

Некоторые закономерности в накоплении свинца растениями в условиях урбанизации (на примере г. Владивостока)

Н. С. ШИХОВА

Биолого-почвенный институт ДВО РАН
690022, Владивосток, просп. Столетия Владивостока, 159
E-mail: shikhova@ibss.dvo.ru

АННОТАЦИЯ

Изучены способности аккумулировать свинец 128 видов растений из 44 семейств и 28 родов дальневосточной флоры. Выявлен существенный размах варьирования в содержании свинца в ассимиляционных органах растений: 0,81–25,67 мг/кг воздушно-сухого вещества. Установлены основные закономерности в накоплении металла растениями разных систематических таксонов и биоморфологических групп. Выделены группы растений по интенсивности накопления свинца и определены виды-концентраторы металла. Рекомендованы виды, перспективные для фитоиндикации и фиторемедиации урбанизированной среды.

Ключевые слова: содержание свинца в растениях, урбанизированная среда, фитоиндикация химического загрязнения среды, геохимическая систематика растений, фиторемедиация.

Свинец на протяжении уже многих десятилетий является объектом пристального внимания ученых разных научных направлений как приоритетный загрязнитель среды и тест-элемент при оценке техногенных нагрузок, испытываемых биотическими и абиотическими компонентами экосистем. В связи с активным использованием металла в хозяйственной деятельности человечества на протяжении многих веков его техногенный поток постепенно все более превышает природные миграционные циклы. По данным В. В. Добровольского [1], годовая добыча Pb составляет 2400 тыс. т/год, в то время как вынос растворимых форм с речным стоком равен 37 тыс. т, а годовой захват растительностью суши – 430 тыс. т/год. В настоящее время особенно актуальны, на наш взгляд, вопросы безопасности жизнедеятельности и здоровья населения в городских агломерациях, где сформиро-

вались “рукотворные” геохимические аномалии свинца, по масштабам близкие природным.

По санитарно-гигиеническим нормативам свинец входит в группу наиболее токсичных элементов 1-й степени опасности. Все растворимые соединения Pb ядовиты.

Главными средостабилизирующими факторами, трансформирующими и консервирующими техногенные загрязнения как в природных, так и в антропогенно-преобразованных экосистемах, являются, как известно, основные биотические компоненты экосистем – растительность и почвы.

В настоящее время в отечественной и мировой литературе накоплен большой фактический материал по оценке экологического состояния и содержания тяжелых металлов в растениях и почвах разных городов России и мира [2–8 и др.]. Абсолютное большинство имеющихся данных отражает региональные

черты фитогеохимии и биологического круговорота тяжелых металлов. Во Владивостоке таких системных исследований ранее не проводилось, хотя современная экологическая ситуация в городе далека от оптимальной. Судя по имеющимся данным [9–11], экологическое состояние почв Владивостока соответствует умеренно опасной категории загрязнения с высоким содержанием целого ряда тяжелых металлов, в том числе свинца. Примерно 30 % площади селитебной зоны города в разной степени загрязнено свинцом. Имеются сведения [12] о превышении ПДК свинца и в воздушном бассейне города.

Несмотря на то что в последние десятилетия свинец является одним из самых популярных объектов исследований, его роль в жизни растений, механизмы поступления в ткани и ответные реакции организмов на избыточное содержание в среде до сих пор до конца не выяснены. Известно, что свинец как типичный рассеянный элемент присутствует во всех биотических и абиотических компонентах среды и входит в состав фитомассы всего видового разнообразия растений. Среднее содержание его в растительности суши для воздушно-сухой массы – $2,5 \times 10^{-4}$, живой фитомассы – $1,0 \times 10^{-4}$ % [13]. Для большинства видов растений концентрация свинца 5–10 мг/кг считается достаточной для нормального функционирования, 30–300 мг/кг – токсичной [14]. Известно, что большая часть видов по характеру накопления свинца в фоновых условиях произрастания относится к группе растений-исключителей, для которых характерно низкое содержание металлов в побегах независимо от высоких концентраций в окружающей среде. Большинство растений накапливает свинец в подземной части, основной способ его поглощения – пассивный, через корневую систему [14–16]. Поступивший в корень металл передвигается вплоть до эндодермы преимущественно по апопласту с разной скоростью в зависимости от химического состава клеточных оболочек. При накоплении в них может снижаться их пластичность и ингибировать рост растяжением. При летально высоком содержании свинца в почве решающим фактором его поступления в корни растений является сродство металла к клеточным стенкам,

при полулетальном – наличие физиологических барьеров [16, 17].

Из имеющейся научной литературы последних лет также известно, что свинец является сильным стресс-фактором, вынуждающим растения включать адаптационные механизмы выживания. Как отмечается в научном обзоре И. В. Серегина и В. Б. Иванова [16], токсичное действие свинца на метаболизм в основном подобно действию большинства тяжелых металлов и отличается соотношением затронутых процессов, а в ряде случаев (например, при ингибировании ряда ферментов) – и принципиально, по механизму действия. Свинец влияет на поглощение воды растениями, подавляет процессы фотосинтеза [18, 19]. Его повышенное содержание в тканях ведет к уменьшению содержания хлорофилла, функциональным нарушениям в пигментном комплексе, угнетению ростовых процессов, к снижению содержания витамина С и провитамина А [20], а также способно ингибировать дыхание, иногда способствовать увеличению содержания кадмия и снижению – цинка, кальция, фосфора и серы [21].

Цель исследований – оценить аккумулятивные способности высших растений по отношению к свинцу в условиях урбанизированной среды и экологического фона, выяснить специфику в накоплении свинца разными таксономическими и биологическими группами растений, определить устойчивость и толерантность доминантов фитоценозов к повышенному содержанию свинца в среде обитания, установить растения-концентраторы свинца и адекватные индикаторы экологического состояния городской среды.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

В работе представлена часть результатов многолетнего комплексного эколого-биологического мониторинга растительности городской агломерации Владивостока. Исследованиями разной степени детальности охвачена большая часть селитебной зоны (СЗ) города. В качестве эталонных условий местного экологического фона (МЭФ) выборочно обследовались наиболее типичные фитоценозы пригородной лесопарковой зоны (ЛЗ). Заложено 145 пробных площадей (п. п.) в городс-

ких насаждениях и 33 п. п. в природных лесах зеленой зоны города, на которых отобрано 1200 образцов растений и 200 – почв.

Пробы отбирали в сжатые сроки в конце июля – первой половине августа. Пробы листьев (хвои) отбирали с 5–10 экз. каждого древесного и кустарникового вида растений с четырех сторон кроны. Проба хвойных растений состояла в основном из 1–2(3)-летних хвоинок. У травянистых растений брали на анализ надземную часть. Кроме того, на каждой пробной площади срезали укосный травостой с 10 учетных площадок площадью 1 м², из которого после высушивания составляли смешанную пробу. Для оценки доли пылевой составляющей в балансе техногенного поступления элемента в растение часть пробы после отбора отмывали в дистиллированной воде. Анализ проб осуществлен атомно-абсорбционным методом в кислой вытяжке золы растений.

Одновременно на каждой пробной площади отбирали смешанный образец почвы из верхних горизонтов на глубину 10–15 см. Почвенные пробы после разложения смесью концентрированных кислот также анализировали атомно-абсорбционным методом на содержание валовых форм металлов.

По отношению содержания металла в растениях и соответствующей почве рассчитан коэффициент биологического поглощения (КБП) свинца.

В работе представлены и обсуждаются преимущественно результаты обследования древесно-кустарниковой растительности, имеющей приоритетное значение в балансе техногенных элементов в урбоэкосистемах. Общее число видов, оцененных по аккумулятивным способностям к свинцу, – 128, что соответствует 70 % установленного нами ранее [22] общего состава городской и 94 % лесопарковой дендрофлоры. Для городских насаждений это, как правило, виды широко (абсолютная встречаемость на пробных площадях > 25 %) и умеренно (встречаемость – 5–25 %) распространенные. В зависимости от встречаемости они представлены выборками из 1–105 проб.

Совокупность особей одного вида, обитающих в пределах СЗ, рассматривалась условно как зависимая городская популяция, ЛЗ – как природная популяция вида.

Полученные аналитические данные обработаны методами многомерного статистического анализа с помощью компьютерных программ Excel (пакет Data Analysis) и STATISTICA 6.0.

Для оценки интенсивности накопления свинца разными видами растений вся выборка данных была разбита на квартили, в соответствии с которыми выделены следующие группы видов: низкого (1-й квартиль); пониженного, или умеренно низкого (2-й квартиль); повышенного, или умеренно высокого (3-й квартиль); высокого (4 квартиль) содержания металла.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Полученные аналитические данные свидетельствуют о значительной изменчивости содержания свинца в ассимиляционных органах деревьев и кустарников городского озеленения: 1,24 (*Acer tegmentosum* Maxim.*) – 25,67 мг/кг воздушно-сухого вещества листьев (*Crataegus pinnatifida* С. К. Schneid.). Коэффициент вариации для выборки из 77 видов составляет 44 %. Обращает на себя внимание высокая внутривидовая вариативность содержания свинца во многих городских популяциях видов, достигающая максимально высоких значений у робинии (*Robinia pseudoacacia* L.) и сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.): 115 и 145 % соответственно. Оба вида являются интродуцентами с высокими перспективами натурализации в местных климатических условиях. При этом 57 % городских насаждений робинии относятся к умеренно, 41 % – сильно ослабленным; для сосны идентично – 27 и 58 %. У сосны к тому же отмечено 16 % усыхающих насаждений [22]. Для нее же зафиксирован на одной из пробных площадей и абсолютный максимум в накоплении Pb в городской растительности – 96,73 мг/кг.

Среднестатистическим уровням содержания свинца в ассимиляционных органах древесных растений ((11,50 ± 0,57) мг/кг) соответствуют его значения в листьях *Robinia pseudoacacia* L., *Aesculus hippocastanum* L., *Morus alba* L., *Sambucus racemosa* L., *Syringa*

* Названия растений приведены согласно сводке [23] с дополнениями для ряда видов инорайонной флоры по С. К. Черепанову [24].

vulgaris L., *Physocarpus opulifolia* (L.) Maxim., *Swida alba* (L.) Opiz, *Spiraea salicifolia* L. Все перечисленные виды, за исключением двух последних, являются для региона исследований интродуцированными. Два вида – робиния (*R. pseudoacacia*) и пузыреплодник (*P. opulifolia*) – широко представлены в городских посадках Владивостока. Пузыреплодник является доминантом кустарниковых насаждений (встречаемость – 34,8 %).

В группу растений с высоким содержанием свинца (мг/кг воздушно-сухого вещества листьев, хвои) вошли 18 древесных видов:

<i>Crataegus pinnatifida</i> Bunge	25,67
<i>Corylus heterophylla</i> Fisch. et Trautv.	24,38
<i>Microcerasus tomentosa</i> (Trunb.) Eremim et Jushev***	24,30
<i>Cerasus sargentii</i> (Rehd.) Pojark.	21,74
<i>Padus maackii</i> Mill.***	19,97
<i>Deutzia amurensis</i> (Regel) Airy Shaw	19,94
<i>Betula costata</i> Trautv.	19,79
<i>Crataegus maximowiczii</i> C.K.Schneid.	19,15
<i>Pinus koraiensis</i> Siebold et Zucc.	18,28
<i>Lonicera maackii</i> (Rupr.) Herd.***	18,22
<i>Philadelphus tenuifolius</i> Ropr. et Maxim.***	17,77
30 <i>Abies holophylla</i> Maxim.	17,17
<i>Euonymus pauciflora</i> Maxim.	16,56
<i>Euonymus maackii</i> Rupr.**	16,43
<i>Pinus sylvestris</i> L.**	16,22
<i>Weigela praecox</i> (Lemoine) Bailey ***	14,90
<i>Larix</i> sp.**	14,07
<i>Padus avium</i> Mill.	13,95

В видовом составе группы представлены большинство хвойных (за исключением ели), гортензиевые, 50 % видового состава бересклетовых, 40 % жимолостевых и 38 % розовых, отмеченных на пробных площадях СЗ. Почти половина состава группы по участию в городских насаждениях относится к видам умеренного распространения со средним*** или малым** обилием в урбофитоценозах. Для большинства из них (исключая *P. tenuifolius*) характерна высокая внутривидовая изменчивость в содержании свинца (59–145 %), что в какой-то мере может характеризовать эти виды как экологически пластичные к свинцовому загрязнению среды.

Группа повышенного (близко к среднему) содержания свинца (10,59–13,61 мг/кг сух. в-ва) представлена 20 видами, в том числе широко распространенными в городском озелене-

нии *Ulmus japonica* (Rehd.) Sarg., *Physocarpus opulifolia* (L.) Maxim., *Betula platyphylla* Sukacz., *Robinia pseudoacacia* L. В состав группы входят 7 из 13 опробованных на содержание свинца видов-интродуцентов, введенных в культуру. Кроме названных выше пузыреплодника и робинии к ним относятся: клен негундо (*Acer negundo* L.), тополь белый (*Populus alba* L.), шелковица белая (*Morus alba* L.), каштан конский обыкновенный (*Aesculus hippocastanum* L.), сирень обыкновенная (*Syringa vulgaris* L.).

Группа деревьев и кустарников с пониженным содержанием металла в листьях (8,46–10,53 мг/кг) объединяет 18 видов. Все они являются типичными представителями дальневосточной дендрофлоры, многие из них – основными лесобразующими породами хвойно-широколиственных лесов юга Российской Федерации: *Quercus mongolica* Fisch. ex Ledeb., *Fraxinus mandshurica* Rupr., *F. rhynchophylla* Hance, *Kalopanax septemlobus* (Thunb.) Koidz., *Phellodendron amurense* Rupr., *Juglans mandshurica* Maxim., *Alnus hirsuta* (Spach) Fisch. ex Rupr., *Populus koreana* Rehd., *P. tremula* L., *Armeniaca mandshurica* (Maxim.) B. Skvortz., *Acer mono* Maxim., *Pyrus ussuriensis* Maxim., *Malus mandshurica* (Maxim.) Kom., *Ligustrina amurensis* Rupr. и др. Ясень маньчжурский (*F. mandshurica*) с абсолютной встречаемостью на пробных площадях 58,6 % доминирует в зеленых насаждениях Владивостока: им сформированы 2/3 аллейных и рядовых посадок улиц и тротуаров. Широко распространен в городском озеленении ясень носолистный (*F. rhynchophylla*): его встречаемость в урбофитоценозах – 25,4 %.

К группе низкого содержания свинца относятся 20 видов, 13 из которых единично или редко представлены в городском озеленении (абсолютная встречаемость на пробных площадях 5 % и ниже*, мг/кг):

<i>Picea</i> sp.*	8,15
<i>Catalpa bignonioides</i> Walt.* (интр.)	8,03
<i>Spiraea ussuriensis</i> Pojark.*	7,99
<i>Forsythia suspensa</i> Vahl.* (интр.)	7,92
<i>Maackia amurensis</i> Rupr. et Maxim.*	7,86
<i>Syringa oblata</i> Lindl.(интр.)	7,77
<i>Acer ginnala</i> Maxim.	7,67
<i>Eleutherococcus senticosus</i> (Rupr. et Maxim.)*	7,45
<i>Populus maximowiczii</i> A. Henry *	6,96

<i>Sorbus pochuanensis</i> (Hance) Hedl.*	6,69
<i>Carpinus cordata</i> Blume	6,31
<i>Micromeles alnifolia</i> (Siebold et Zucc.) Koehne	5,95
<i>Corylus mandshurica</i> Maxim.*	5,84
<i>Lespedeza bicolor</i> Turcz.	5,64
<i>Fraxinus pennsylvanica</i> Marsh (интр.)	5,37
<i>Amorpha fruticosa</i> L.* (интр.)	5,14
<i>Aralia elata</i> (Miq.) Seem.*	5,10
<i>Acer pseudosieboldianum</i> (Pax) Kom	5,07
<i>Salix caprea</i> L.*	2,77
<i>Acer tegmentosum</i> Maxim.*	1,24

Большинство этих видов формирует внутриквартальное озеленение общественных учреждений и жилых микрорайонов с незначительными или умеренными антропогенно-техногенными нагрузками на экосистемы. В состав группы входят 5 видов-интродуцентов (интр.) с высоким жизненным статусом.

Сравнение полученных данных с имеющимися в научной литературе показало, что содержание свинца в растениях урбоэкосистем Владивостока значительно выше кларкового значения для растений суши [13] и близко к величинам, приведенным рядом авторов для зеленых насаждений столичных российских мегаполисов. Так, по данным разных авторов, в листьях (хвое) деревьев и кустарников зеленых насаждений г. Санкт-Петербурга содержится 0,88–28,80 [25] и 8,78–52,76 [6] мг/кг, древесных пород г. Москвы – 1,1–7,0 [26] и 2,5–11,0 [7] мг/кг свинца. При обследовании типичных посадок г. Иркутска, близкого по площади и количеству населения Владивостоку, обнаружены более низкие уровни содержания свинца [8]: хвоя лиственницы и сосны – 0,21–3,04 мг/кг, листья тополя и березы – 0,28–5,16 мг/кг.

В пригородных лесопарковых фитоценозах Владивостока (МЭФ) среднее содержание свинца в листьях (хвое) 79 обследованных видов деревянистых растений составляет $(6,45 \pm 0,49)$ мг/кг воздушно-сухого вещества, варьируя от 0,81 (*Armeniaca mandshurica*) до 15,07 мг/кг (*Rubus sachalinensis* Levl.). Абсолютный максимум в концентрации металла (24,61 мг/кг) отмечен на одной из пробных площадях у *Ribes mandshuricum* (Maxim.) Kom. Коэффициент вариации содержания Pb для общей выборки видов составляет 54 %. Значительно выше его вариабельность во внутрипопуляционных выборках, где она дости-

гает максимальных значений у *Maackia amurensis* (147 %), *Juglans mandshurica* (117 %), *Salix caprea* (102 %) и *Pinus koraiensis* (96 %). Высокая вариабельность (85 %) характерна также и для природных популяций доминанта лесопарковых фитоценозов *Quercus mongolica*: 1,40–20,11 мг/кг при среднем уровне 5,31 мг/кг воздушно-сухого вещества. Самым стабильным содержанием металла отличаются природные популяции *Deutzia amurensis* (9 %) и *Schisandra chinensis* (Turcz.) Baill. (10 %).

В условиях МЭФ группу растений с высоким содержанием свинца в ассимиляционных органах (9,07–15,06 мг/кг) образуют 19 видов деревянистых растений южной части Российского Дальнего Востока. Подобно условиям урбоэкосистем, она на 58 % видового состава сформирована из представителей семейств розовых (*Physocarpus amurensis* (Maxim.) Maxim., *Rubus crataegifolius* Bunge, *R. sachalinensis* Levl., *Sorbaria sorbifolia* (L.) A. Br., *Padus avium*), жимолостевых (*Lonicera maackii*, *L. caerulea* L., *Abelia coreana* Nakai) и бересклетовых (*Euonymus sacrosancta* Koidz., *E. macroptera* Rupr., *E. maximoviciana* Prokh.). Кроме того, к этой группе относятся *Ribes mandshuricum* (Maxim.) Kom., *Deutzia amurensis*, *Rhamnus davurica* Pall., *Corylus heterophylla*, два вида свободнойягодника – *Eleutherococcus sessiliflorus* (Rupr. et Maxim.) и *E. senticosus* и две типичные для хвойно-широколиственных лесов Приморья лианы – *Actinidia kolomikta* (Maxim.) Maxim. и *Vitis amurensis* Rupr. В своем абсолютном большинстве это кустарники или небольшие деревья.

Группа растений с низким уровнем свинца в ассимиляционных органах (0,81–3,75 мг/кг) в фоновых условиях объединяет 21 вид. Она на 2/3 состава представлена видами семейства березовых (*Alnus hirsuta* (Spach) Fisch. ex Rupr., *Betula costata*, *B. davurica* Pall., *B. platyphylla*), сосновых (*Abies holophylla*, *A. nephrolepis* (Trautv.) Maxim., *Pinus koraiensis*), розовых (*Armeniaca mandshurica*, *Malus mandshurica*, *Micromeles alnifolia*), ильмовых (*Ulmus lacinata* (Trautv.) Mayr, *U. pumila* L.) и маслиновых (*Fraxinus mandshurica*, *F. rhynchophylla*). Низкое содержание свинца отмечено также в листьях *Kalopanax septemlobus*, *Juglans mandshurica*, *Populus tremula*, *Acer*

barbinerve Maxim., *Celastrus flagellaris* Rupr., *Philadelphus schrenkii* Rupr. et Maxim., *Swida alba*.

В эту группу вошли почти все основные лесобразующие породы зональных хвойно-широколиственных лесов региона исследований. Для нее отмечена следующая закономерность. Если в условиях местного фона такие типичные для природных лесов региона древесные породы, как *Fraxinus mandshurica*, *F. rhynchophylla*, *Kalopanax septemlobus*, *Juglans mandshurica*, *Alnus hirsuta*, *Populus tremula*, *Armeniaca mandshurica*, по содержанию свинца в ассимиляционных органах соответствуют, согласно принятой в работе градации, группе низкого содержания, то в городских насаждениях они относятся уже к группе пониженного, *Betula platyphylla*, *B. davurica*, *Ulmus pumila* L. – повышенного, а *Abies holophylla* – даже высокого содержания металла.

Установлено, что как в условиях урбанизации, так и МЭФ черемуха обыкновенная (*Padus avium*), жимолость Маака (*Lonicera maackii*), дейция амурская (*Deutzia amurensis*) и лещина разнолистная (*Corylus heterophylla*) характеризуются наиболее высокими способностями аккумуляции свинца. Бузина кистистая (*Sambucus racemosa*) и таволга иволистная (*Spiraea salicifolia*) входят в группу повышенного (близкого к среднему) содержания Pb. Стабильно низким содержанием металла в сравниваемых условиях отличаются мелкоплодный ольхолистный (*Micromeles alnifolia*) и яблоня маньчжурская (*Malus manshurica*), пониженным – дуб монгольский (*Quercus mongolica*), бархат амурский (*Phellodendron amurense*) и трескун амурский (*Ligustrina amurensis*).

Среднее превышение свинца в ассимиляционных органах городских растений (для выборки из 34 одноименных видов, репрезентативно представленных в селитебной и лесопарковой зонах города) составляет 2,6 раза. Выше среднего зафиксированы надфоновые превышения металла в листьях *Populus tremula* (2,9), *Juglans mandshurica* (2,7), *Kalopanax septemlobus* (3,3), *Ulmus japonica* (3,3), *Alnus hirsuta* (3,7), *Betula davurica* (3,8) и *B. platyphylla* (5,3 раза) и др. Максимальная же аккумуляция свинца отмечена в хвое *Abies*

holophylla (6,6) и *Pinus koraiensis* (9,9), а также в листьях *Ulmus pumila* (7,2) и *Armeniaca mandshurica* (12,5 раза относительно МЭФ). В 4,9 раза интенсивнее концентрирует свинец в городских условиях доминант уличных насаждений – *Fraxinus mandshurica*, в 1,7 раза – *Quercus mongolica*, преобладающий в пригородных лесах.

Существенная вариабельность в накоплении свинца ассимиляционными органами деревьев и кустарников присуща и более высоким систематическим рангам растений (см. таблицу). В СЗ наибольший размах варьирования в содержании свинца отмечен среди видов семейств Aceraceae (коэффициент вариации – 60 %), Betulaceae (51 %), Rosaceae (46 %); в ЛЗ – Hydrangeaceae (76 %), Betulaceae (61 %), Rosaceae (56 %), Celastraceae (52 %). Концентрация свинца для большинства семейств городской растительности тоже значительно выше фоновых уровней металла и возрастает в следующем ранжированном ряду: Araliaceae (1,1 раза выше фона) → Celastraceae, Caprifoliaceae (1,5) → Salicaceae, Aceraceae, Fabaceae (1,6) → Fagaceae (1,7) → Rosaceae (2,0) → Tiliaceae, Rutaceae (2,3) → Oleaceae (2,4) → Hydrangeaceae, Betulaceae (2,6) → Juglandaceae (2,7) → Ulmaceae (4,3) → Cornaceae (5,0) → Pinaceae (5,4).

Высокая аккумуляция свинца хвойными породами в городских условиях объясняется рядом специфических свойств, присущих этой систематической группе растений. Известно, что продолжительность жизни хвои в природных условиях произрастания составляет от 2–3 у *Pinus sylvestris* до 8–10 (11) лет у *Picea ajanensis* (Lindl. et Gord.) Fisch. ex Carr. [27–29]. И хотя в городских условиях сроки жизни хвои значительно сокращаются, накопление загрязняющих веществ у хвойных происходит в течение нескольких лет, а не одного вегетационного сезона, как у листопадных пород. К тому же высокая ассимилирующая поверхность хвои, специфика биохимических и биофизических процессов у них способствуют высокой сорбции элементов-загрязнителей на поверхности хвои с последующим вовлечением их в биологический круговорот.

Коэффициент биологического поглощения, характеризующий вклад почвенной составля-

Содержание свинца (мг/кг) в листьях (хвое) растений разных семейств в условиях урбанизации (СЗ) и местного экологического фона (ЛЗ)

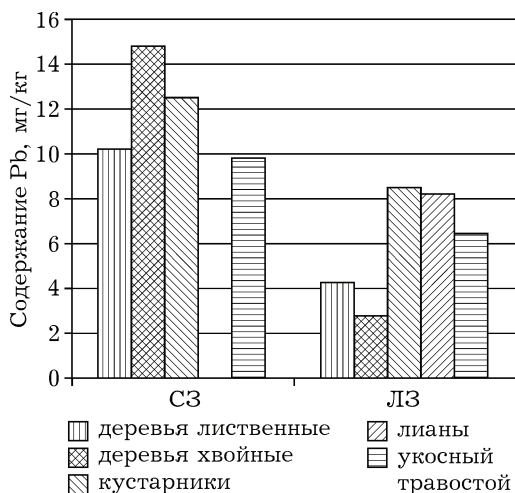
№ п/п	Семейства растений	СЗ				ЛЗ			
		<i>n</i>	<i>M</i>	min	max	<i>M</i>	min	max	
1	Aceraceae Juss.	5	7,18	1,24	12,45	4	4,52	3,23	5,80
2	Actinidiaceae Hutch.	–	–	–	–	3	8,95	8,11	10,30
3	Araliaceae Juss.	3	7,52	4,38	10,53	4	6,54	3,23	5,80
4	Berberidaceae Juss.	–	–	–	–	1	4,80	–	–
5	Betulaceae S.F. Gray	7	13,28	5,84	24,38	7	5,04	2,35	9,42
6	Bignoniaceae Rers.	1	8,03	–	–	–	–	–	–
7	Caprifoliaceae Juss.	5	12,91	9,43	18,22	8	8,78	5,84	14,60
8	Celastraceae Lindl.	4	12,76	8,78	16,56	5	8,69	1,09	12,07
9	Cornaceae Dumort.	1	11,71	–	–	1	2,36	–	–
10	Euphorbiaceae Juss.	–	–	–	–	1	7,90	–	–
11	Fabaceae Lindl. s. l.	4	7,55	5,14	11,54	2	4,65	3,99	4,37
12	Fagaceae Dumort.	1	8,98	–	–	1	5,31	–	–
13	Grossulariaceae Rers.	–	–	–	–	2	10,78	8,19	13,36
14	Hippocastanaceae Torr. et Gray.	1	11,34	–	–	–	–	–	–
15	Hydrangeaceae Dumort.	2	18,85	17,77	19,94	3	7,20	1,26	12,03
16	Moraceae Lindl.	1	11,66	–	–	–	–	–	–
17	Juglandaceae A. Rich.	1	8,67	–	–	1	3,21	–	–
18	Oleaceae Hoffm. et Link	9	9,21	5,37	13,61	4	3,90	2,02	5,80
19	Pinaceae Lindl.	5	14,78	8,15	18,28	3	2,73	1,84	3,75
20	Rhamnaceae Juss.	–	–	–	–	1	13,23	–	–
21	Rhododendroideae Drude	–	–	–	–	1	5,92	–	–
22	Rosaceae Juss.	16	13,88	5,95	25,67	13	6,93	0,81	15,06
23	Rutaceae Juss.	1	9,90	–	–	1	4,27	–	–
24	Salicaceae Mirb.	6	8,84	2,77	12,36	4	5,58	3,06	8,58
25	Shisandraceae Blume	–	–	–	–	1	8,85	–	–
26	Tiliaceae Juss.	2	10,76	10,59	10,92	3	4,70	3,99	5,82
27	Ulmaceae Mirb.	2	13,33	13,25	13,41	3	3,09	1,85	4,12
28	Vitaceae Juss.	–	–	–	–	1	12,36	–	–
	Среднее по семействам	20	11,057	1,24	25,67	25	6,411	2,36	13,23

П р и м е ч а н и е. *n* – количество видов в выборке, шт.; *M* – среднее арифметическое значение, min – минимальное значение, max – максимальное значение показателя.

ющей в общую сумму накопления химических элементов растениями, в условиях городской среды составляет в среднем для выборки 0,19 и варьирует по видам от 0,05 до 0,54 (коэффициент вариации – 50 %). Для группы растений с высоким содержанием свинца в листьях (хвое) зафиксированы максимальные значения коэффициента биологического поглощения – до 0,54 (*Padus taackii*). Отмечено закономерное снижение величины КБП среди выделенных групп видов (высокого, по-

вышенного, пониженного и низкого уровня содержания свинца в листьях и хвое): 0,28 > 0,18 > 0,17 > 0,13 соответственно.

В фоновых условиях такая тенденция сохраняется, однако наблюдается более интенсивное поглощение почвенного свинца видами растений, относящимися к группам высокого и повышенного его содержания в ассимиляционных органах. КБП снижается по группам видов следующим образом: 0,39 > 0,36 > 0,19 > 0,10. Его среднестатистическое



Содержание свинца в растениях разных биоморф в условиях жилой (СЗ) и лесопарковой (ЛЗ) зон г. Владивостока

значение для общей выборки растений составляет в данных условиях 0,24, вариабельность по видам – 0,02–0,89, коэффициент вариации – 66 %.

В городских условиях большой вклад в общий баланс элементов вносит пылевая составляющая. У доминанта городских насаждений *Fraxinus mandshurica*, произрастающего преимущественно в придорожных рядовых посадках, максимально подверженных пылевому загрязнению, на ее долю приходится в среднем 25 % от общего содержания металла в листьях. В целом же по выборке (44 пробные площади) она варьирует в весьма широком диапазоне значений: от 0 до 70 %. Для сравнения отметим, что в листьях доминанта пригородных лесов *Quercus mongolica* ее доля в среднем составляет 6 % и колеблется в зависимости от условий произрастания от 0 до 21 %.

В зависимости от уровня содержания свинца в анализируемых фракциях городской растительности (листья и хвоя древесных растений, надземная часть трав) выстраивается следующий возрастающий ряд жизненных форм растений (см. рисунок): травянистые растения < деревья лиственные < кустарники < деревья хвойные. В условиях экологического фона он принимает следующий вид: деревья хвойные < деревья лиственные < травянистые растения < кустарники ≤ лианы.

1. Проведенные исследования позволили оценить аккумулятивные способности к свинцу у 128 видов сосудистых растений из 44 семейств и 82 родов. В урбанизированной среде среднее содержание Pb в листьях (хвое) деревьев и кустарников составляет $(11,50 \pm 0,50)$ мг/кг с варьированием по видам от 1,24 (*Acer tegmentosum* Maxim.) до 25,67 мг/кг (*Crataegus pinnatifida*); в условиях местного экологического фона соответственно $(6,45 \pm 0,49)$ мг/кг и 0,81 (*Armeniaca mandshurica*) – 15,06 мг/кг (*Rubus sachalinensis*). Содержание металла в укосном травостое городских фитоценозов варьирует в пределах 3,99–24,72, лесопарковых – 3,09–13,85 мг/кг при средних значениях $(9,78 \pm 0,44)$ и $(6,46 \pm 0,67)$ мг/кг соответственно.

2. Наилучшие концентрационные способности к свинцу в условиях урбанизации (14,07–25,67 мг/кг воздушно-сухого вещества) показали умеренно распространенные в озеленении г. Владивостока *Padus maackii*, *Lonicera maackii*, *Microcerasus tomentosa*, *Philadelphus tenuifolius*, *Weigela praecox*, а также редкие в городских посадках хвойные породы и *Crataegus pinnatifida*. Высокие сорбционные способности к данному загрязнителю среды (до 13,61 мг/кг) обнаружены также у *Ulmus japonica*, *U. pumila*, *Betula platyphylla* и многих видов-интродуцентов (*Acer negundo*, *Populus alba*, *Morus alba*, *Aesculus hippocastanum*, *Syringa vulgaris*), в том числе широко распространенных в посадках *Physocarpus opulifolia* и *Robinia pseudoacacia*. Перечисленные виды, особенно древесные породы с большими кронами и значительной зеленой фитомассой, в наибольшей степени подходят для целей биологической ремедиации урбоэкосистем.

Невысоким накоплением металла (до 10,53 мг/кг) характеризуется большинство типичных пород хвойно-широколиственных лесов Дальнего Востока, представленных в озеленении Владивостока (*Quercus mongolica*, *Fraxinus mandshurica*, *F. rhynchophylla*, *Kalopanax septemlobus*, *Phellodendron amurense*, *Juglans mandshurica*, *Alnus hirsuta*, *Populus koreana*, *Armeniaca mandshurica*, *Pyrus ussuriensis*, *Ligustrina amurensis* и др.). Слабо поглощают Pb интродуценты, формирующие

чаще всего внутриквартальное озеленение: *Forsythia suspensa*, *Catalpa bignonioides*, *Syringa oblata*, *Amorpha fruticosa*.

В условиях МЭФ максимальное накопление свинца (до 15,06 мг/кг) зафиксировано у ряда кустарников (большинство опробованных видов р. *Euonymus*, *Corylus heterophylla*) и лиан (*Actinidia kolomikta*, *Vitis amurensis*). Основные лесобразующие породы пригородных лесов отличаются низким содержанием свинца в листьях и хвое: 0,81–5,68 мг/кг воздушно-сухого вещества.

3. Среди семейств наилучшие аккумулятивные способности к свинцу отмечены в условиях урбанизированной среды у *Ulmaceae*, *Rosaceae*, *Pinaceae*, *Hydrangeaceae*, в природно-фоновых условиях – у *Caprifoliaceae*, *Shisandraceae*, *Actinidiaceae*, *Grossulariaceae*, *Vitaceae*, *Rhamnaceae*.

4. Городская растительность в среднем в 2,6 раза богаче свинцом, чем растения МЭФ. Максимальные надфоновые превышения металла зафиксированы у *Abies holophylla* (6,6 раза), *Pinus koraiensis* (9,9), *Ulmus pumila* (7,2) и *Armeniaca mandshurica* (12,5). Почти 5-кратное превышение свинца в листьях отмечено у доминанта урбофитоценозов *Fraxinus mandshurica*.

5. В качестве фитоиндикаторов уровня загрязнения урбоэкосистем свинцом в региональных условиях южной части Российского Дальнего Востока рекомендуется использовать следующие виды: *Padus maackii*, *Betula platyphylla*, *Ulmus japonica*, *Robinia pseudo-acacia*, *Physocarpus opulifolia*, показавшие хорошие сорбционные способности и толерантные возможности к Pb и широко представленные в городском озеленении. В меньшей степени этими качествами обладают *Fraxinus mandshurica*, *F. rhynchophylla*, *Ulmus pumila*, *Tilia amurensis*, *Swida alba*.

Для индикации почвенного загрязнения среды по предварительным данным наиболее подходят *Ulmus japonica*, *Betula platyphylla*, *Fraxinus pennsylvanica*, *Armeniaca mandshurica* и *Physocarpus opulifolia*, отвечающие как необходимым для этих целей безбарьерным типом накопления металла ассимиляционными органами, так и прочими перечисленными выше качествами фитоиндикаторов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Добровольский В. В. Основы биогеохимии. М.: Высш. шк., 1998. 413 с.
2. Почвы, город, экология / под общей ред. акад. РАН Г. В. Добровольского. М.: Фонд за экологическую грамотность, 1997. 320 с.
3. Breuste J., Feldmann H., Uhlmann O. Urban Ecology. Germany; Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 1998. 714 p.
4. Craul P. J. Urban Soils: applications and practices. New York: John Wiley and Sons, 1999. 366 p.
5. Ильин В. Б., Сысо А. И. Микроэлементы и тяжелые металлы в почвах и растениях Новосибирской области. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2001. 229 с.
6. Уфимцева М. Д., Терехина Н. В. Фитоиндикация экологического состояния урбогеосистем. СПб.: Наука. Ленингр. отд-ние, 2005. 339 с.
7. Якубов Х. Г. Экологический мониторинг зеленых насаждений Москвы. М.: ООО "Стагирит-Н", 2005. 264 с.
8. Шергина О. В., Михайлова Т. А. Состояние древесных растений и почвенного покрова парковых и лесопарковых зон г. Иркутска. Иркутск: Изд-во Инта географии СО РАН, 2007. 200 с.
9. Старов О. Г., Бураго А. И., Цой Б. В. Оценка степени загрязнения среды г. Владивостока по геохимическим данным // Эколого-геохимическая оценка городов различных регионов страны. М., 1991. С. 66–70.
10. Бураго А. И., Шлыков С. А. Химическое загрязнение почв. 1998. URL: http://www.fegi.ru/ecology/vlad_sit/sit_chem.htm
11. Государственный доклад "О состоянии окружающей природной среды Российской Федерации в 1998" / Web. версия Государственного доклада с редакционными правками подготовлена Информационно-техническим центром Госкомэкологии России / Copyinght © 1999. Государственный комитет Российской Федерации по охране окружающей среды.
12. Свиныхов Г. В., Свиныхов В. Г., Кондратьев И. И. Исследование и краткосрочный прогноз загрязнения воздуха в городах Приморского края. Владивосток: Изд-во Дальневосточного ун-та, 1993. 104 с.
13. Добровольский В. В. География микроэлементов: Глобальное рассеяние. М.: Мысль, 1983. 272 с.
14. Кабата-Пендис А., Пендис Х. Микроэлементы в почвах и растениях: пер. с англ. М.: Мир, 1989. 439 с.
15. Петрунина Н. С. Геохимическая экология растений в провинциях с избыточным содержанием микроэлементов (никеля, кобальта, меди, свинца и цинка) // Проблемы геохимической экологии организмов: тр. Биогеохимической лаб. 1974. Т. XIII. С. 57–117.
16. Серегин И. В., Иванов В. Б. Физиологические аспекты токсического действия кадмия и свинца на высшие растения // Физиология растений. 2001. Т. 48. № 4. С. 606–630.
17. Серегин И. В., Иванов В. Б. Передвижение ионов кадмия и свинца по тканям корня // Физиология растений. 1998. Т. 45, № 6. С. 899–905.
18. Zimdahl R. I. Entry and movement in vegetation of lead derived from air and soil sources // J. Air. Pollut. Contr. Assoc. 1976. Vol. 26, N 7. P. 655–660.
19. Koepe D. E. The uptake distribution and effect of cadmium and lead in plant // Sci. Total Environ. 1977. Vol. 7, N. 3. P. 197–206.

20. Матвеев Н. М., Павловский В. А., Прохорова Н. В. Экологические основы аккумуляции тяжелых металлов сельскохозяйственными растениями в лесостепном и степном Поволжье. Самара: Изд-во Самарского ун-та, 1997. 100 с.
21. Ягодин Б. А., Говорина В. В., Виноградова С. Б. и др. Накопление кадмия и свинца некоторыми сельскохозяйственными культурами на дерново-подзолистых почвах разной степени окультуренности // Изв. ТСХА. 1995. Вып. 2. С. 85–98.
22. Шихова Н. С., Полякова Е. В. Деревья и кустарники в озеленении города Владивостока. Владивосток: Дальнаука, 2006. 236 с.
23. Сосудистые растения советского Дальнего Востока: в 8-ми томах / под ред. С. С. Харкевич. Л.-СПб.: Наука. Ленингр. отд-ние, 1985–1996.
24. Черепанов С. К. Сосудистые растения России и сопредельных государств (в пределах бывшего СССР). СПб.: Мир и семья, 1995. 992 с.
25. Парибок Т. А. и др. Накопление свинца в городских растениях // Ботан. журн. 1981. Т. 66, № 11. С. 1646–1654.
26. Обухов А. И., Лепнева О. М. Биогеохимия тяжелых металлов в городской среде // Почвоведение. 1989. № 5. С. 65–73.
27. Усенко Н. В. Деревья, кустарники и лианы Дальнего Востока. Хабаровск: Хабаровское кн. изд-во, 1984. 272 с.
28. Манько Ю. И. Ель на Дальнем Востоке. М.: Наука, 1987. 280 с.
29. Козина Л. В. Метаболизм фотоассимилятов и передвижение веществ у хвойных. Владивосток: Дальнаука, 1995. 129 с.

Some Features of Lead Accumulation in Plants Under the Urban Conditions (for Vladivostok as Example)

N. S. SHIKHOVA

*Biological Soil Institute FEB RAS
690022, Vladivostok, Stoletiya Vladivostoka ave., 159
E-mail: shikhova@ibss.dvo.ru*

The ability of 128 plant species from 44 families and 28 genera of the Far East flora to accumulate lead was investigated. A substantial range of deviation was revealed for lead content in the assimilative organs of plants: 0,81–25,67 mg/kg of the dry matter. The major regularities of metal accumulation in the plants of different systematic taxons and biomorphological groups were established. Plants were grouped on the basis of the intensity of lead accumulation, and metal concentrating species were determined. Species promising for phytoindication and phytoremediation of the urban environment are recommended.

Key words: lead content in plants, urban environment, phytoindication of chemical pollution of environment, geochemical plant taxonomy, phytoremediation.