

УДК 574.24: 581.5 + 577.18

С. В. Горелова, М. В. Фронтасьева, А. В. Горбунов
С. М. Ляпунов, Е. Г. Мочалова, О. И. Окина

БИОГЕОХИМИЧЕСКАЯ АКТИВНОСТЬ ГОЛОСЕМЕННЫХ ИНТРОДУЦЕНТОВ В УСЛОВИЯХ ПРОМЫШЛЕННО РАЗВИТЫХ УРБАНИЗИРОВАННЫХ ЭКОСИСТЕМ

92

Представлены данные по биогеохимической активности 9 видов голосеменных интродуцентов в модельной урбанизированной экосистеме с высоким уровнем техногенного загрязнения (Нечерноземная полоса России). Приведены данные по биогеохимической активности наиболее распространенных видов голосеменных интродуцентов (туя западная (*Thuja occidentalis*), можжевельник казацкий (*Juniperus sabina*), ель колючая (*Picea pungens*)) в условиях воздействия полиметаллического загрязнения почв и воздуха в районе воздействия металлургических предприятий. Показано, что большинство изученных голосеменных аккумулируют такие макроэлементы, как К, Са, Сl. Туя западная является аккумулятором V, Cr, Fe, Ni, As в районе воздействия металлургических предприятий и чувствительна к компонентам выбросов. Концентрация Ni в органах туи при полиметаллическом загрязнении снижается. Ель колючая аккумулирует железо в районе воздействия металлургических предприятий, способна накапливать Cr, Fe, Ni, Zn в побегах при воздействии автотранспортной эмиссии. Можжевельник казацкий, туя западная, тис ягодный могут аккумулировать значительные количества V, Cr, Fe, Ni, As в вегетативных органах.

This paper presents data on the biogeochemical activity of 9 exotic gymnosperm species in a model urban ecosystem with a high level of anthropogenic pollution (Russia's Non-Black Earth zone). The author examines data on the biogeochemical activity of *Thuja occidentalis*, *Juniperus sabina*, and *Picea pungens* in the conditions of polymetallic contamination of air and soils in the area affected by iron and steel plants. It is shown that most Gymnospermae species accumulate such macroelements as K, Ca, and Cl. *Thuja occidentalis* accumulates V, Cr, Fe, Ni, and As in the area affected by iron and steel plants and is sensitive to emissions. The Ni concentration in the organs of *Thuja* is reduced in the conditions of polymetallic pollution. *Picea pungens* can accumulate iron in the area affected by iron and steel plants; its shoots can also accumulate Cr, Fe, Ni, Zn when affected by transport emissions. *Juniperus sabina*, *Thuja occidentalis*, and *Taxus baccata* accumulate significant amounts of V, Cr, Fe, Ni and As in vegetative organs.

Ключевые слова: древесные интродуценты, голосеменные, макроэлементы, тяжелые металлы, биоаккумуляция, урбанизированные экосистемы.

Key words: exotic tree species, gymnosperms.



Введение

Основными организмами, обеспечивающими приток кислорода в городских экосистемах и синтез органического вещества, являются древесные и травянистые растения, при этом древесные отличаются большей продуктивностью. Кроме основных они выполняют ряд других, важных для экологии урбоэкосистем функций: аккумулируют пылевые аэротехногенные выбросы, выполняя роль биофильтров, увлажняют воздух, задерживают ветер, поглощают шум, ряд токсичных газов, снижают температуру воздуха в жаркие летние дни, образуют тенистые участки в рекреационных зонах, выделяют фитонциды. В области умеренного климата, где расположена значительная часть территории Российской Федерации, включая Нечерноземную зону России, в зимний период основными продуцентами остаются голосеменные растения. Именно поэтому их роль в городских ценозах очень велика. Большинство видов древесной флоры урбанизированных территорий – интродуценты, поскольку виды синантропной флоры оказываются менее устойчивыми к неблагоприятным факторам среды [2; 4–6; 14]. В связи с интенсификацией озеленительных работ в современных городах и одновременным возрастанием техногенной нагрузки на биоту возникает необходимость изучения адаптации видов и декоративных форм интродуцентов к условиям урбанизированной среды, а также их биогеохимической активности с целью разработки практических рекомендаций по их применению в зеленом строительстве [2; 3].

Объекты и методы исследования

В качестве модельной урбанизированной экосистемы выбран г. Тула – центр области, расположенной в центральной части Среднерусской возвышенности, и граничащей с Московской, Рязанской, Орловской, Липецкой и Калужской областями. Город характеризуется мощной транспортной и промышленной инфраструктурой. На его территории расположены предприятия машиностроительной, химической, оборонной, топливно-энергетической и металлургической промышленности.

Объектами исследования стали 9 видов древесных интродуцентов отдела *Gymnospermae* трех ботанических семейств:

– сосновые: *Picea pungens* Engelm. f. «*Glauka*»; *Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco; *Pinus mugo* Turra (*Pinus montana* Mill.);

– кипарисовые: *Thuja occidentalis* L. и сорта: «*Globosa*», «*Smaragd*»; *Juniperus sabina* L.; *Juniperus scopulorum* Sarg. «*Skyrocket*»; *Juniperus horizontalis* Moench. f. «*Aureospicata*»; *Chamaecyparis pisifera* (Siebold Zucc.) Endl.;

– тисовые: *Taxus baccata* L.

Изучение биогеохимических особенностей голосеменных во всех точках пробоотбора проведено на наиболее распространенных в урбоэкосистеме видах.



Пробоотбор, пробоподготовка, методы анализа

Пробоотбор производили в санитарно-защитных насаждениях предприятий металлургического комплекса г. Тулы и вдоль транспортных автомагистралей города: I точка пробоотбора (ТПр) – ОАО «Косогорский металлургический завод» (КМЗ) (производство ферромарганца); II точка – комплекс предприятий ОАО СП АК «Тулачермет», ОАО «Ванадий» (Тулачермет) (производство чугуна, ванадия, хрома); III точка (автодороги) – вдоль городских автодорог с интенсивным движением транспорта (проспекты Ленина, Красноармейский) и в рекреационной зоне университета (ТППУ). За условно чистую (фоновую, или контрольную) зону (УЧЗ) принята территория Центрального парка культуры и отдыха им. П. П. Белоусова. Расстояние между точками I и контроль – 2–3 км, II и контроль – 5–6 км. Удаленность санитарно-защитных насаждений от источников аэрозольных выбросов составляла 30–400 м в зоне воздействия металлургических производств и 3–7 м у автодорог.

94

Отбор основных проб растительного материала проводили во 2–3-й декаде июля, в период активной вегетации в нижней части кроны деревьев с внешней ее стороны по диаметру кроны (с разных сторон света), в средней части кроны у кустарников, так как установлено, что эти пробы характеризуются наличием большего количества элементов [1; 10]. Отбирали побеги 1–2-го года жизни на расстоянии 1–2 м от поверхности грунта. Средняя проба составлялась не менее чем из 10 частных проб (по 3–5 ветвей с 3–5 экземпляров).

Пробы трижды промывались проточной и дважды дистиллированной водой, подсушивались в лабораторных условиях (температура – 20–25 °С), а затем доводились до воздушно-сухого состояния в сушильном шкафу при температуре 60 °С. Хвоя отделялась от побегов в тех случаях, когда это было возможно. В остальных случаях (туя западная, можжевельник казацкий) анализировались побеги вместе с хвоей.

Пробы пакетировались, нумеровались и маркировались. Впоследствии совокупность проб растительного материала каждого вида или сорта (не менее 5) усреднялась и измельчалась на измельчителе *Siemens*.

Параллельно с пробоотбором растительных образцов осуществлялся сбор образцов почвы в опытных и фоновой зоне по стандартной методике согласно ГОСТу 17.4.3.01-83 (СТ СЭВ 3847-82). Глубина пробоотбора – 0–20 см. Отбор проб проводился методом «конверта», путем осреднения материала не менее 4–5 частных проб. Пробы высушивались до воздушно-сухого состояния, просеивались через сито с диаметром отверстий 1 мм и истирались [8; 15].

Ниже в тексте и таблицах приведены средние данные по содержанию элементов.

Анализ содержания элементов в образцах почв проводился рентгеноспектральным методом в лаборатории химико-аналитических иссле-



дований Геологического института РАН (ГИН РАН) с использованием последовательного волнового XRF-спектрометра «S4 Pioneer» Bruker AXS. Обработка полученных результатов осуществлялась с помощью пакета программ «S4 Spectra Plus». Атомно-абсорбционный анализ осуществлялся также в лаборатории ГИН РАН с помощью атомно-абсорбционного спектрометра «Квант-2А» (Москва, КОРТЭК), укомплектованного дейтериевым корректором неселективного поглощения и соответствующими лампами полого катода; определение тяжелых металлов в образцах проводили в соответствии с требованиями стандартизованных методик [15]. Определение Zn, Pb, Cu и Cd проводили в пламени «пропан-воздух», Fe, Mn и Ni – в пламени «ацетилен-воздух». В качестве образцов сравнения анализа применялись стандартные образцы состава IAEA-SOIL-7, IAEA-336 (Lichen), SRM 1572 (Citrus Leaves), SRM 1575 (Pine Needles).

ИНАА проводился на импульсном реакторе ИБР-2 в ЛНФ ОИЯИ (г. Дубна) с использованием активации тепловыми нейтронами наряду с полным энергетическим спектром. Процедура пробоподготовки, анализ гамма-спектров наведенной активности и расчет концентраций элементов подробно описаны в обзоре [27]. Аттестованные эталонные материалы Pine Needles (иглы сосны, NIST) облучались и измерялись вместе с образцами.

Ошибка определения Na, K, Cl, As, Sr, Fe, Co, Pb лежала в пределах 5–15 %; V, Ni, Cu, Se, Mo, Cd, Sb – до 30 %.

Оценка жизненного состояния древесных растений проводилась по шкале, разработанной и приведенной в монографии Т. В. Черненко-вой [19].

Результаты и обсуждение

В ходе исследования выявлено, что полиэлементными аномалиями характеризовались почвы 22 точек пробоотбора (ТПр) – около 40 % городских почв. Основные элементы-загрязнители городских почв: Mn (1 ТПр до 50 % выше ПДК), Fe (повсеместно высокая валовая концентрация), Cu (17 ТПр от 17 % к ПДК до 3–6 раз), Zn (15–62 % к ПДК в 20 ТПр), As (в 27 ТПр на 36–62 % к верхней границе ПДК), Pb (9 ТПр на 10–50 % выше ПДК) [7; 16].

В образцах почвы опытных зон отмечено превышение ПДК (ОДК) по ряду элементов: **Mn** (в 2 раза), **Pb** (в 1,5 раза), **Zn** (в 2 раза) – в точке пробоотбора I (КМЗ); **Zn**, **As** (в 1,5 раза) – в точке пробоотбора II («Тулачермет»). Высоким содержанием Cu, Zn, As отличались улицы города вдоль основных автомагистралей Тулы (точка пробоотбора III). Валовые концентрации элементов превышали ПДК в 1,5 раза. Все опытные зоны характеризуются высоким содержанием Fe, в 1,5–2 раза (2510–5940 мг/кг), превышающим его наличие в фоновой зоне.

Поскольку для растительности не существует разработанных ПДК и данные по составу элементов в разных работах сильно различаются в



зависимости от применяемых методик и пробоподготовки [2; 11–14; 19; 25] (некоторые исследования выполнены на неотмытом растительном материале), при определении биогеохимических особенностей растений сравнение проводили со средними данными, полученными для растительности и опубликованными в работе Б. Маркерта [26].

Известно, что хвойные растения являются эффективными биоаккумуляторами пыли и тяжелых металлов [2; 12–14]. Изучение самого распространенного интродуцента отдела *Gymnospermae* – туи западной – в условиях санитарно-защитных зон предприятий металлургической промышленности показало, что вид восприимчив к компонентам промышленных выбросов и в зависимости от их качественного состава реагирует по-разному. Например, при воздействии полиметаллического загрязнения почв и воздушной среды происходит усиление накопления в хвое таких макроэлементов, как Na (в 2–25, раза больше, чем в контроле) и Ca (на 16–85 %) (табл. 1). В условиях воздействия полиметаллического загрязнения воздуха и почв происходит снижение накопления такого важного элемента, как Mg, который входит в состав молекулы хлорофилла и выступает активатором ряда ферментативных процессов. Одновременно содержание Ca в побегах может уменьшаться (ТПр КМЗ), снижается устойчивость вида к неблагоприятным факторам среды. Все это отражается на общей жизнеспособности вида, приводит к развитию хлоротических процессов в хвое и дальнейшему некрозу части побегов.

Таблица 1

Воздействие предприятий металлургической промышленности на аккумуляцию макроэлементов в побегах и хвое туи западной *Thuja occidentalis*, мг/кг сухого вещества

Место пробоотбора	Образец	Na	Mg	Cl	K	Ca
ЦПКиО	побеги с хвоей	45	338	2310	3670	19200
	побеги	69	200	1960	3530	22000
Тулачермет	побеги с хвоей	136	183	2100	5290	35900
	побеги	119	66	1430	3580	25400
КМЗ	побеги с хвоей	102	278	885	4490	22400
	побеги	73	91	470	3050	12500
РР		150	200	200	1900	1000

На жизнеспособности вида может отражаться и тот факт, что туя способна аккумулировать большое количество хлора, при этом фактор переноса (ТФ) элемента из почв может колебаться от 1 до 9,2 (табл. 2). Это нужно учитывать при культивировании туи в городских условиях. Накопление хлора при внесении солей на лед и последующем таянии и загрязнении почв может стать причиной выпадения вида из зеленых насаждений, особенно в условиях сильной засухи в летний период.



Таблица 2

**Коэффициент биологической аккумуляции K_b (фактор переноса ТФ)
макроэлементов в туе западной, произрастающей
в зоне воздействия металлургических предприятий**

Место пробоотбора	Образец	Na	Mg	Cl	K	Ca
УчЗ	Побеги с хвоей	0,009	0,098	9,2	0,19	1,8
	Побеги	0,014	0,058	7,8	0,18	2,1
Тулачермет	Побеги с хвоей	0,036	0,063	9,2	0,43	1,4
	Побеги	0,032	0,023	6,2	0,29	1,0
КМЗ	Побеги с хвоей	0,030	0,021	1,8	0,37	0,5
	Побеги	0,021	0,007	1,0	0,25	0,3

97

В целом аккумуляция таких макроэлементов, как Na и Mg, хвоей и побегами туи лежит в пределах средних данных для растительности суши, но накопление Cl, K, Ca превышает значения для РР в 1,5–4,5; 1,5–2,7; 12–35 раз соответственно (см. табл. 1). Голосеменные, в частности туя, показывают высокое сродство к таким элементам, как кальций и хлор: фактор переноса из почвы в растения для этих элементов в норме выше единицы и колеблется от 0,5 до 1,8 для кальция и от 1 до 9,2 для хлора (табл. 2). При полиметаллическом загрязнении почв в условиях действия металлургических производств биологическая аккумуляция кальция снижается в 2–3 раза, что может приводить к снижению устойчивости вида.

Данные, полученные в ходе проведения исследований, показали, что биоаккумуляция Mn, Co, Cu, Zn в *Thuja occidentalis* лежит в пределах средних данных для растительности и составляет 13–178; 0,08–0,1; 3,2–3,8; 12–18 мг/кг сухого вещества соответственно (табл. 3). При этом содержание марганца в хвое и побегах туи увеличивается при загрязнении воздуха и почв этим элементом (ТПр КМЗ) в 1,5–2 раза. Содержание меди и цинка в побегах и охвоенных побегах туи остается стабильным и не зависит от состава почв и атмосферных загрязнений. Однако содержание таких тяжелых металлов, как V, Cr, Fe, As, значительно возрастает при техногенном загрязнении почв. При этом проявляется чувствительность к конкретным компонентам выбросов: так, содержание ванадия в районе воздействия комплекса металлургических предприятий «Ванадий» и «Тулачермет» возрастает по сравнению с контролем в 2–3 раза; а содержание марганца – в 1,5–2 раза в ТПр КМЗ, где производится ферромарганец. Так как железо является общим компонентом – загрязнителем почв, его содержание в побегах и хвое увеличивается в 3–8 раз по отношению к контролю. В выполненных нами ранее исследованиях показано, что большинство древесных растений аккумулирует железо в большом количестве при высоком содержании его в почве и атмосфере [21–24]. Настоящими исследованиями установлено, что представители голосеменных – не исключение.



Таблица 3

**Воздействие предприятий металлургической промышленности
на биогеохимическую активность туи западной *Thuja occidentalis*
в отношении микроэлементов, мг/кг сухого вещества**

Точка пробоотбора	Образец	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	As	Se	Sr	Mo	Cd	Sb
ЦПКиО	побеги с хвоей	0,8	1,7	87	411	0,08	5,4	3,8	15	0,05	0,086	93	0,05	0,11	0,05
	Побеги	1,4	2,2	30	654	0,10	2,8	3,2	18	0,07	0,063	43	0,03	0,34	0,07
Тулачермет	побеги с хвоей	5,3	6,3	32	2930	0,08	2,7	3,5	18	0,46	0,136	107	0,92	<0,1	0,07
	Побеги	4,9	4,5	13	2510	—	1,7	3,4	12	0,55	0,122	37	0,38	<0,1	0,04
КМЗ	побеги с хвоей	0,7	3,9	178	3240	—	2,9	3,5	17	0,39	0,266	136	0,11	<0,1	0,15
	Побеги	0,6	3,4	116	2870	—	1,8	3,4	14	0,35	0,265	47	0,06	<0,1	0,08
RP		0,5	1,5	200	150	0,2	1,5	10	50	0,1	—	50	0,5	0,05	0,10

98

Туя реагирует на полиметаллическое загрязнение почв снижением концентрации никеля в надземных органах. Известно, что ионы Cu, Fe, Zn могут тормозить поглощение никеля корнями [20]. По-видимому, в данном случае проявляется антагонизм ионов и действие эндодермального барьерного механизма корневой системы, так как этот элемент наиболее токсичен для растений. Включаются защитные механизмы, приводящие к снижению поступления никеля в растение, что обусловлено задержкой этого элемента в местах перфораций [18].

С точки зрения устойчивости растений к стрессу важен тот факт, что в зоне воздействия металлургических производств у туи возрастает содержание Se и Mo (см. табл. 3, 4). При этом в 1,5–2 раза выше по сравнению с УЧЗ трансфер-фактор переноса селена из почв. Оба эти элемента участвуют в работе антиоксидантной системы растений. Молибден участвует в обмене низкомолекулярного антиоксиданта — аскорбиновой кислоты, которая важна на первых этапах развития стресс-реакции. Таким образом, регуляция биогеохимического состава также помогает растению справляться со стрессом, возникающим при повышении поступления комплекса тяжелых металлов из почв (табл. 4).

Таблица 4

**Коэффициент биологической аккумуляции K_b (фактор переноса TF)
микроэлементов в тве западной в условиях воздействия предприятий
металлургической промышленности**

Место пробоотбора	Образец	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Zn	As	Se	Sr	Mo	Cd	Sb
ЦПКиО	побеги с хвоей	0,014	0,024	0,138	0,014	0,007	0,21	0,10	0,009	0,17	0,85	0,05	0,11	0,048
	побеги	0,023	0,031	0,033	0,027	0,009	0,11	0,12	0,012	0,12	0,40	0,03	0,34	0,064
Тулачермет	побеги с хвоей	0,042	0,076	0,034	0,027	0,009	0,08	0,21	0,072	0,26	0,92	0,48	0,00	0,098
	побеги	0,039	0,054	0,014	0,023	0,000	0,05	0,14	0,085	0,23	0,32	0,20	0,00	0,050
КМЗ	побеги с хвоей	0,012	0,068	0,010	0,059	0,000	0,07	0,04	0,028	0,46	0,69	0,03	0,00	0,043
	побеги	0,010	0,058	0,007	0,053	0,000	0,04	0,04	0,025	0,45	0,24	0,02	0,00	0,021



Исследование биогеохимической активности ели колючей и можжевельника казацкого в зоне воздействия металлургических производств и автотранспорта показало, что оба эти вида способны аккумулировать количество железа в хвое и побегах, в 2 раза и более превышающее средние данные по растительности РР (табл. 5). При этом содержание железа в хвое ели колючей при воздействии техногенных выбросов колеблется в диапазоне 350–9700 мг/кг сухого вещества и зависит от количества элемента в атмосферных выбросах (содержание железа в воздухе ТПр «Тулачермет» достигало 45 мкг/м³). По-видимому, элемент, поступающий не только из почв, но и из аэрозолей воздуха (в случае компонентов ОАО «Тулачермет» это могут быть железисто-углеродистые конгломераты, которые летят в атмосферу при выплавке чугуна), связывается с компонентами кутикулярного слоя и фиксируется хвоей. Так же, как в случае с туей западной, количество никеля в хвое снижается при воздействии полиметаллического загрязнения почв (табл. 5).

Таблица 5

Биогеохимическая активность можжевельника казацкого и ели колючей в отношении тяжелых металлов в условиях урбанизированных экосистем, мг/кг сухого вещества

Точка пробоотбора	Вид	Mn	Fe	Ni	Cu	Zn	Cd	Pb
УЧЗ (ЦПКиО)	Можжевельник казацкий	87	199	2,9	3,6	14	< 0,1	< 1
Педуниверситет	Можжевельник казацкий	34	404	1,3	6,2	24	< 0,1	< 1
Тулачермет	Можжевельник казацкий	31	861	1,1	3,8	20	< 0,1	< 1
пр. Ленина	Ель колючая	87	359	2,8	4,2	45	< 0,1	< 1
Тулачермет	Ель колючая	81	9763	1,4	3,5	68	0,12	1,8
КМЗ	Ель колючая	182	356	< 1	3,5	66	< 0,1	< 1
	РР	200	150	1,5	10	50	0,05	1

В зоне воздействия загрязнения почв цинком (в 1,5 раза выше ПДК) концентрация элемента в хвое ели колючей возрастает до 68 мг/кг. Учитывая газоустойчивость вида и высокую его жизненность в условиях урбанизированных экосистем, в том числе в санитарно-защитной зоне металлургических производств, вид может быть рекомендован для посадок в СЗЗ предприятий металлургической промышленности как концентратор тяжелых металлов – Fe, Zn, Pb.

Изучение биогеохимической активности разных видов и сортов голосеменных интродуцентов, произрастающих вдоль крупных автодорог урбанизированной экосистемы, выявило ряд тенденций в отношении макро- и микроэлементов (в том числе тяжелых металлов и металлоидов). Содержание такого макроэлемента, как Na, в хвое и побегах 9 видов изученных голосеменных лежало в пределах средних значений для растительности суши и составило 22–150 мг/кг сухого вещества. Большинство видов имело средние значения концентрации Mg в хвое



(95–237 мг/кг) и побегах (43–145 мг/кг), причем значения содержания элемента в фотосинтезирующих органах (хвоя) были в 2–3 раза выше, чем в органах, не содержащих хлорофилла (побеги). Анализ данных, полученных для однолетней и многолетней хвои и побегов двух видов — *Picea pungens* f. *Glauca* и *Pseudotsuga menziesii*, — показал, что в многолетней хвое содержание магния больше, чем в однолетней, на 47–57%. При этом в однолетних побегах, напротив, элемент накапливается в больших количествах, чем в хвое и многолетних побегах (на 47–72%). По-видимому, это связано с интенсивностью процессов обмена и транспорта в молодых растущих органах и с тем, что побеги на первых этапах депонируют элемент, чтобы в последующем перераспределить его в фотосинтезирующую хвою.

Так же, как и туя, большинство изученных голосеменных становятся аккумуляторами таких макроэлементов, как К, Са, Сl. При этом содержание калия в них (2440–13400 мг/кг сухого вещества) в 1,5–8 раз превышает средние данные для РР (1900 мг/кг). Содержание калия в однолетней хвое выше, чем в многолетней, в 1,5–2,5 раза; при этом для кальция наблюдается обратная картина: его содержание в многолетней хвое увеличивается, что связано с минерализацией ее клеточных стенок и повышением общей устойчивости к воздействию неблагоприятных факторов среды. Содержание кальция (3850–32500 мг/кг сухого вещества) в хвойных в целом в 4–32 раза выше, чем в РР (1000 мг/кг). Это один из факторов, обуславливающих их высокую морозо- и зимостойкость по сравнению с листопадными видами.

Как показали результаты исследования, туя западная и две ее декоративные формы — с шаровидной (Глобоза) и колоновидной (Смарагд) кроной — способны накапливать большое количество Сl в органах при произрастании в зоне влияния автотранспортной эмиссии (1920–5360 мг/кг сухого вещества). При этом значения биоаккумуляции элемента выше, чем в контрольной зоне и в зоне воздействия металлургических производств, в 2 раза и в 10–25 раз выше, чем в РР (200 мг/кг).

Этот фактор может приводить к выпадению особей из зеленых насаждений. В то же время сорт Смарагд, имеющий большую витальность в условиях урбанизированной экосистемы, аккумулирует в 1,5–2 раза меньше хлора, чем исходный вид и сорт Глобоза, менее устойчивый в городских экосистемах. Аккумулятором хлора также является можжевельник казацкий *Juniperus sabina* и один из его изученных сортов (1370–1920 мг/кг сухого вещества).

Аккумуляция хлора в побегах большинства голосеменных в 2–4 раза ниже по отношению к хвое. Содержание хлора в хвое и побегах *Pinus mugo* и *Taxus baccata* лежит в пределах средних значений для растительности суши (250–266 мг/кг сухого вещества).

Изучение распределения тяжелых металлов и металлоидов в хвое и побегах голосеменных показало, что *Thuja occidentalis*, *Juniperus sabina*, *Juniperus squamata*, *Juniperus scopulorum* Skyrocket способны накапливать в 2–3 раза больше V, чем РР (табл. 6); при этом концентрация элемента в хвое выше, чем в побегах. Все изученные виды голосеменных аккумулируют Cr в хвое и побегах в концентрациях, в 3–14 раз



больших, чем РР (4,5–21 мг/кг сухого вещества). Максимальной аккумуляцией элемента в побегах отличается ель колючая *Picea pungens* (16–22 мг/кг). Концентрация хрома в многолетних органах выше, чем в однолетних (табл. 6). Аккумуляцией большого количества марганца отличается декоративная шаровидная форма туи западной – 330 мг/кг сухого вещества, что превышает средние значения для растительности в 1,5 раза и выходит за пределы нормальной регуляции, определенной в работах А. Кабата-Пендиас (20–60 мг/кг) [11; 25].

Таблица 6

Содержание тяжелых металлов и металлоидов в хвое и побегах* голосеменных интродуцентов, произрастающих вдоль автодорог в урбанизированных экосистемах (г. Тула), мг/кг

Вид	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	As	Sr	Mo	Cd	Sb
<i>Picea pungens</i> : хвоя / побеги однолетн.	0,8	16	41	147	0,13	13,9	4	25		14	0,02	0,005	0,02
	0,5	22	19	327	0,16	17	4	77	–	18	0,01	0,004	–
<i>Picea pungens</i> : хвоя / побеги многолетн.	0,4	21	20	205	0,15	14,5	4	46		23	0,01	0,005	0,01
	1,1	21	25	655	0,13	17	4	78	–	21	0,01	0,004	0,01
<i>Pseudotsuga menziesii</i>	0,3	5,0	93	204	0,05	3,9	5,3	25	0,30	22	0,05	0,79	0,04
	0,2	1,5	77	102	0,06	5,2	6,7	40	0,23	29	0,05	0,75	0,02
<i>Pseudotsuga menziesii</i> : многолетн. хвоя/побеги	0,4	4,8	167	175	0,06	4,8	5,1	17	0,32	36	0,10	0,90	0,08
	0,4	4,7	84	241	0,09	3,6	8,5	19	0,35	15	0,05	0,73	0,03
<i>Pinus mugo</i>	0,4	4,9	30	204	0,07	2,8	7,0	40	0,68	33	0,30	0,96	0,23
	0,3	4,8	20	174	0,06	0,7	5,0	39	0,45	19	0,21	0,68	0,07
<i>Taxus baccata</i>	0,4	4,8	45	250	0,07	2,5	5,5	45	0,38	45	0,17	0,80	0,08
	1,4	5,2	81	396	0,09	3,0	11,2	73	0,33	71	0,10	1,02	0,09
<i>Thuja occidentalis</i>	1,1	5,0	51	330	0,09	2,5	4,3	11	0,26	86	0,18	0,65	0,17
	2,1	5,6	16	119	0,06	2,3	4,3	6	0,27	37	0,04	0,85	0,04
<i>Thuja occidentalis Smaragd</i>	0,7	5,6	29	327	0,06	3,1	1,5	33	0,20	84	0,36	0,82	0,12
	0,5	5,0	8	280	0,06	2,8	2,0	27	0,18	25	0,12	0,44	0,11
<i>Thuja occidentalis Globosa</i>	1,5	8,6	330	642	0,15	2,7	11	24	0,20	113	0,23	0,04	0,30
	1,5	5,2	37	322	0,13	2,8	2,7	11	0,14	37	0,10	0,91	0,11
<i>Juniperus sabina</i>	1,0	7,9	204	341	0,12	3,1	12	29	0,22	146	0,40	0,02	0,31
	0,8	8,8	22	376	0,08	2,8	7,8	15	0,21	54	0,09	0,02	0,14
<i>Juniperus squamata</i>	2,4	9,3	47	778	0,18	1,1	6,0	29	0,41	181	0,65	0,04	0,69
	0,8	8,8	22	376	0,08	2,8	7,8	15	0,21	54	0,09	0,02	0,14
<i>Juniperus horizontalis Variegata</i>	0,5	8,1	46	262	0,05	2,8		20	0,30	293	0,26	0,04	0,06
	1,0	7,4	36	445	0,10	2,7	11,7	12	0,25	131	0,12	0,02	0,07
<i>Juniperus sabina Tamariscifolia</i>												0,00	
	1,7	8,8	41	531	0,11	3,1	1,7	29	0,25	261	0,67	4	0,32
	2,8	11	25	804	0,14	3,0	11,3	24	0,17	94	0,19	0,01	0,27
<i>Juniperus scopulorum Skyrocket</i>	1,0	9,4	21	481	0,13	1,0	5,3	14	0,15	166	0,64	0,03	0,19
	1,4	8,4	15	489	0,08	2,0	7,8	20	0,15	74	0,19	0,03	0,23
RP	0,5	1,5	200	150	0,2	1,5	10	50	0,1	50	0,5	0,05	0,10

* В числителе – в хвое, в знаменателе – в побегах.

По приведенным в литературе сведениям, типичными проявлениями токсического действия элемента можно назвать хлорозные и некротические пятна, сморщивание листовой пластинки и появление некротических темных пятен [11–12; 25]. Накоплением большого количества группы элементов объясняется некроз хвои сорта *Globosa* и выпадение экземпляров из зеленых насаждений (до 40 %).



Уровень биоаккумуляции Fe в хвое голосеменных интродуцентов колеблется в пределах 147–778 мг/кг; в побегах – 119–804 мг/кг сухого вещества (табл. 6). При средних данных для видов родов *Picea*, *Pinus* чистых ценозов – 54 мг/кг сухого вещества [12–13; 19]. Максимальным накоплением железа, превышающим содержание в РР и норму (верхняя граница 250 мг/кг), характеризуются изученные виды: *Thuja occidentalis* (и ее декоративные сорта), *Juniperus sabina*, *Juniperus squamata*, *Juniperus scopulorum* (327–778 мг/кг). При этом пределы нормальной регуляции (500 мг/кг) элемента превышены у можжевельника чешуйчатого (778 мг/кг).

В больших количествах железо накапливается в многолетних органах ели колючей, побегах можжевельника скального и изученной декоративной формы можжевельника казахского *Tamariscifolia* (489–804 мг/кг сухого вещества), что может быть обусловлено слабой подвижностью элемента в растении.

Концентрация микроэлементов Co, Cu, Zn у большинства изученных видов и форм голосеменных лежит в пределах средних норм для растительности и составляет 0,05–0,12; 4–12; 45 мг/кг сухого вещества соответственно. Однако цинк имеет тенденцию накапливаться в побегах ели колючей и тиса ягодного при превышении концентрации элемента в почвах. Биоаккумуляция комплекса тяжелых металлов Cr, Fe, Zn, Cu, Cd в побегах тиса ягодного на загрязненных почвах может быть одним из факторов (наряду с несоблюдением агротехники и требованый культуры) выпадения вида из зеленых насаждений города (гибель до 90 % особей в первые 2 года после посадки).

Концентрация Ni в хвое и побегах голосеменных в городских условиях составляет 1–17 мг/кг сухого вещества, в большинстве случаев в 1,5–2 раза превышая значения в РР (см. табл. 6). Высоким содержанием элемента отличается хвоя и побеги ели колючей (13–17 мг/кг сухого вещества), которую можно считать аккумулятором никеля в городских условиях. При этом жизнеспособность вида, как правило, не опускается ниже 2 баллов.

Содержание металлоида 1-го класса опасности As, которым загрязнена часть городских почв, колеблется в органах изученных голосеменных в пределах 0,13–0,68 мг/кг сухого вещества и максимально в побегах и хвое сосны горной (0,41–0,68 мг/кг).

Содержание молибдена в хвое и побегах голосеменных лежит в пределах ниже РР или средних значений для растительности (0,05–0,65 мг/кг сухого вещества).

Концентрация Cd, по сравнению со средними данными для растительности РР, превышена в 10–20 раз для таких видов, как псевдотсуга Мензиса, сосна горная, тис ягодный, туя западная и ее декоративные сорта: 0,64–1 мг/кг. При этом максимальными значениями содержания элемента отличаются побеги тиса ягодного.

Концентрация Sb выше, чем РР, в 1,5–6,5 раза (0,14–0,69 мг/кг сухого вещества) в побегах и хвое почти всех изученных видов и сортов можжевельников, за исключением можжевельника горизонтального. Накопление сурьмы в органах может быть систематической биогеохимической особенностью рода, но это предположение требует проверки в дальнейших исследованиях.



Выводы

1. Все изученные виды голосеменных интродуцентов обладают высоким сродством к К, Са, Сl, при этом коэффициент биологической аккумуляции (трансфер-фактор) хлора и кальция из почв может достигать 2 и 9 соответственно.

2. *Thuja occidentalis* в условиях воздействия металлургических производств и полиметаллического загрязнения почв и воздуха тяжелыми металлами способна аккумулировать V, Cr, Fe, As; при этом накопление Ni в надземных органах уменьшается по сравнению с УЧЗ в 1,5–2 раза. Аккумуляция больших количеств Сl и тяжелых металлов в хвое и побегах туи может приводить к развитию некротических повреждений, снижению жизнеспособности вида в условиях воздействия полиметаллического загрязнения и засоления почв и в конечном итоге вызывать выпадение особей из зеленых насаждений.

3. *Picea pungens f. Glauca* является биоаккумулятором Fe, Cr, Ni, Zn в условиях загрязнения этими элементами почв и воздуха. При этом проявляет устойчивость к воздействию автотранспортной эмиссии и полиметаллическому загрязнению почв и может быть рекомендована для создания СЗЗ металлургических предприятий и автомагистралей.

4. *Juniperus sabina* и *Juniperus scopulorum Skyrocket* аккумулируют в 1,5–5 раз больше V, Cr, Fe, Ni, Sb в надземных органах (охвоенные побеги) по сравнению с *Reference Plants*.

5. Высокие концентрации Cr, Fe, Ni, Zn, As, Cd в побегах *Taxus baccata* (по сравнению с RP) могут приводить к выпадению особей вида из зеленых насаждений.

6. Большинство изученных видов и сортов голосеменных отличаются стабильностью в аккумуляции таких элементов, как Cu, Zn, Co, Mo, накапливая их в количествах, ниже или соответствующих средним значениям RP. Все изученные виды голосеменных аккумулируют Cr в хвое и побегах в концентрациях, в 3–14 раз превышающих RP.

7. Многолетняя хвоя и побеги характеризуются более высокими значениями биоаккумуляции таких элементов, как Ca, Ni, Zn, Sr, Fe, по сравнению с однолетними, многолетняя хвоя содержит больше Mg. Содержание калия и хлора в многолетних органах снижается.

Исследование поддержано грантом РФФИ р_центр_а 13-05-97508 «Изучение миграции токсичных элементов в древесных интродуцентах для оценки их адаптивных характеристик и буферной роли в урбанизированных экосистемах».

Список литературы

1. Баргальи Р. Биогеохимия наземных растений / пер. с англ. И.Н. Михайловой. М., 2005.
2. Бухарина И.Л., Поварнищина Т.М., Ведерников И.Л. Эколого-биологические особенности древесных растений в урбанизированной среде : монография. Ижевск, 2007.



3. Гарифзянов А.Р., Горелова С.В., Иванищев В.В. Роль древесных растений в оптимизации техногенно загрязненной среды // Актуальные проблемы инновационного развития агропромышленного комплекса. Всероссийская конференция студентов и молодых ученых с элементами научной школы. Астрахань, 2009. С. 83–86.

4. Горелова С.В., Меньшикова Е.В. Жизненность древесных интродуцентов в урбоэкосистеме на примере г. Тулы // Всероссийская молодежная конференция «Актуальные проблемы химии и биологии»: сборник тезисов. Пушкино, 2012. С. 132–133.

5. Горелова С.В., Меньшикова С.В., Харихонов А.Ю. Флористический состав и устойчивость древесных интродуцентов урбоэкосистем с интенсивным техногенным загрязнением (на примере г. Тулы) // Рослини та урбанізація: матеріали третьої міжнародної науково-практичної конференції «Рослини та урбанізація». Дніпропетровськ, 2013. С. 160–163.

6. Горелова С.В., Горбунов А.В., Ляпунов С.М. и др. Возможности использования древесных растений для биоремедиации загрязненных тяжелыми металлами почв в урбоэкосистемах // Экологические проблемы промышленных городов: сборник научных трудов по материалам 6-й Всероссийской научно-практической конференции с международным участием / под ред. Е.И. Тихомировой. Саратов, 2013. Ч. 2. С. 117–120.

7. Горелова С.В., Козлов С.А., Толкунова Е.Ю. и др. Экологическое состояние почв города Тулы // Биология – наука XXI ВЕКА: 18-я Международная Пушкинская школа: сборник тезисов. Пушкино, 2014. С. 410–411.

8. ГОСТ 17.4.3.01-83 (СТ СЭВ 3847-82). Охрана природы. Почвы. Общие требования к отбору проб. М., 1983.

9. ГОСТ 26929-86. Сыры и продукты пищевые. Подготовка проб. Минерализация для определения токсичных элементов. М., 1986.

10. Горбунов А.В., Ляпунов С.М., Окينا О.И. и др. Сезонные изменения микроэлементного состава вегетативных органов древесной растительности // Экологическая химия. 2005. Т. 14, вып. 4. С. 86–89.

11. Кабата-Пендиас А., Пендиас Х. Микроэлементы в почвах и растениях. М., 1989.

12. Кулагин А.А., Шагиева Ю.А. Древесные растения и биологическая консервация промышленных загрязнителей / отв. ред. Г.С. Розенберг. М., 2005.

13. Лукина Н.В., Никонов В.В. Биогеохимические циклы в лесах Севера в условиях азротехногенного загрязнения. Ч. 2. Апатиты, 1996.

14. Майдебуря И.С. Влияние загрязнения воздушного бассейна г. Калининграда на анатомо– морфологические и биохимические показатели древесных растений: автореф. дис. ... канд. биол. наук. Калининград, 2006.

15. Методические указания по определению тяжелых металлов в почвах сельхозугодий и продукции растениеводства. М., 1992.

16. Предельно допустимые концентрации (ПДК) химических веществ в почве: гигиенические нормативы. М., 2006.

17. Саэт Ю.Е., Ревич Б.А., Янин Е.П. и др. Геохимия окружающей среды. М., 1990.

18. Серегин И.В. Распределение тяжелых металлов в растении и их действие на рост: автореф. дис. ... д-ра биол. наук. М., 2009.

19. Черенькова Т.В. Реакция лесной растительности на промышленное загрязнение. М., 2002.

20. Cataldo D. A., Garland T. R., Wildung R. E. Nickel in plants // Plant Physiol. 1978. No 62.

21. Gorelova S. V., Frontasyeva M. V., Yurukova, L. et al. Revitalization of urban ecosystems through vascular plants: preliminary results from the BSEC-PDF project // AGROCHIMICA. 2011. No 55 (2). P. 65–84.

22. Gorelova S. V., Frontasyeva M. V., Lyapunov S. M. et al. Woody plants in passive biomonitoring and bioremediation of urban ecosystems. Aspect of heavy metal ac-



cumulation // Neutron Spectroscopy, Nuclear Structure, Related Topics : Abstr. of the XIX Intern. Seminar on Interaction of Neutrons with Nuclei (Dubna, May 25–28, 2011). Dubna, 2011. P. 29.

23. Gorelova S. V., Gorbunov A. V., Lyapunov S. M. *u et al.* Nuclear and related analytical techniques used to study elemental content of some exotic woody species under intense technogenic pollution in urban ecosystem of nonchernozem zone of Russia // Fundamental Interaction & Neutrons, Nuclear Structure, Ultracold Neutrons, Related Topics : Abstr. of the XXII Intern. Seminar on Interaction of Neutrons with Nuclei (Dubna, May 25–30, 2014). Dubna, 2014. P. 44.

24. Gorelova S. V., Frontasyeva M. V., Gorbunov A. V. *et al.* Biogeochemical activity of some coniferous exotic woody species in urban ecosystems // Fundamental Interactions & Neutrons, Nuclear Structure, Ultracold Neutrons, Related Topics: Abstr. of the XXII Intern. Seminar on Interaction of Neutrons with Nuclei (Dubna, May 25–30, 2014). Dubna, 2014. P. 44.

25. Kabata-Pendias A., Pendias H. *et al.* Trace elements in soil and plants. 3rd ed. L., N.-Y., Washington, D. C., 2001.

26. Markert B. Establishing of 'reference plant' for inorganic characterization of different plant species by chemical fingerprinting // Water, Air and Soil Pollution. 1992. No 64. P. 533–538.

27. Frontasyeva M. V. Neutron activation analysis for the Life Sciences // Physics of Particles and Nuclei. 2011. Vol. 42, No. 2. P. 332–378. URL: <http://www.springerlink.com/content/f836723234434m27/> (дата обращения: 20.11.2014).

Об авторах

Светлана Владимировна Горелова — канд. биол. наук, доц., Тульский государственный педагогический университет им. Л.Н. Толстого.

E-mail: salix35@gmail.com

Марина Владимировна Фронгасьева — канд. физ.-мат. наук, доц., Объединенный институт ядерных исследований, Московская обл., Дубна.

E-mail: marina@nf.jinr.ru

Анатолий Викторович Горбунов — ст. науч. сотр., Геологический институт РАН, Москва.

E-mail: analytic@ginras.ru

Сергей Михайлович Ляпунов — канд. геол.-минерал. наук., Геологический институт РАН, Москва.

E-mail: analytic@ginras.ru

Елизавета Георгиевна Мочалова — науч. сотр., Геологический институт РАН, Москва.

E-mail: analytic@ginras.ru

Ольга Ильинична Окина — канд. техн. наук., ст. науч. сотр., Геологический институт РАН, Москва.

E-mail: analytic@ginras.ru

About the authors

Dr Svetlana Gorelov, Associate Professor, L.N. Tolstoy Tula State Pedagogical University.

E-mail: salix35@gmail.com



Dr Marina Frontasyeva, Associate Professor, Joint Institute for Nuclear Research, Dubna, Moscow Region, Russia.

E-mail: marina@nf.jinr.ru

Anatoly Gorbunov, Senior Research Fellow, Institute of Geology, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia.

E-mail: analytic@ginras.ru

Dr Sergey Lyapunov, Institute of Geology, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia.

E-mail: analytic@ginras.ru

106

Elizaveta Mochalova, Research Fellow, Institute of Geology, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia.

E-mail: analytic@ginras.ru

Dr Olga Okina, Senior Research Fellow, Institute of Geology, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia.

E-mail: analytic@ginras.ru