

СРАВНЕНИЕ СПОСОБНОСТИ ДРЕВЕСНЫХ РАСТЕНИЙ РАЗЛИЧНЫХ ВИДОВ К АККУМУЛЯЦИИ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ В ГОРОДСКОЙ СРЕДЕ

¹А.С. Петухов, ¹Т.А. Кремлева, ¹Н.А. Хритохин, ¹Г.А. Петухова

¹Тюменский государственный университет

Изучена почвенная и аэротехногенная миграция металлов в древесные растения (береза повислая (*Betula pendula*) и тополь бальзамический (*Populus balsamifera*)) из техногенных зон г. Тюмени. Отобраны пробы почвы и листьев деревьев на условно-фоновой территории, вблизи аэропорта, железнодорожного вокзала и автовокзала, а также в районе предприятий: моторостроительного, нефтеперерабатывающего, аккумуляторного и металлургического заводов. Определено содержание кислоторастворимой формы металлов в почвах и листьях методом атомно-эмиссионной спектроскопии. Выявлено, что накопление металлов в почвах из техногенных зон г. Тюмени по сравнению с контролем убывало в ряду $Pb > Cd > Cr > Ni > Zn > Cu > Fe > Co > Mn$ и достигало 20 раз. Установлено накопление металлов листьями березы, которое относительно контроля убывало в ряду $Pb > Cr > Fe > Co > Cu > Ni > Zn > Mn > Cd$, и листьями тополя – $Cr > Fe > Pb > Zn > Cd > Cu > Co > Mn > Ni$. Выполнен анализ накопления и миграции металлов в почвах и деревьях из городской среды, позволивший выделить Cd, Pb и Cr как металлы с "наибольшим экологическим риском".

Ключевые слова: тяжелые металлы, почвы, древесные растения, городская среда, атмосферная миграция, аккумуляция

Статья поступила в редакцию 15.07.2024, доработана 15.08.2024, принята к публикации 01.09.2024

Comparison of the Ability of Woody Plants of Different Species to Accumulate Heavy Metals in Urban Environment

¹A.S. Petukhov, ¹T.A. Kremleva, ¹N.A. Khritonin, ¹G.A. Petukhova

¹Tyumen State University, 625003 Tyumen, Russia

Soil and aerotechnogenic migration of metals into woody plants (birch (*Betula pendula*) and balsam poplar (*Populus balsamifera*)) from technogenic zones of Tyumen was studied. Soil and tree leaves were sampled in the conditionally background area, near the airport, railway station and bus station, as well as in the area of enterprises: engine-building, oil refinery, battery and metallurgical plants. The content of acid-soluble form of metals in soils and leaves was determined by atomic emission spectroscopy. It was revealed that the accumulation of metals in soils from the anthropogenic zones of Tyumen compared to the control decreased in the series $Pb > Cd > Cr > Ni > Zn > Cu > Fe > Co > Mn$ and reached 20 times. The accumulation of metals by birch leaves was found to decrease in the series $Pb > Cr > Fe > Co > Cu > Ni > Zn > Mn > Cd$, and by poplar leaves – $Cr > Fe > Pb > Zn > Cd > Cu > Co > Mn > Ni$. The accumulation and migration of metals in soils and trees from the urban environment were analyzed, which allowed us to identify Cd, Pb and Cr as metals with the "highest ecological risk".

Keywords: heavy metals, soils, woody plants, urban environment, atmospheric migration, accumulation

Received 15.07.2024, revised 15.08.2024, accepted for publication 01.09.2024

DOI: 10.18412/1816-0395-2024-11-66-71

Развитие промышленного производства привело к росту объемов загрязняющих веществ. Данная проблема усугубляется в крупных городах из-за большого количества автотранспорта и высокой плотности населения. Среди таких веществ в городской среде тяжелые металлы (ТМ) играют важную роль в связи с наличием у них кумулятивного эффекта и способности к миграции по трофическим цепям [1].

Актуальной задачей является смягчение последствий загрязнения от промышленных источников и улучшение общей экологической

обстановки в городской среде. Одним из наиболее простых и эффективных подходов является озеленение городских территорий с использованием деревьев. Листья деревьев могут выступать в качестве фильтров воздуха и задерживать миграцию ТМ от промышленных источников в атмосфере [2].

Исследование накопления ТМ в древесных растениях различных видов может служить как для оценки экологической обстановки района исследования, так и для оценки эффективности озеленения и способности деревьев к фиторемедиации почв. Этой пробле-

ма ранее была рассмотрена в работах из различных городов России и мира [3–8]. Выявление видов растений, наиболее склонных к накоплению ТМ, как из почвы, так и атмосферы, поможет оптимизировать проведение экологического мониторинга и мероприятий по снижению воздействий антропогенной деятельности на окружающую среду.

Цель работы — изучение почвенной и аэротехногенной миграции ТМ в древесные растения (береза повислая и тополь бальзамический) из техногенных зон г. Тюмени.

Материал и методы исследования

Пробы почвы, листьев березы повислой (*Betula pendula*) и тополя бальзамического (*Populus balsamifera*) собраны в г. Тюмени в сентябре на следующих участках: контроль — участок на удалении 40 км от города; на удалении 200 м от аэропорта "Рошино"; железнодорожного вокзала (ЖД вокзал); автовокзала, а также на удалении 200 м от предприятий: моторостроительного завода (мотор. 3-д); нефтеперерабатывающего завода (НПЗ); аккумуляторного завода (аккумулятор. 3-д) и металлургического завода (УГМК). Выбор растений обусловлен широким распространением во всех районах исследования.

Пробы почвы отбирали методом конверта на глубину 0–10 см согласно ГОСТ 17.4.4.02-2017. Зеленые листья березы и тополя (не менее 100 шт. на каждом участке) отбирали на высоте 2–2,5 м. Одну часть листьев тщательно промывали бидистиллированной водой и высушивали на воздухе (отмытые листья), а другую высушивали и анализировали без предварительной подготовки (неотмытые листья). По разнице содержания ТМ в отмытых и неотмытых листьях оценивали вклад аэротехногенной миграции металлов.

В пробах почв извлекали кислоторастворимую форму металлов с помощью 5 М HNO_3 согласно РД 52.18.191-2018. Извлечение металлов из проб листьев деревьев также проводили 5 М HNO_3 . Пробоподготовку проводили в двух параллелях. Содержание металлов определяли методом атомно-эмиссионной спектроскопии с индуктивно-связанной плазмой на приборе PlasmaQuant PQ 9000 (Германия) в центре коллективного пользования "Рациональное природопользование и физико-химические исследования" ТюмГУ.

Санитарно-гигиеническую оценку качества почв проводили по значению суммарного показателя загрязнения Z_c :

$$Z_c = \sum_{i=1}^n C_i / C_{\text{контроль}} - (n - 1),$$

где C_i — содержание кислоторастворимой формы металла в почве исследуемого района; $C_{\text{контроль}}$ — содержание кислоторастворимой формы металла в почве контроля; n — количество исследуемых металлов.

Таблица 1. Содержание, мг/кг, кислоторастворимой формы ТМ в почвах г. Тюмени

Content, mg/kg, of acid-soluble form of heavy metals in Tyumen soils

ТМ	Контроль	Авто-вокзал	Мотор. 3-д	НПЗ	Аккумулятор. 3-д	УГМК	Аэропорт	ЖД вокзал
Cu	6,1±0,2	12±1	7,5±0,3	9,4±0,3	20±1	15±1	14±1	30±2
Zn	15±1	25±2	13±1	27±2	45±3	44±3	33±2	84±5
Fe	4200±500	5200±400	2000±100	2500±500	8400±100	3700±500	7000±800	6400±900
Mn	580±20	550±20	380±10	370±10	480±10	430±10	600±10	300±10
Pb	7,9±0,2	9,7±0,5	8,1±0,4	14±1	156±9	13±1	17±1	120±4
Cd	≤0,01	0,02±0,01	≤0,01	0,03±0,01	0,17±0,01	0,10±0,01	0,15±0,01	0,17±0,01
Ni	13±1	24±1	14±1	23±1	38±2	19±1	31±2	145±4
Co	6,6±0,9	9,6±0,9	5,4±0,1	4,8±0,2	8,8±1,6	5,8±0,8	9,8±0,3	8,8±0,6
Cr	8,4±0,4	17±1	6,2±0,1	14±1	25±1	14±1	19±1	99±3

Для оценки биодоступности металлов рассчитывали фактор биоконцентрации как отношение содержания металла в отмытых листьях к содержанию кислоторастворимой формы в почве. Полученные результаты были подвергнуты стандартной статистической обработке с расчетом доверительного интервала при $P=0,95$ и проведением корреляционного анализа в программе Statistica 12.

Результаты и обсуждение

Результаты определения содержания ТМ в изученных почвах г. Тюмени представлены в табл. 1. Содержание большинства металлов было повышено по сравнению с контролем практически на всех участках в городской среде. В целом, накопление ТМ почвами относительно контроля убывало в ряду $\text{Pb} > \text{Cd} > \text{Cr} > \text{Ni} > \text{Zn} > \text{Cu} > \text{Fe} > \text{Co} > \text{Mn}$. Превышение контроля достигало для Pb — 20 раз, для Cd — 17, Cr — 12, Ni — 11, Zn — 5,5 раз. В то же время накопления Fe, Co и Mn в почвах городской среды практически не наблюдалось, что свидетельствует о преимущественно природном фоне этих металлов в почве.

Содержание Cd, Cu, Zn и Fe в почвах г. Тюмени оказалось близким к их концентрациям в почвах г. Твери [9]. Аналогичное содержание Ni и Pb было зарегистрировано в почвах промышленной зоны в Узбекистане [10]. Содержание Mn в почвах г. Тюмени соответствовало его содержанию в почве из карьеров Челябинской области [11].

По степени накопления ТМ относительно контроля изученные участки можно расположить в следующий ряд: ЖД вокзал > аккумулятор. 3-д > УГМК > аэропорт > НПЗ > автовокзал > мотор. 3-д. По ре-

зультатам расчета суммарного показателя загрязнения район ЖД вокзала и аккумулятор. 3-да можно отнести к участку "высокого загрязнения" ($Z_c = 60, 45$ соответственно), район аэропорта — к участку "среднего загрязнения" ($Z_c = 22$), УГМК — "низкому загрязнению" ($Z_c = 14$). Зарегистрировано превышение ПДК по валовому содержанию Ni и Pb в районе ЖД вокзала в 1,8 и 1,2 раза соответственно.

Высокое содержание ТМ в почве вблизи ЖД вокзала, вероятно, связано со сгоранием ископаемого топлива, истиранием ходовой части поездов и рельсов, перевозкой грузов, содержащих металлы (руды, удобрения, цемент). Повышенное содержание Fe, Ni и Pb в районе аккумулятор. 3-да и ЖД вокзала может быть вызвано производством и использованием железо-никелевых и свинцово-кислотных аккумуляторов. Накопление Zn в почве в районе УГМК может быть вызвано применением оцинкованного лома в производстве стали. Содержание Co превышало контроль на 30–40 % только в районах с большим транспортным потоком: автовокзал, аэропорт и ЖД вокзал. Вероятно, это указывает на повышенную концентрацию Co в выхлопных газах от различных видов транспорта. Аналогично повышенное содержание Fe было отмечено в районах с большим количеством транспорта, вероятно, это связано с использованием соединений Fe, например ферроцена, в качестве присадок к топливу.

Содержание ТМ в листьях березы и тополя представлено в табл. 2. Концентрация всех металлов, за исключением Cd, в березе из городской среды была повышена по сравнению с контролем. В целом, накопление ТМ березой относи-

Таблица 2. Содержание (среднее $\pm$ доверительный интервал, мг/кг) ТМ в листьях березы и тополя в г. Тюмени (числитель – не отмытые листья, знаменатель – отмытые листья)

Table 2. Content (mean $\pm$ confidence interval, mg/kg) of heavy metals in leaves of birch and poplar in Tyumen (numerator – not washed leaves, denominator – washed leaves)

ТМ	Контроль	Автовокзал	Мотор. з-д	НПЗ	Аккумуля. з-д	УГМК	Аэропорт	ЖД вокзал
Береза								
Cu	3,4 $\pm$ 0,1 3,6 $\pm$ 0,1	4,4 $\pm$ 0,1 4,3 $\pm$ 0,1	3,8 $\pm$ 0,1 3,9 $\pm$ 0,1	5,7 $\pm$ 0,1 5,3 $\pm$ 0,1	4,5 $\pm$ 0,1 4,4 $\pm$ 0,1	8,3 $\pm$ 0,2 7,6 $\pm$ 0,1	3,1 $\pm$ 0,1 2,9 $\pm$ 0,1	3,9 $\pm$ 0,1 3,4 $\pm$ 0,1
Zn	94 $\pm$ 2 90 $\pm$ 2	82 $\pm$ 2 86 $\pm$ 3	102 $\pm$ 2 94 $\pm$ 2	154 $\pm$ 6 137 $\pm$ 7	113 $\pm$ 3 106 $\pm$ 5	138 $\pm$ 2 90 $\pm$ 1	80 $\pm$ 2 82 $\pm$ 1	83 $\pm$ 4 53 $\pm$ 1
Fe	84 $\pm$ 2 82 $\pm$ 1	153 $\pm$ 10 126 $\pm$ 2	88 $\pm$ 2 68 $\pm$ 2	365 $\pm$ 8 245 $\pm$ 5	151 $\pm$ 2 155 $\pm$ 5	480 $\pm$ 6 392 $\pm$ 4	97 $\pm$ 3 82 $\pm$ 4	219 $\pm$ 5 207 $\pm$ 4
Mn	272 $\pm$ 8 279 $\pm$ 10	112 $\pm$ 3 84 $\pm$ 1	412 $\pm$ 9 228 $\pm$ 2	399 $\pm$ 12 404 $\pm$ 11	112 $\pm$ 4 93 $\pm$ 2	228 $\pm$ 2 157 $\pm$ 2	303 $\pm$ 11 266 $\pm$ 10	49 $\pm$ 1 53 $\pm$ 4
Pb	0,07 $\pm$ 0,01 0,10 $\pm$ 0,03	0,48 $\pm$ 0,07 0,36 $\pm$ 0,02	1,3 $\pm$ 0,1 1,3 $\pm$ 0,1	1,3 $\pm$ 0,1 0,96 $\pm$ 0,07	6,4 $\pm$ 0,2 7,0 $\pm$ 0,5	5,1 $\pm$ 0,2 4,8 $\pm$ 0,1	0,14 $\pm$ 0,02 0,14 $\pm$ 0,02	1,4 $\pm$ 0,1 1,0 $\pm$ 0,1
Cd	0,20 $\pm$ 0,02 0,16 $\pm$ 0,01	0,02 $\pm$ 0,01 0,01 $\pm$ 0,01	0,15 $\pm$ 0,01 0,18 $\pm$ 0,02	0,07 $\pm$ 0,01 0,08 $\pm$ 0,02	0,06 $\pm$ 0,01 0,05 $\pm$ 0,01	0,21 $\pm$ 0,01 0,12 $\pm$ 0,01	0,08 $\pm$ 0,01 0,10 $\pm$ 0,01	$\leq$ 0,01 $\leq$ 0,01
Ni	4,1 $\pm$ 0,2 3,0 $\pm$ 0,1	7,6 $\pm$ 0,2 6,8 $\pm$ 0,3	3,8 $\pm$ 0,2 3,9 $\pm$ 0,2	4,1 $\pm$ 0,2 3,0 $\pm$ 0,1	3,0 $\pm$ 0,1 3,1 $\pm$ 0,2	3,8 $\pm$ 0,1 3,3 $\pm$ 0,1	6,0 $\pm$ 0,2 5,2 $\pm$ 0,1	4,6 $\pm$ 0,1 1,7 $\pm$ 0,1
Co	0,08 $\pm$ 0,01 0,08 $\pm$ 0,01	0,10 $\pm$ 0,01 0,09 $\pm$ 0,01	0,20 $\pm$ 0,01 0,20 $\pm$ 0,01	0,31 $\pm$ 0,02 0,31 $\pm$ 0,02	0,08 $\pm$ 0,01 0,06 $\pm$ 0,01	0,17 $\pm$ 0,01 0,09 $\pm$ 0,01	0,12 $\pm$ 0,01 0,14 $\pm$ 0,01	0,10 $\pm$ 0,01 0,10 $\pm$ 0,01
Cr	0,17 $\pm$ 0,01 0,10 $\pm$ 0,01	0,89 $\pm$ 0,05 0,57 $\pm$ 0,12	0,51 $\pm$ 0,04 0,32 $\pm$ 0,11	2,5 $\pm$ 0,1 1,3 $\pm$ 0,1	0,45 $\pm$ 0,07 0,47 $\pm$ 0,04	2,6 $\pm$ 0,1 2,1 $\pm$ 0,2	0,43 $\pm$ 0,02 0,34 $\pm$ 0,05	1,2 $\pm$ 0,1 1,0 $\pm$ 0,1
Тополь								
Cu	6,6 $\pm$ 0,1 6,2 $\pm$ 0,2	7,8 $\pm$ 0,2 8,1 $\pm$ 0,1	5,3 $\pm$ 0,1 5,5 $\pm$ 0,2	9,3 $\pm$ 0,1 7,6 $\pm$ 0,2	6,8 $\pm$ 0,1 5,8 $\pm$ 0,1	6,9 $\pm$ 0,1 5,7 $\pm$ 0,1	5,0 $\pm$ 0,1 4,8 $\pm$ 0,1	8,8 $\pm$ 0,2 8,2 $\pm$ 0,1
Zn	78 $\pm$ 1 64 $\pm$ 1	93 $\pm$ 3 79 $\pm$ 2	245 $\pm$ 7 254 $\pm$ 4	125 $\pm$ 2 128 $\pm$ 3	133 $\pm$ 2 115 $\pm$ 4	273 $\pm$ 7 234 $\pm$ 4	112 $\pm$ 2 115 $\pm$ 2	150 $\pm$ 2 136 $\pm$ 2
Fe	100 $\pm$ 3 76 $\pm$ 2	189 $\pm$ 7 116 $\pm$ 1	212 $\pm$ 8 123 $\pm$ 2	412 $\pm$ 4 250 $\pm$ 10	187 $\pm$ 2 147 $\pm$ 3	684 $\pm$ 10 264 $\pm$ 4	72 $\pm$ 1 65 $\pm$ 1	349 $\pm$ 8 165 $\pm$ 1
Mn	373 $\pm$ 9 262 $\pm$ 3	200 $\pm$ 4 210 $\pm$ 6	175 $\pm$ 2 119 $\pm$ 3	172 $\pm$ 4 180 $\pm$ 5	73 $\pm$ 2 78 $\pm$ 4	169 $\pm$ 4 118 $\pm$ 4	71 $\pm$ 1 64 $\pm$ 1	58 $\pm$ 1 60 $\pm$ 2
Pb	0,76 $\pm$ 0,02 0,62 $\pm$ 0,02	1,2 $\pm$ 0,1 0,70 $\pm$ 0,03	1,3 $\pm$ 0,1 1,1 $\pm$ 0,1	1,5 $\pm$ 0,1 1,0 $\pm$ 0,1	5,3 $\pm$ 0,1 4,5 $\pm$ 0,1	2,0 $\pm$ 0,1 1,1 $\pm$ 0,1	0,49 $\pm$ 0,01 0,43 $\pm$ 0,02	1,7 $\pm$ 0,1 0,89 $\pm$ 0,05
Cd	0,88 $\pm$ 0,02 0,67 $\pm$ 0,03	1,6 $\pm$ 0,1 1,6 $\pm$ 0,1	1,7 $\pm$ 0,1 1,3 $\pm$ 0,1	0,64 $\pm$ 0,05 0,60 $\pm$ 0,02	0,55 $\pm$ 0,02 0,56 $\pm$ 0,02	1,4 $\pm$ 0,1 1,1 $\pm$ 0,1	1,0 $\pm$ 0,1 0,89 $\pm$ 0,02	0,52 $\pm$ 0,02 0,51 $\pm$ 0,02
Ni	14 $\pm$ 1 11 $\pm$ 1	2,3 $\pm$ 0,1 1,5 $\pm$ 0,1	2,7 $\pm$ 0,1 2,5 $\pm$ 0,1	7,5 $\pm$ 0,2 5,1 $\pm$ 0,1	3,3 $\pm$ 0,1 2,3 $\pm$ 0,1	2,5 $\pm$ 0,1 1,4 $\pm$ 0,1	1,3 $\pm$ 0,1 1,5 $\pm$ 0,1	6,7 $\pm$ 0,2 6,3 $\pm$ 0,1
Co	1,9 $\pm$ 0,1 2,1 $\pm$ 0,2	1,6 $\pm$ 0,1 1,7 $\pm$ 0,1	1,0 $\pm$ 0,1 1,1 $\pm$ 0,1	1,5 $\pm$ 0,1 1,6 $\pm$ 0,1	0,38 $\pm$ 0,01 0,43 $\pm$ 0,04	0,72 $\pm$ 0,03 0,71 $\pm$ 0,02	0,83 $\pm$ 0,05 0,79 $\pm$ 0,04	1,1 $\pm$ 0,1 1,0 $\pm$ 0,1
Cr	0,49 $\pm$ 0,04 0,25 $\pm$ 0,02	1,1 $\pm$ 0,1 0,54 $\pm$ 0,04	1,1 $\pm$ 0,1 0,79 $\pm$ 0,10	3,3 $\pm$ 0,2 1,8 $\pm$ 0,1	0,87 $\pm$ 0,11 0,61 $\pm$ 0,10	3,2 $\pm$ 0,1 1,5 $\pm$ 0,1	0,37 $\pm$ 0,04 0,35 $\pm$ 0,06	1,7 $\pm$ 0,1 0,74 $\pm$ 0,06

тельно контроля убывало в ряду: Pb>Cr>Fe>Co>Cu>Ni>Zn>Mn>Cd. Превышение контроля для Pb достигало 95 раз, Cr – 22 раз, Fe – 5,7 раз, Co – 4 раз. Накопление Pb и Cr в растениях соответствовало их высокой степени накопления в почвах. Аккумуляция Fe в листьях относительно контроля была более выражена, чем в почвах, вероятно, из-за участия Fe в биохимических процессах, а накопление Cd было менее выражено, видимо, из-за его высокой токсичности и барьерных функций растений. В отличие от березы накопление металлов листьями

тополя было менее выражено по сравнению с контролем, а накопления Mn, Ni и Co не наблюдалось. Максимальное превышение контроля достигало 7 раз для Pb, Fe и Cr. Накопление металлов листьями тополя относительно контроля изменялось в ряду, близком к березе: Cr>Fe>Pb>Zn>Cd>Cu>Co>Mn>Ni, однако выделяется большее накопление Zn и Cd и меньшая аккумуляция Ni.

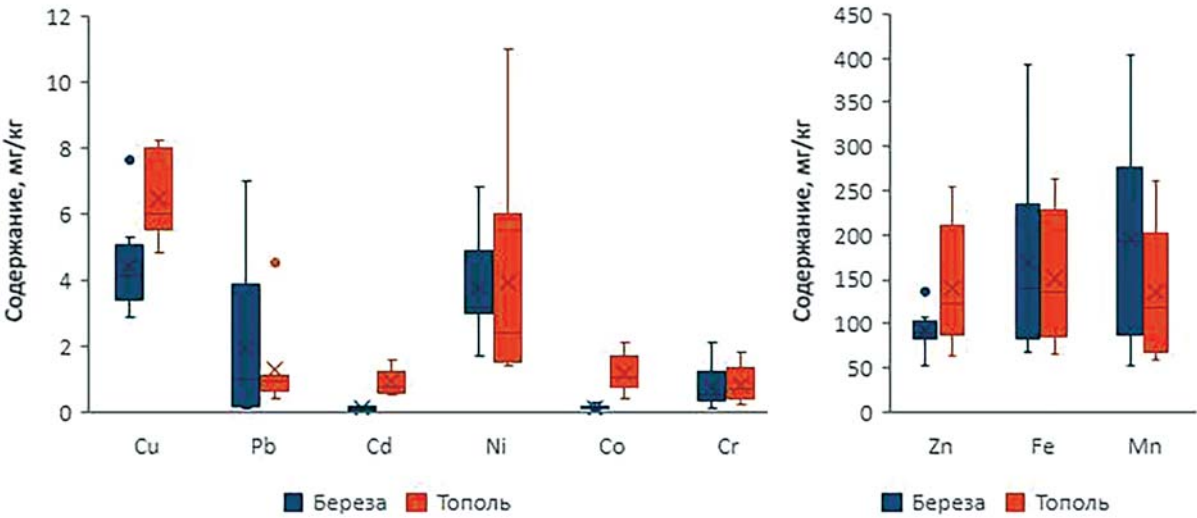
Сравнение абсолютного содержания металлов в листьях березы и тополя показывает близкое количество Ni и Cr, однако содержание Fe, Mn и Pb в целом выше в

листьях березы (см. рисунок). Содержание Cu, Zn, и в особенности Co и Cd было выше в листьях тополя. Вероятно, это отражает различную природную потребность деревьев разных видов к поглощению микроэлементов.

Содержание Cu и Pb в листьях березы в районе бывшей угольной шахты в Чехии оценивали в 6–14 и 0,8–9,5 мг/кг соответственно, что близко к полученным результатам [6]. Содержание Cu, Zn, Fe, Mn, Pb, Cd и Ni в листьях березы оказалось близким к их концентрациям в березе из парков и скверов г. Красноярск [3]. Листья березы в промышленной зоне г. Калининграда накапливали 80 мг/кг Zn и 360 мг/кг Mn [4], что соответствует результатам нашего исследования. Содержание Cu, Zn, Ni и Cd в листьях тополя из промышленной зоны г. Курска было близким к полученным результатам [5].

Рассмотренные районы можно расположить в следующий ряд по относительному накоплению металлов березой: УГМК > аккумуля. з-д > НПЗ > ЖД вокзал > мотор. з-д > автовокзал > аэропорт. В случае тополя получен практически идентичный ряд. Несмотря на "высокое загрязнение" в районе ЖД вокзала, накопление ТМ в листьях деревьев оказалось затруднено, вероятно, из-за адаптации растений к высокому уровню загрязнения путем исключения металлов в ризосфере. В отличие от накопления в почвах, отмечено высокое накопление Cr (березой и тополем) и Co (березой) в районе НПЗ, что, вероятно, обусловлено применением этих металлов в качестве катализаторов нефтехимических процессов. Отмечено максимальное накопление Fe в районе УГМК, что связано со сталеплавиным производством.

В связи с отсутствием ПДК металлов в растениях для санитарно-гигиенической оценки листьев деревьев использовали максимально-допустимый уровень (МДУ) химических элементов в кормах для сельскохозяйственных животных и государственную фармакопею Российской Федерации [12, 13]. Выявлено превышение МДУ по содержанию Pb в районе УГМК и аккумуля. з-да (5 мг/кг) фармакопейной нормы (6 мг/кг) вблизи аккумуля. з-да в случае березы. Содержание Fe, Zn, Ni, Cr



Содержание ТМ в отмытых листьях березы и тополя г. Тюмени
Heavy metals content in washed birch and poplar leaves of Tyumen

превышало МДУ (100; 50; 3; 0,5 мг/кг соответственно) практически на всех изученных участках, включая контроль, до 6,8, 5,5, 4,7 и 6,6 раз соответственно.

По результатам анализа отмытых и неотмытых листьев растений оценивали аэротехногенную миграцию металлов. Вклад аэротехногенной миграции уменьшался в ряду: Cr>Ni>Cd≈Mn>Fe>Zn≈Pb≈Co>Cu для листьев березы и для листьев тополя в аналогичном ряду: Cr>Fe>Pb>Ni>Mn>Cd>Zn≈Cu>Co, однако выделяется большее поглощение Pb и Fe и меньшее — Ni. Степень аэротехногенной миграции металлов в листья тополя была выше по сравнению с березой. В среднем воздушный перенос Cr, Ni и Cd в листья березы составлял 25–33 %, а Cr, Fe и Pb в листья тополя — 29–40 %. Вероятно, это обусловлено особенностью морфологии и анатомии листьев. В предыдущих исследованиях анализ пыли древесных растений указал на вклад атмосферного поступления Cu как минимум 30 % [7]. Снижение содержания Mn в отмытых листьях дуба в г. Риме по сравнению с неотмытыми составляло до 25 % [8], в нашем исследовании — 12–45 %. Почвенная миграция металлов в листья деревьев преобладала над воздушным переносом и составляла 65–100 %, за исключением отдельных случаев воздушного переноса Ni в листья березы, а Cr и Fe — в листья тополя.

Тенденция к воздушному переносу металлов наблюдалась на определенных участках, причем

результаты индикации по листьям березы и тополя оказались близкими. Аэротехногенная миграция была наиболее выражена и зарегистрирована практически для всех ТМ в районе УГМК, ЖД вокзала и автовокзала. Вероятно, это связано с выбросами дымовых труб сталеплавильного производства, выхлопными трубами автотранспорта, истиранием резиновых покрышек. В наименьшей степени воздушный перенос был характерен для районов аккумуляторного завода и аэропорта, однако и в этих районах в отдельных случаях он достигал 40 %. На контрольном участке для листьев березы наблюдался воздушный перенос металлов, обладающих наиболее высокой склонностью к аэротехногенной миграции (Cr, Ni, Cd). Вероятно, они образуют наиболее устойчивые аэрозоли, способные к переносу на большие расстояния,

что следует учитывать в использовании растительного сырья на загородных территориях. Однако в случае тополя, обладающего большей склонностью к сорбции металлов из атмосферы, наблюдался воздушный перенос практически всех изученных ТМ.

Результаты расчета фактора биоконцентрации (ФБК — отношение содержания ТМ в отмытых листьях к кислоторастворимой форме в почве) представлены в табл. 3.

В целом, для листьев березы значение ФБК металлов убывало в ряду Zn>Cd>Mn>Cu>Ni>Pb>Cr>Fe>Co, а для листьев тополя в ряду Cd>Zn>Cu>Mn>Ni≈Co>Cr>Pb>Fe. Выделяется относительно большая транслокация Co и меньшая для Pb. В случае большинства металлов (Pb, Co, Fe, Cr, Ni) зарегистрировано низкое значение ФБК, не превышающее

Таблица 3. Значения фактора биоконцентрации тяжелых металлов в листьях березы (в числителе) и тополя (в знаменателе) г. Тюмени

Table 3. Values of heavy metal bioconcentration factor in birch leaves (numerator) and poplar leaves (denominator) in Tyumen

ТМ	Контроль	Авто-вокзал	Мотор. 3-д	НПЗ	Аккумуля. 3-д	УГМК	Аэропорт	ЖД вокзал
Cu	0,59/1,02	0,37/0,70	0,64/0,86	0,56/0,81	0,22/0,29	0,50/0,38	0,21/0,34	0,11/0,28
Zn	5,85/4,18	3,90/3,22	7,18/24	5,13/4,97	2,37/2,57	2,07/5,40	2,50/3,75	0,63/1,62
Fe	0,02/0,02	0,02/0,02	0,03/0,06	0,10/0,10	0,02/0,02	0,11/0,07	0,01/0,10	0,03/0,03
Mn	0,53/0,45	0,15/0,39	0,61/0,32	1,70/0,51	0,19/0,21	0,37/0,28	0,45/0,11	0,31/0,21
Pb	0,02/0,08	0,04/0,07	0,16/0,14	0,07/0,06	0,05/0,01	0,36/0,07	0,01/0,06	0,01/0,01
Cd	16/67	0,58/81	18/134	4,23/20	0,27/0,29	1,27/11	1,14/5,91	0,02/3,02
Ni	0,23/0,89	0,28/0,06	0,35/0,17	0,13/0,22	0,11/0,06	0,17/0,08	0,17/0,06	0,01/0,04
Co	0,01/0,32	0,01/0,18	0,04/0,21	0,07/0,34	0,01/0,05	0,02/0,12	0,02/0,08	0,01/0,12
Cr	0,01/0,03	0,03/0,03	0,05/0,13	0,09/0,13	0,02/0,02	0,16/0,09	0,02/0,05	0,01/0,01

Примечание. Жирным шрифтом выделено значение ФБК≥1.

единицы, что свидетельствует о низкой степени транслокации. Значение ФБК Fe был менее единицы при анализе подорожника в районе автотрассы [14]. Значение ФБК >1 для Cd, Zn, Cu и Mn указывает на способность ТМ преодолевать барьеры защитных систем растений и накапливаться в них даже при низких концентрациях в почвах. Ранее было обнаружено, что ФБК для мать-и-мачехи превышает единицу в районе полигона твердых бытовых отходов на севере Тюменской области [15]. Анализ ФБК показал, что в целом тополь способен к большей транслокации металлов из почвы по сравнению с березой, что особенно было выражено для Cd и Co, в меньшей степени — для Zn. Однако транслокация Mn, Ni и Pb была более характерна для березы.

В среднем, значение ФБК металлов для листьев тополя убывало в ряду: мотор. з-д > автовокзал > контроль > НПЗ > УГМК > аэропорт > аккумуля. з-д > ЖД вокзал. Аналогичная тенденция получена и при анализе листьев березы. Расчет ФБК указывает на различную биодоступность металлов и склонность к извлечению их из почвы, т.е. потенциал для фиторемедиации. Однако, как правило, значения ФБК в городской среде было ниже, чем в контроле. Этот эффект был наиболее выражен в районе с "высоким загрязнением" — ЖД вокзал. Полученный результат объясняется защитными механизмами растений и исключением их поступления в условиях загрязнения окружающей среды.

Корреляционный анализ выявил положительную взаимосвязь между содержанием кислоторастворимой формы Pb в почве с содержанием Pb в листьях тополя и березы ($R = 0,76$ и $0,59$ соответственно), что свидетельствует о более активном корневом транспорте металла при повышении его концентрации в почве. Однако содержание Zn, Ni и Co в почве отрицательно коррелировало с их уровнем в листьях березы ($R = -0,59$; $-0,66$; $-0,54$ соответственно). Вероятно, это связано с действием защитных систем растений, однако для тополя подобные корреляции не зарегистрированы.

Выявлены положительные корреляции между содержанием ТМ в почве, например, корреля-

ция Zn и Ni в почве ($R = 0,91$), Cr и Pb ($R = 0,64$), Co и Fe ($R = 0,86$), Cu и Cd ($R = 0,84$). Положительные корреляции преобладали и между содержанием ТМ в растениях, например для березы: Zn и Co ($R = 0,75$), Pb и Cu ($R = 0,59$), Mn и Cd ($R = 0,61$), для тополя: Ni и Co ($R = 0,65$), Ni и Mn ($R = 0,53$), Mn и Co ($R = 0,91$). Для листьев тополя и березы выявлена корреляция между содержанием Cr и Fe ($R = 0,95$, $0,98$ соответственно), что, вероятно, обусловлено совместным поступлением этих металлов и присутствием хрома в стальных изделиях. Полученные корреляции указывают на комплексное антропогенное поступление ТМ в окружающую среду.

Корреляционный анализ выявил отрицательные корреляции между содержанием Cr в почве и Mn в растении ($R = -0,50$ и $-0,52$ для березы и тополя соответственно), Mn в почве и Cr в растении ($R = -0,66$ и $-0,61$ для березы и тополя соответственно). Это свидетельствует об антагонизме транслокации Cr и Mn: присутствие одного металла в почве приводит к подавлению переноса другого в листья, вероятно, из-за литофильности и жесткости (по Пирсону) обоих катионов.

Анализ накопления ТМ в почвах и растениях, аэротехногенной миграции металлов, их биодоступности (по значению ФБК) позволил условно разделить изученные металлы на три группы.

1. "Металлы с наибольшим экологическим риском": Cd, Pb, Cr.

2. "Металлы с умеренным экологическим риском": Zn, Fe, Ni.

3. "Металлы с низким экологическим риском": Mn, Cu, Co.

При переходах между этими группами плавно уменьшается степень накопления металлов в почвах и листьях березы и тополя, склонность к воздушной миграции. Значение ФБК также в среднем снижается при переходе между группами, однако наблюдается большая неоднородность в связи с высокой биодоступностью Zn, Mn и Cu как эссенциальных микроэлементов.

Выводы

1. Накопление ТМ в почвах из техногенных зон г. Тюмени по сравнению с контролем убывало в

ряду Pb>Cd>Cr>Ni>Zn>Cu>Fe>>Co>Mn и достигало 20 раз. Накопление металлов листьями березы относительно контроля убывало в ряду Pb>Cr>Fe>Co>Cu>Ni>>Zn>Mn>Cd, а листьями тополя — Cr>Fe>Pb>Zn>Cd>Cu>Co>>Mn>Ni. Анализ накопления и миграции металлов в почвах и деревьях из городской среды позволил выделить Cd, Pb и Cr как металлы с "наибольшим экологическим риском".

2. Аэротехногенная миграция металлов наблюдалась для обоих изученных видов деревьев, однако для листьев тополя была более выражена по сравнению с березой. Индикация атмосферной миграции металлов в городской среде с использованием листьев тополя указала на следующую склонность металлов к воздушному переносу Cr>Fe>>Pb>Ni>Mn>Cd>Zn≈Cu>Co, а по листьям березы — Cr>Ni>>Cd≈Mn>Fe>Zn≈Pb≈Co>Cu. Степень аэротехногенной миграции металлов в отдельных случаях достигала 60 %, однако в целом преобладала транслокация металлов из почвы.

3. Использование листьев березы и тополя как индикаторов экологической обстановки в городской среде приводит к близким результатам по степени биодоступности, аэротехногенного переноса и накопления металлов в различных районах. Однако листья березы являются более чувствительным индикатором, так как степень накопления металлов в техногенных зонах по сравнению с контролем была выше, чем у листьев тополя.

4. Сравнение потенциала фиторемедиации с использованием древесных растений показало, что листья тополя обладают большей способностью к транслокации металлов, в особенности Cd, Co и Zn, однако транслокация Mn, Ni и Pb была более выражена для листьев березы. В среднем значение ФБК и абсолютное содержание металлов в листьях тополя было выше по сравнению с березой, что повышает эффективность фиторемедиации. Накопление металлов в листьях деревьев городской среды создает необходимость утилизировать их как опасный отход для предотвращения обратного поступления металлов в почву.

Литература

1. Rai P.K., Lee S.S., Zhang M., Tsang Y.F., Kim K. Heavy metals in food crops: health risks, fate, mechanisms and management. *Environment International*. 2019. No. 125. P. 365–385.
2. Shahid M., Natasha, Dumat C., Niazi N.K., Xiong T.T., Farooq A.B.U., Khalid S. Ecotoxicology of heavy metal(loid)-enriched particulate matter: foliar accumulation by plants and health impacts. *Reviews of Environmental Contamination and Toxicology*. Springer, Cham. 2019. Vol. 253. P. 65–113.
3. Подлужная А.С., Бадмаева С.Е. Накопление тяжелых металлов в древесных растениях скверов и парков правобережья Красноярска. *Вестник КрасГАУ*. 2016. № 8. С. 91–96.
4. Масленников П.В., Дедков В.П., Куркина М.В., Васькин А.С., Журавлёв И.О., Бавтрук Н.В. Аккумуляция металлов в растениях урбоэкосистем. *Вестник Балтийского федерального университета им. Канта*. 2015. № 7. С. 57–69.
5. Неvedров Н.П., Курасова В.И. Тяжелые металлы в тканях и органах *Populus Pyramidalis*. *Известия вузов. Прикладная химия и биотехнология*. 2018. Т. 8. № 2. С. 125–131.
6. Kribek B., Mikova J., Knesl I., Mihaljevic M., Sykoro-va I. Uptake of trace elements and isotope fractionation of Cu and Zn by birch (*Betula pendula*) growing on mineralized coal waste pile. *Applied Geochemistry*. 2020. No. 122. P. 104741.
7. Gajbhiye T., Kim K., Pandey S.K., Brown J.C. Foliar transfer of dust and heavy metals on roadside plants in a subtropical environment. *Asian Journal of Atmospheric Environment*. 2016. Vol. 10. No. 3. P. 137–145.
8. Gratani L. Relationship between leaf life-span and photosynthetic activity of *Quercus ilex* in polluted urban areas (Rome). *Environmental Pollution*. 2000. No. 110. P. 19–28.
9. Мейсуро́ва А.Ф. Техногенное загрязнение почв тяжелыми металлами в г. Твери. *Вестник ТвГУ. Серия "Биология и экология"*. 2017. № 2. С. 324–342.
10. Kodirov O., Shukurov N. Heavy Metal Distribution in Soils near the Almalyk Mining and Smelting Industrial Area, Uzbekistan. *Acta Geol. Sin.* 2009. Vol. 83. No. 5. P. 985–990.
11. Семенова И.Н., Биктимерова Г.Я., Илбулова Г.Р., Исанбаева Г.Т. Содержание тяжелых металлов в почве окрестностей карьеров Челябинской области. *Современные проблемы науки и образования*. 2015. № 2. С. 561–566.
12. Временный максимально-допустимый уровень (МДУ) содержания некоторых химических элементов и госсипола в кормах для сельскохозяйственных животных и кормовых добавках 123-4/281-8-87. М., Государственный агропромышленный комитет СССР, Главное управление ветеринарии, 1987, 25 с.
13. ОФС 1.5.3.0009.15. Общая фармакопейная статья. Определение содержания тяжелых металлов и мышьяка в лекарственном растительном сырье и лекарственных растительных препаратах. М., Министерство здравоохранения Российской Федерации, 2015. 13 с.
14. Galal T.M., Shehata H.S. Bioaccumulation and translocation of heavy metals by *Plantago major* L. grown in contaminated soils under the effect of traffic pollution. *Ecological indicators*. 2015. No. 48. P. 244–251.
15. Popova E. Accumulation of heavy metals in soil and plants adjacent to municipal solid waste disposal facility. *IOP Conf. Series: Journal of Physics. Conf. Series*. 2019. P. 1145–1158.

References

1. Rai P.K., Lee S.S., Zhang M., Tsang Y.F., Kim K. Heavy metals in food crops: health risks, fate, mechanisms and management. *Environment International*. 2019. No. 125. P. 365–385.
2. Shahid M., Natasha, Dumat C., Niazi N.K., Xiong T.T., Farooq A.B.U., Khalid S. Ecotoxicology of heavy metal(loid)-enriched particulate matter: foliar accumulation by plants and health impacts. *Reviews of Environmental Contamination and Toxicology*. Springer, Cham. 2019. Vol. 253. P. 65–113.
3. Podluzhnaya A.S., Badmaeva S.E. Nakoplenie tyazhelykh metallov v drevesnykh rasteniyakh skverov i parkov pravoberezh'ya Krasnoyarska. *Vestnik KrasGAU*. 2016. № 8. S. 91–96.
4. Maslennikov P.V., Dedkov V.P., Kurkina M.V., Vashcheikin A.S., Zhuravlev I.O., Bavtruk N.V. Akkumulyatsiya metallov v rasteniyakh urboekosistem. *Vestnik Baltiskogo federal'nogo universiteta im. Kanta*. 2015. № 7. S. 57–69.
5. Nevedrov N.P., Kurasova V.I. Tyazhelye metally v tkanyakh i organakh *Populus Pyramidalis*. *Izvestiya vuzov. Prikladnaya khimiya i biotekhnologiya*. 2018. T. 8. № 2. S. 125–131.
6. Kribek B., Mikova J., Knesl I., Mihaljevic M., Sykoro-va I. Uptake of trace elements and isotope fractionation of Cu and Zn by birch (*Betula pendula*) growing on mineralized coal waste pile. *Applied Geochemistry*. 2020. No. 122. P. 104741.
7. Gajbhiye T., Kim K., Pandey S.K., Brown J.C. Foliar transfer of dust and heavy metals on roadside plants in a subtropical environment. *Asian Journal of Atmospheric Environment*. 2016. Vol. 10. No. 3. P. 137–145.
8. Gratani L. Relationship between leaf life-span and photosynthetic activity of *Quercus ilex* in polluted urban areas (Rome). *Environmental Pollution*. 2000. No. 110. P. 19–28.
9. Meisurova A.F. Tekhnogennoe zagryaznenie pochv tyazhelymi metallami v g. Tveri. *Vestnik TvGU. Seriya "Biologiya i ekologiya"*. 2017. № 2. S. 324–342.
10. Kodirov O., Shukurov N. Heavy Metal Distribution in Soils near the Almalyk Mining and Smelting Industrial Area, Uzbekistan. *Acta Geol. Sin.* 2009. Vol. 83. No. 5. P. 985–990.
11. Semenova I.N., Biktmerova G.Ya., Ilbulova G.R., Isanbaeva G.T. Soderzhanie tyazhelykh metallov v pochve okrestnostei kar'eroev Chelyabinskoi oblasti. *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya*. 2015. № 2. S. 561–566.
12. Vremennyi maksimal'no-dopustimyi uroven' (MDU) soderzhaniya nekotorykh khimicheskikh elementov i gossipola v kormakh dlya sel'skokhozyaystvennykh zhivotnykh i kormovykh dobavkakh 123-4/281-8-87. M., Gosudarstvennyi agropromyshlennyi komitet SSSR, Glavnoe upravlenie veterinarii, 1987, 25 s.
13. OFS 1.5.3.0009.15. Obshchaya farmakopeinaya stat'ya. Opredelenie soderzhaniya tyazhelykh metallov i mysh'yaka v lekarstvennom rastitel'nom syr'e i lekarstvennykh rastitel'nykh preparatakh. M., Ministerstvo zdravookhraneniya Rossiiskoi Federatsii, 2015. 13 s.
14. Galal T.M., Shehata H.S. Bioaccumulation and translocation of heavy metals by *Plantago major* L. grown in contaminated soils under the effect of traffic pollution. *Ecological indicators*. 2015. No. 48. P. 244–251.
15. Popova E. Accumulation of heavy metals in soil and plants adjacent to municipal solid waste disposal facility. *IOP Conf. Series: Journal of Physics. Conf. Series*. 2019. P. 1145–1158.

А.С. Петухов – канд. хим. наук, ассистент, Тюменский государственный университет (ТюмГУ), e-mail: a.s.petukhov@utmn.ru • Т.А. Кремлева – д-р хим. наук, профессор, ТюмГУ, e-mail: t.a.kremleva@utmn.ru • Н.А. Хритохин – канд хим. наук, профессор, ТюмГУ, e-mail: n.a.kritokhin@utmn.ru • Г.А. Петухова – д-р биол. наук, профессор, ТюмГУ, e-mail: g.a.petukhova@utmn.ru

A.S. Petukhov – Cand. Sci. (Chem.), Assistant, Tyumen State University (TyumSU), e-mail: a.s.petukhov@utmn.ru • T.A. Kremleva – Dr. Sci. (Chem.), Professor, TyumSU, e-mail: t.a.kremleva@utmn.ru • N.A. Khritohin – Cand. Sci. (Biol.), Professor, TyumSU, e-mail: n.a.kritokhin@utmn.ru • G.A. Petukhova – Dr. Sci. (Biol.), Professor, TyumSU, e-mail: g.a.petukhova@utmn.ru