

УДК 581.45:582.091:504.5 (470.22) (1-212)

ОСОБЕННОСТИ НАКОПЛЕНИЯ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ В ЛИСТЬЯХ ДРЕВЕСНЫХ РАСТЕНИЙ НА УРБАНИЗИРОВАННЫХ ТЕРРИТОРИЯХ В УСЛОВИЯХ СЕВЕРА

Л. В. Ветчинникова¹, Т. Ю. Кузнецова¹, А. Ф. Титов²

¹Институт леса Карельского научного центра РАН

²Институт биологии Карельского научного центра РАН

Установлено, что среди представителей лиственных древесных пород (береза, липа, рябина, тополь), наиболее часто используемых для озеленения северных городов, хорошо выраженной способностью к аккумуляции тяжелых металлов обладает береза, для которой характерно накопление самых токсичных элементов – кадмия, свинца и никеля, а также марганца. Кроме того, выявлено, что содержание тяжелых металлов в листьях в течение вегетационного периода не остается постоянным, а возрастает к концу вегетационного сезона, что наиболее четко проявляется у берез, произрастающих на урбанизированных территориях.

Ключевые слова: береза, липа, рябина, тополь, атмосферное загрязнение, тяжелые металлы, сезонные изменения.

L. V. Vetchinnikova, T. Yu. Kuznetsova, A. F. Titov. PATTERNS OF HEAVY METAL ACCUMULATION IN LEAVES OF TREES IN URBAN AREAS IN THE NORTH

Studies have demonstrated that among the deciduous species (birch, lime, rowan, poplar) most commonly used for landscaping northern cities, birch stands out for a high capacity to accumulate heavy metals. It stores the most toxic elements – cadmium, lead and nickel, as well as manganese. We found also that the heavy metal content in the leaves did not remain constant over the growing season, but increased towards its termination. This pattern was the most explicit in the birch trees growing in urban areas.

Key words: birch, lime, rowan, poplar, air pollution, heavy metals, seasonal variations.

Введение

Среди глобальных экологических проблем одно из первых мест, по признанию многих специалистов, занимает загрязнение окружающей среды поллютантами. Они имеют разное происхождение и различную химическую природу, но особое место среди них принадлежит тяжелым металлам, как правило, связанным с антропо-

генной деятельностью, в результате которой в атмосферу попадает более 60 % от их общего количества, а свинца, кадмия, никеля – до 90–99 % [Adriano, 1986; Никонов и др., 2004; Кулагин, Шагиева, 2005 и др.]. Поэтому в последние десятилетия значительное развитие получили работы, направленные на изучение распространения тяжелых металлов в окружающей среде и их аккумуляции растениями [Чернень-

кова, 1986, 2002; Clemens, 2001; Memon et al., 2001; Hall, 2002; Piczak et al., 2003; Rosselli et al., 2003; Титов и др., 2007; Головки и др., 2008; Костюк, 2009 и др.]. В результате установлено, что хотя многие тяжелые металлы и не являются необходимыми для нормальной жизнедеятельности растений химическими элементами, тем не менее могут ими активно поглощаться и долго сохранять токсические свойства, оказывая тем самым длительное негативное действие и последствие на организм. Их прямое влияние на растения начинается с момента контакта и сорбции надземными органами, преимущественно листьями. В условиях городской среды в качестве важного барьера на пути распространения тяжелых металлов могут выступать древесные растения. Их ассимиляционные органы (листья), имеющие широко развитую поверхность обмена с окружающим воздухом, поглощают и осаждают из воздуха наибольшее количество атмосферных примесей [Илькун, 1978], но при этом сами подвергаются повреждениям намного сильнее других органов.

Исходя из вышесказанного, цель данной работы состояла в установлении особенностей накопления тяжелых металлов в листьях основных видов древесных растений, наиболее широко представленных в городской флоре Европейского Севера нашей страны.

Материалы и методы

Исследования проводили на березе повислой (*Betula pendula* Roth), липе сердцевидной (*Tilia cordata* Mill.), рябине обыкновенной (*Sorbus aucuparia* L.) и тополе бальзамическом (*Populus balsamifera* L.). Отбор листьев для анализа осуществляли с деревьев, произрастающих в г. Петрозаводске (Республика Карелия, 62° с. ш., 34° в. д.) на территории Губернаторского парка (памятник ландшафтной архитектуры), расположенного в центре города.

Характер накопления тяжелых металлов в летний и осенний периоды изучали в листьях березы повислой (*Betula pendula* Roth) и березы пушистой (*Betula pubescens* Ehrh.), растущих в природных условиях (Ботанический сад Петрозаводского государственного университета, расположенный примерно в 10 км от г. Петрозаводска и отделенный от него акваторией Онежского озера) и на территории города. Для сравнения в Петрозаводске были выбраны наиболее загрязненные улицы его центральной части (ул. Анохина и пр. Первомайский) [Гос. доклад..., 2007]. Отбор образцов проводили в период полного развития листовой пластинки (июль) и в начале ее пожелтения (сентябрь).

Концентрацию тяжелых металлов (кадмий, свинец, никель, медь, цинк, железо, марганец) определяли методом атомно-абсорбционной спектrophотометрии на атомно-абсорбционном спектрофотометре AA-6800 (Shimadzu, Япония).

Математическую обработку данных осуществляли с помощью общепринятых методов вариационной статистики с использованием пакета программ Microsoft Excel.

Результаты и обсуждение

Проведенные исследования показали, что концентрация кадмия в листьях древесных растений (береза, липа, рябина и тополь), произрастающих в парковой зоне в центре г. Петрозаводска, колеблется от 0,01 до 0,54 мг/кг, свинца – от 0,5 до 5,4 мг/кг, никеля – от 0,01 до 1,9 мг/кг, меди от 10,1 до 35,2 мг/кг, цинка – от 25,6 до 85,4 мг/кг, железа – от 350 до 720 мг/кг, марганца – 103 до 652 мг/кг сухого вещества. В целом эти значения не достигают предельно допустимых величин для жизнедеятельности растений [Минеев, 1988; Кабата-Пендиас, Пендиас, 1989].

Следует при этом отметить, что локальные источники тяжелых металлов в исследуемом районе отсутствуют, поэтому основное их поступление, очевидно, происходило за счет атмосферных выпадений. Выявленные различия соответствуют сложившемуся мнению [Тарчевский, 1964; Тарабрин, 1982 и др.] о том, что избирательная способность и интенсивность поглощения металлов ассимилирующими органами древесных растений из воздуха определяются свойствами самих растений (характер архитектуры кроны и положения в ней листьев, размер и форма листовых пластинок, густота волосяного покрова листовой поверхности, степень покрытия листьев воском), характером загрязнений (размер и концентрация частиц) и условиями окружающей среды (температура воздуха, уровень освещенности, относительная влажность воздуха и др.).

Наиболее заметные различия между изученными видами установлены нами по накоплению кадмия, свинца и никеля (рис. 1: А–В). Так, содержание кадмия в листьях березы было в 2 раза выше по сравнению с тополем и почти в 7 раз – по сравнению с рябиной и липой (рис. 1: А). Концентрация свинца и никеля в листьях березы также была значительно выше по сравнению с другими изученными породами (рис. 1: Б, В). По уровню содержания кадмия растения распределялись следующим образом: береза > тополь > рябина > липа; свин-

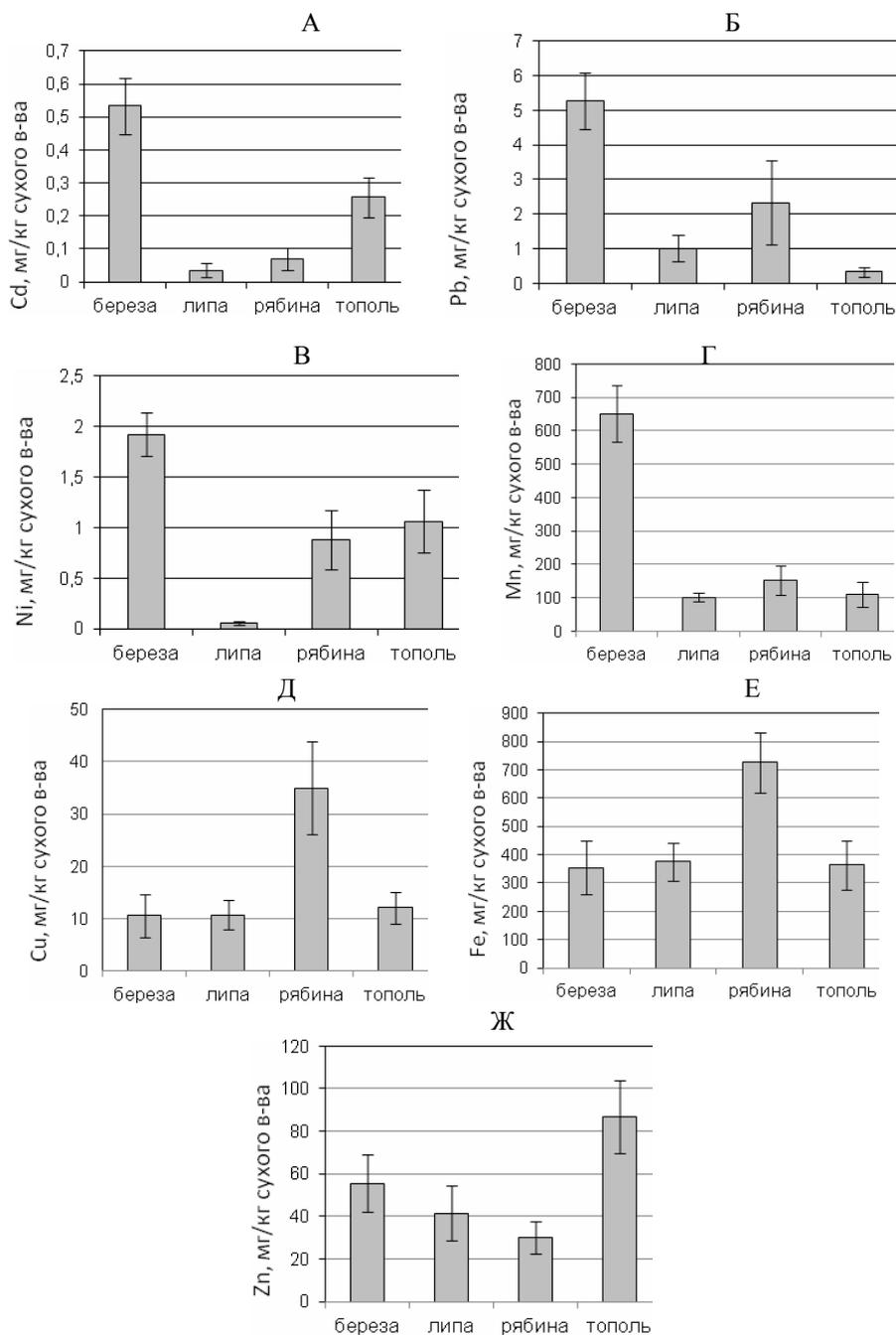


Рис. 1. Содержание кадмия (А), свинца (Б), никеля (В), марганца (Г), меди (Д), железа (Е) и цинка (Ж) (в мг/г сухого вещества) в листьях древесных растений, произрастающих в парковой зоне г. Петрозаводска

ца: береза > рябина > липа > тополь; **никеля**: береза > тополь > рябина > липа. В целом повышенные концентрации наиболее токсичных металлов зафиксированы в листьях березы.

Кроме того, в листьях березы обнаружено преимущественное накопление марганца (650 мг/кг сухого вещества), тогда как у других видов его содержание было в несколько раз ниже и варьировало в диапазоне от 100 до 120 мг/кг сухого вещества (рис. 1: Г). Об-

щий ряд по содержанию **марганца** выглядел следующим образом: береза > рябина > тополь > липа.

Иная картина отмечена нами при изучении характера накопления в листьях древесных растений меди, железа и цинка. В частности, содержание меди (рис. 1: Д) преобладало в листьях рябины (до 35 мг/кг сухого вещества). У других же видов ее количество в листьях было значительно ниже.

Наибольшая концентрация железа (около 720 мг/кг сухого вещества) обнаружена в листьях рябины (рис. 1: Е). У других видов его количество было вдвое меньше, варьируя в диапазоне от 350 до 380 мг/кг сухого вещества.

Преимущественное накопление цинка обнаружено в листьях тополя (85 мг/кг сухого вещества), а наименьшее – в листьях рябины (26 мг/кг). Общий убывающий ряд по содержанию цинка выглядит так: тополь > береза > липа > рябина (рис. 1: Ж). Аналогичные данные о преобладании цинка в листьях разных видов рода *Populus* получены также Н. В. Прохоровой с соавт. [1998] в условиях лесостепного и степного Поволжья и Л. В. Копыловой [2012] в условиях Забайкалья.

Полученные нами результаты позволили выявить наличие определенных видовых особенностей у древесных растений по накоплению тяжелых металлов в листьях. Так, наибольшей аккумулярующей способностью в отношении тяжелых металлов обладают листья березы, наименьшей – листья липы. Для листьев березы характерно повышенное поглощение наиболее токсичных тяжелых металлов – кадмия, свинца и никеля, а также

марганца. Листья тополя концентрируют преимущественно цинк и могут накапливать кадмий и никель. Для листьев рябины установлено преимущественное содержание меди и железа, отмечена также способность к поглощению свинца.

На основании проведенных исследований также установлено, что содержание тяжелых металлов в листьях берез в течение вегетационного периода не остается постоянным, а определенным образом изменяется. В частности, наиболее заметные различия обнаружены по накоплению меди (рис. 2: А), цинка (рис. 2: Б), железа (рис. 2: В) и марганца, концентрации которых к концу вегетационного сезона увеличились. Наибольшее накопление этих металлов к осени наблюдалось в листьях берез, произрастающих в городских условиях (более чем в 2 раза). Например, содержание меди в листьях березы возросло с 8,3 мг/кг (в летний период) до 14,9 мг/кг (осенью) сухого вещества. У березы, произрастающей в условиях ботанического сада, концентрации меди и цинка в листьях увеличились к осени на 25 %, а содержание железа и марганца практически не изменялось.

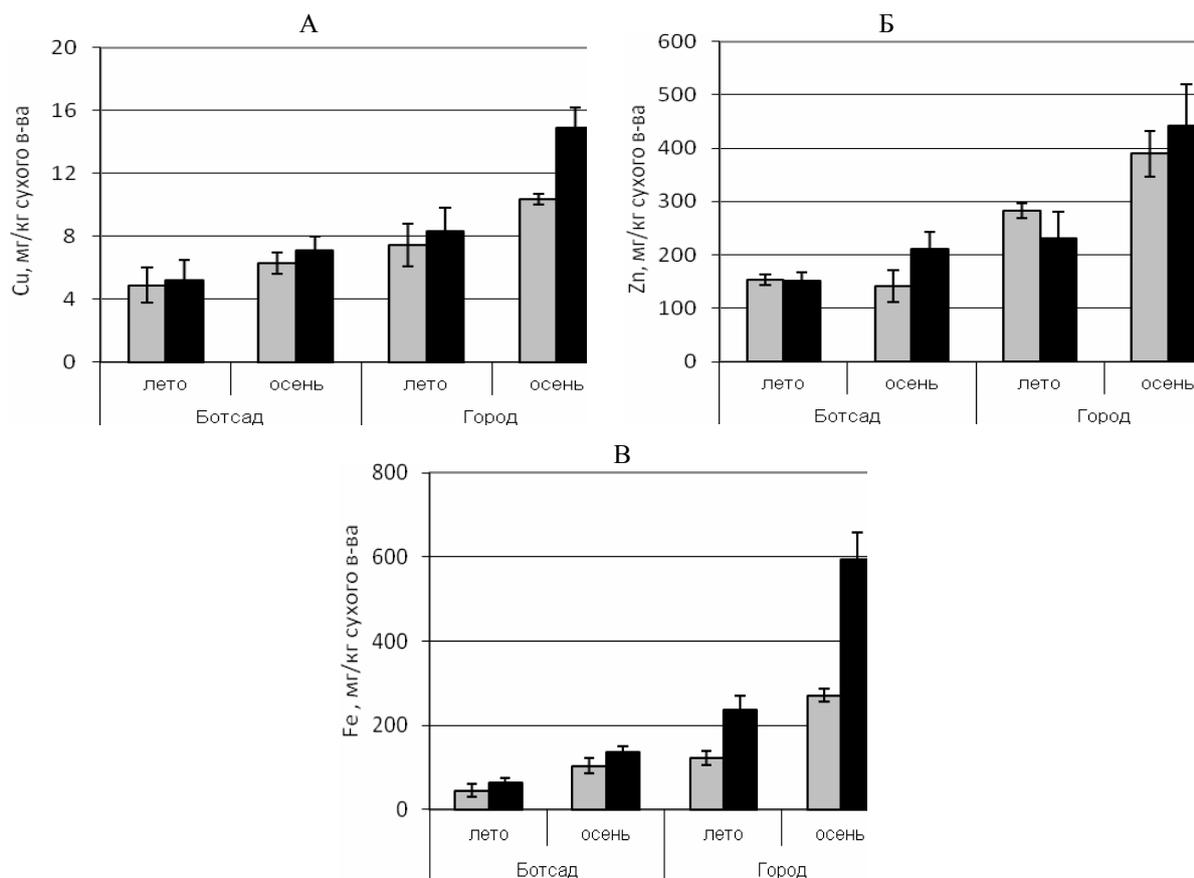


Рис. 2. Содержание меди (А), цинка (Б) и железа (В) в листьях берез, произрастающих в природных (Ботанический сад) и городских условиях (г. Петрозаводск), в летний и осенний периоды:

■ Береза повислая ■ Береза пушистая

Содержание наиболее токсичных тяжелых металлов, таких как кадмий, свинец и никель, в листьях березы в период вегетации оказалось относительно стабильным. В частности, концентрация свинца в листьях изученных берез летом достигала 3,1 мг/кг, а осенью – 3,5 мг/кг сухого вещества (рис. 3: Б). Концентрация никеля в течение вегетационного сезона также изменялась незначительно: от 3,0 до 4,2 мг/кг сухого вещества.

Содержание кадмия (рис. 3: А) у изученных берез в период вегетации колебалось от 0,72 до 1,12 мг/кг сухого вещества. По сводным данным, представленным в работе Кабата-Пендиас, Пендиас [1989], фоновое содержание этого металла в надземной части растений составляет 0,05–0,6 мг/кг, а токсичное – 1,0–70,0 мг/кг сухого вещества. Это означает, что в период наших исследований концентрация кадмия в листьях березы несколько превышала нижнюю границу диапазона, который считается токсичным. Согласно литературным данным, кадмий в основном поглощается корневой системой и в меньшей степени надземными органами. По мнению А. А. Лурье с соавт. [1995], механизмы, препятствующие транспорту тяжелых металлов в надземную часть и репродуктивные органы, особенно активно действуют в отношении кадмия и в меньшей степени – цинка. Для кадмия эти механизмы проявляются при любой его концентрации в почве, а для цинка – только при концентрациях, значительно превышающих фоновые. Вероятно, этим хотя бы отчасти можно объяснить довольно стабильные показатели, зафиксированные нами при изучении содержания кадмия в листьях березы в зависимости от места произрастания и периода вегетации.

Сопоставление полученных данных также свидетельствует о существовании определенных различий у видов берез по накоплению тяжелых металлов в листьях: у березы пушистой содержание почти всех изученных нами элементов (за исключением никеля) в городских условиях было всегда выше, чем у березы повислой.

Следовательно, содержание тяжелых металлов в ассимилирующих органах (листьях) березы в течение вегетационного периода не остается постоянным, а возрастает к концу вегетации, что наиболее четко проявляется у берез, произрастающих в городских условиях. Значительных изменений в концентрации кадмия, свинца и никеля в течение вегетационного периода не обнаружено. Вместе с тем в листьях березы отмечено небольшое превышение нижних пределов пороговой концентрации по кадмию. Установлено также, что ткани листьев березы обладают определенной избирательной способностью к накоплению тяжелых металлов, зависящей от видовой принадлежности.

Таким образом, среди представителей лиственных древесных пород (береза, липа, рябина, тополь), наиболее часто используемых для озеленения северных городов, отчетливо выраженной способностью к аккумуляции тяжелых металлов обладает береза, для которой характерно накопление самых токсичных тяжелых металлов – кадмия, свинца и никеля, а также марганца. Для рябины характерно поглощение значительных количеств меди и железа. В листьях тополя концентрируется преимущественно цинк и кадмий. Несмотря на то что береза выступает видом-накопителем тяжелых металлов, в условиях значительной антропогенной (или техногенной) нагрузки с целью максимального извлечения из биогеохимического

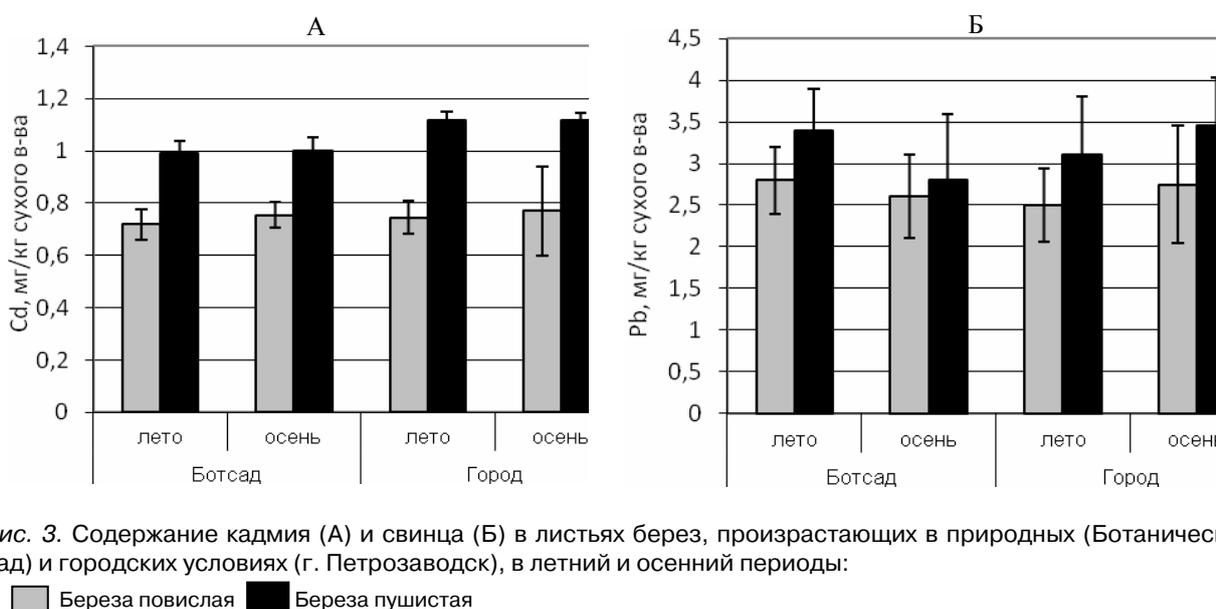


Рис. 3. Содержание кадмия (А) и свинца (Б) в листьях берез, произрастающих в природных (Ботанический сад) и городских условиях (г. Петрозаводск), в летний и осенний периоды:

■ Береза повислая ■ Береза пушистая

круговорота тяжелых металлов целесообразно создание искусственных посадок со смешанным видовым составом древесных растений.

Литература

Головки Т. К., Гармаш Е. В., Скугорева С. Г. Тяжелые металлы в окружающей среде и растительных организмах // Вестник ИБ Коми НЦ УрО РАН. 2008. № 7. С. 2–7.

Государственный доклад о состоянии окружающей среды Республики Карелия в 2006 году / Мин-во сельск., рыбн. хоз-ва и экологии Респ. Карелия; сост. А. Н. Громцев, О. Л. Кузнецов. Петрозаводск: ГУ РК «Издательский Дом «Карелия», 2007. 308 с.

Илькун Г. М. Загрязнители атмосферы и растения. Киев: Наукова думка, 1978. 246 с.

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

Копылова Л. В. Накопление тяжелых металлов в древесных растениях на урбанизированных территориях Восточного Забайкалья: автореф. дис. ... канд. биол. наук. Улан-Удэ, 2012. 24 с.

Костюк В. И. Устойчивость овса к тяжелым металлам. Апатиты: Изд-во Кольского научного центра РАН, 2009. 117 с.

Кулагин А. А., Шагиева Ю. А. Древесные растения и биологическая консервация промышленных загрязнителей. М.: Наука, 2005. 190 с.

Лурье А. А., Фокин А. Д., Касатиков В. А. Поступление цинка и кадмия в зерновые культуры из почвы, удобренной остатками сточных вод // Агрохимия. № 11, 1995. С. 80–92.

Минеев В. Г. Экологические проблемы агрохимии. Москва: МГУ, 1988. 199 с.

Никонов В. В., Лукина Н. В., Безель В. С. и др. Рассеянные элементы в бореальных лесах / Отв. ред. А. С. Исаев. М.: Наука, 2004. 616 с.

Прохорова Н. В., Матвеев Н. М., Павловский В. А. Аккумуляция тяжелых металлов дикорастущими и культурными растениями в лесостепном и степном Поволжье. Самара: Самар. ун-т, 1998. 97 с.

Тарабрин В. П. Устойчивость древесных растений в условиях промышленного загрязнения окружающей среды тяжелыми металлами // Взаимодействие между лесными экосистемами и загрязнителями. Таллин, 1982. С. 24–27.

Тарчевский В. В. Влияние дымогазовых выделений промышленных предприятий Урала на растительность // Растения и промышленная среда. Свердловск: Изд-во Урал. ун-та, 1964. С. 5–71.

Титов А. Ф., Таланова В. В., Казнина Н. М., Лайдинен Г. Ф. Устойчивость растений к тяжелым металлам. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2007. 172 с.

Черненко Т. В. Изучение березняков разнотравных в окрестностях металлургических комбинатов // Экология. 1986. № 6. С. 65–67.

Черненко Т. В. Реакция лесной растительности на промышленное загрязнение. М.: Наука, 2002. 191 с.

Adriano D. C. Trace Elements in the Terrestrial Environment. Springer Verlag. New York. 1986. 533 pp.

Clemens S. Molecular mechanisms of plant metal tolerance and homeostasis // Planta. 2001. Vol. 212. P. 475–486.

Hall J. L. Cellular mechanisms for heavy metal detoxification and tolerance // Journal of Experimental Botany. 2002. Vol. 53, N 366. P. 1–11.

Memon A. R., Aktoprakligil D., Ozdemir A., Vertii A. Heavy Metal Accumulation and Detoxification Mechanisms in Plants // Turk. J. Bot. 2001. Vol. 25. P. 111–121.

Piczak K., Sniewicz A., Zyrnicki W. Metal concentrations in deciduous tree leaves from urban areas in Poland // Environmental Monitoring and Assessment. 2003. Vol. 86. P. 273–287.

Rosselli W., Keller C., Boschi K. Phytoextraction capacity of trees growing on a metal contaminated soil // Plant and Soil. 2003. Vol. 256. P. 265–272.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

Ветчинникова Лидия Васильевна

рук. группы биотехнологии воспроизводства древесных растений, ведущий научный сотрудник, д. б. н. Институт леса Карельского научного центра РАН ул. Пушкинская, 11, Петрозаводск, Республика Карелия, Россия, 185910 эл. почта: vetchin@krc.karelia.ru тел.: (8142) 768160

Кузнецова Татьяна Юрьевна

Институт леса Карельского научного центра РАН ул. Пушкинская, 11, Петрозаводск, Республика Карелия, Россия, 185910 эл. почта: vetchin@krc.karelia.ru тел.: (8142) 768160

Титов Александр Федорович

председатель КарНЦ РАН, чл.-корр. РАН, д. б. н., проф. руководитель лаб. экологической физиологии растений, Институт биологии Карельского научного центра РАН ул. Пушкинская, 11, Петрозаводск, Республика Карелия, Россия, 185910 эл. почта: titov@krc.karelia.ru тел.: (8142) 769710

Vetchinnikova, Lidiya

Forest Research Institute, Karelian Research Centre, Russian Academy of Sciences 11 Pushkinskaya St., 185910 Petrozavodsk, Karelia, Russia e-mail: vetchin@krc.karelia.ru tel.: (8142) 768160

Kuznetsova, Tatiana

Forest Research Institute, Karelian Research Centre, Russian Academy of Sciences 11 Pushkinskaya St., 185910 Petrozavodsk, Karelia, Russia e-mail: vetchin@krc.karelia.ru tel.: (8142) 768160

Titov, Alexandr

Institute of Biology, Karelian Research Centre, Russian Academy of Sciences 11 Pushkinskaya St., 185910 Petrozavodsk, Karelia, Russia e-mail: titov@krc.karelia.ru tel.: (8142) 769710