=0,92-1,0$ $p<0,05$). Анализ межвидовых различий эффективности биоаккумуляции железа среди типичных представителей синантропной флоры города показал, что наиболее высокие темпы поглощения Fe имеют: среди древесных растений у липы сердцевидной (0,29), березы повислой (0,23); у кустарников – чубушник венечный (0,20), сирень обыкновенная (0,16); у травянистых – клевер белый (0,34), ежа сборная (0,15). Данные виды будут полезны как потенциально пригодные в целях фиторемедиации умеренно загрязненных железом территорий. Из древесных видов наиболее устойчивые к загрязнению железом почв: клен остролистный и тополь, у кустарников – бирючина обыкновенная, облепиха крушиновая, бузина черная, среди трав – подорожник большой, клевер луговой и тысячелистник.

Список литературы

1. Аминева А.А., Бускунова Г.Г. Особенности аккумуляции и транспорта железа в почвах и в органах *Achillea nobilis* L. в условиях степной зоны Южного Урала // Вестник ОГУ. – 2009. – № 6. – С. 532-533.
2. 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.
3. Ильин В.Б., Сысо А.И. Микроэлементы и тяжелые металлы в почвах и растениях. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2001. – 229 с.
4. Копылова Л.В. Оценка уровня загрязнения почв тяжёлыми металлами и интенсивность поглощения их древесными растениями // Ученые записки ЗабГГПУ. – 2012. – № 1. – С.70-75.
5. Кабата-Пендиас А. Микроэлементы в почвах и растениях / А. Кабата-Пендиас, Х. Пендиас. – М.: Мир, 1989. – 439 с.
6. Масленников П.В., Чупахина Г.Н., Скрыпник Л.Н. Содержание фенольных соединений в лекарственных растениях Ботанического сада // Известия Российской академии наук. Серия биологическая. – 2013. – № 5. – С. 551-557.
7. 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.

8. 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.
9. Масленников П.В., Скрыпник Л.Н. Аккумуляция металлов в почвах г. Калининграда // Современные проблемы науки и образования. – 2015. – № 1-1.; URL: <http://www.science-education.ru/ru/article/view?id=17614> (дата обращения: 08.04.2016).
10. Масленников П.В., Дедков В.П., Куркина М.В., Вашейкин А.С., Журавлев И.О., Бавтрук Н.В. Аккумуляция металлов в растениях урбоэкосистем // Вестник Балтийского федерального университета им. И. Канта. – 2015. – № 7. – С. 57-69.
11. Методика выполнения измерения массовой доли металлов и оксидов металлов в порошковых пробах почв рентгенофлуоресцентным методом. М049-П/10. – СПб.: Изд-во ООО НПО «Спектрон», 2010. – 17 с.
12. Орлов Д.С., Малинина М.С., Мотузова Г.В. и др. Химическое загрязнение почв и их охрана. – М.: Агропромиздат, 1991. – 303 с.
13. Станченко Л.Ю. Распределение тяжелых металлов в почвах и растительности городских экосистем Калининградской области // Вестник Балтийского федерального университета им. И. Канта. – 2009. – № 1. – С. 81-86.
14. Старова М.В. Проблема экологии: принципы их решения на примере Южного Урала. – М.: Наука, 2003. – 287 с.
15. Черников В.А., Алексахин Р.М., Голубев А.В. и др. Агроэкология. – М.: Колос, 2000. – 536 с.
16. Чупахина Г.Н., Масленников П.В., Скрыпник Л.Н., Чупахина Н.Ю., Полтавская Р.Л., Федураев П.В. Влияние условий Балтийского региона на накопление в растениях водорастворимых антиоксидантов // Известия Академии наук. Серия химическая. – 2014. – № 9. – С. 1946-1954.
17. Янтурин И.Ш., Аминева А.А. Аккумуляция железа, марганца и никеля в подземных и надземных органах *Inula helenium* L. в условиях Южного Урала // Фундаментальные исследования. – 2013. – № 6-6. – С. 1456-1461.