

Накопление тяжёлых металлов в почвах и листьях берёзы повислой (*Betula pendula*) в условиях загрязнения городской среды

© 2025. А. С. Петухов, к. х. н., ст. преподаватель, Т. А. Кремлева, д. х. н., профессор, Е. Д. Левчук, студент, Н. А. Хритохин, к. х. н., профессор, Г. А. Петухова, д. б. н., профессор, Тюменский государственный университет, 625003, Россия, г. Тюмень, ул. Володарского, д. 6, e-mail: revo251@mail.ru

Целью работы было исследование особенностей миграции тяжёлых металлов (Cu, Zn, Fe, Mn, Pb, Cd, Ni, Co, Cr) в системе почва – берёза повислая (*Betula pendula*), а также установление вклада аэротехногенной миграции металлов в их общее накопление листьями берёзы. Пробы почвы и листьев берёзы повислой были отобраны вблизи промышленных предприятий и транспортных узлов г. Тюмени. Содержание подвижной и кислоторастворимой формы металлов в почвах, а также содержание металлов в отмытых и не отмытых листьях берёзы определяли методом атомно-эмиссионной спектроскопии. Накопление металлов в городских почвах относительно контроля убывало в ряду: Cd>Pb>Cr>Ni>Zn>Cu>Fe>Co>Mn, наблюдались превышения ПДК по содержанию Pb и Ni. Накопление металлов в листьях берёзы убывало в ряду: Pb>Cr>Fe>Co>Cu>Ni>Zn>Mn>Cd, отмечено превышение максимально-допустимого уровня для Pb, Zn, Ni, Fe и Cr. Наибольшее накопление металлов в почвах наблюдалось в районе железнодорожного вокзала, а в растениях – вблизи металлургического завода. Подвижность тяжёлых металлов в почве убывала в ряду Cd>Pb>Mn>Zn>Ni>Co>Cu>Cr>Fe, что коррелирует с изменением их биодоступности по накоплению в листьях берёзы повислой: Zn>Cd>Mn>Cu>Ni>Pb>Cr>Fe>Co. Вклад аэротехногенной миграции, изученный по разности содержания металлов в отмытых и не отмытых листьях берёзы, составлял в основном 20–30%, и по склонности к воздушному переносу металлы располагались в ряд: Cr>Ni>Cd≈Mn>Fe>Zn≈Pb≈Co>Cu. Отмечена взаимозависимость между степенью воздушного переноса металлов и летучестью их соединений.

Ключевые слова: тяжёлые металлы, почвы, растения, аэротехногенная миграция, фактор биоконцентрации, аккумуляция.

Heavy metal accumulation in soils and leaves of *Betula pendula* in urban pollution conditions

© 2025. A. S. Petukhov ORCID: 0000-0003-2906-174X, T. A. Kremleva ORCID: 0000-0002-8157-8677, E. D. Levchuk ORCID: 0009-0000-0795-6644, N. A. Khritokhin ORCID: 0000-0003-0580-2283, G. A. Petukhova ORCID: 0000-0001-9229-4912, University of Tyumen, 6, Volodarskogo St., Tyumen, Russia, 625003, e-mail: revo251@mail.ru

The main aim was to study heavy metal (Cu, Zn, Fe, Mn, Pb, Cd, Ni, Co, Cr) migration in soil-birch (*Betula pendula*) system, as well as to determine the contribution of metal aerotechnogenic migration to their total accumulation by birch leaves. Soils and birch leaves were sampled near industrial enterprises and transport hubs in Tyumen. The mobile and acid-soluble metal fraction content in soils, as well as metal content in washed and unwashed birch leaves were determined by atomic emission spectroscopy. Metal accumulation in urban soils compared to the control decreased in the order: Cd>Pb>Cr>Ni>Zn>Cu>Fe>Co>Mn. Pb and Ni content exceeded the MPC. Metal accumulation in birch leaves decreased in the order: Pb>Cr>Fe>Co>Cu>Ni>Zn>Mn>Cd. Pb, Zn, Ni, Fe, and Cr content exceeded the MPC. The greatest metal accumulation in soil was at railway station, while in birch leaves – in the vicinity of metallurgical plant. Metal mobility in soil decreased in the order Cd>Pb>Mn>Zn>Ni>Co>Cu>Cr>Fe, which correlated with their bioavailability: Zn>Cd>Mn>Cu>Ni>Pb>Cr>Fe>Co. The contribution of aerotechnogenic metal migration studied by the difference of metal content in washed and unwashed leaves, was 20-30%. Aerotechnogenic migration decreased in the order: Cr>Ni>Cd≈Mn>Fe>Zn≈Pb≈Co>Cu. The correlation between aerotechnogenic migration and metal compounds volatility was established.

Keywords: heavy metals, soils, plants, aerotechnogenic migration, bioconcentration factor, accumulation.

Проблема загрязнения окружающей среды тяжёлыми металлами (ТМ) остаётся одной из наиболее актуальных в экологии. Это объясняется повсеместным использованием металлов в хозяйственной деятельности, длительным периодом удаления металлов из почв и живых организмов, а также способностью к миграции по пищевым цепям [1]. Источниками загрязнения ТМ являются выбросы металлургических предприятий, транспорт, производство и утилизация химических источников тока, электростанции, процессы транспортировки и переработки нефти, удобрения и пестициды [1–3].

Загрязнение почв ТМ приводит к их поступлению и накоплению в растениях. Тяжёлые металлы способны оказывать разнообразное токсическое действие в растительных клетках, нарушая процессы роста, фотосинтеза и дыхания [1, 4]. Наибольший стресс от загрязнения ТМ испытывают урбоценозы, растительность которых представлена в большей степени древесными растениями. Деревья в городских ландшафтах увеличивают биоразнообразие, выделяют кислород, понижают температуру воздуха и уровень шума. В литературе описана способность растений к фоллиарному транспорту ТМ [5]. Деревья, поглощая токсичные газы и пыль, являются фильтрами городского воздуха, поэтому актуальным является установление степени почвенной и атмосферной миграции металлов в содержание ТМ листьями деревьев.

Тюмень является быстро развивающимся индустриальным городом с большим количеством автотранспорта на душу населения, что создаёт угрозу загрязнения ТМ. Содержание ТМ в почвах г. Тюмени было ранее описано в литературе [6–9], однако проблема накопления металлов растениями города в литературе не представлена.

Целью работы стало выявление особенностей миграции тяжёлых металлов (Cu, Zn, Fe, Mn, Pb, Cd, Ni, Co, Cr) в системе почва – берёза повислая (*Betula pendula*), а также установление вклада аэротехногенной миграции металлов в их общее накопление листьями берёзы.

Объекты и методы исследования

Пробы почвы и листьев берёзы повислой (*Betula pendula*) собраны в г. Тюмени в сентябре 2022 г. на следующих участках: контроль – участок на удалении 40 км от города, на удалении 200 м от аэропорта «Рощино», железнодорожного вокзала и автовокзала,

а также на удалении 200 м от предприятий: моторостроительного завода (Моторный завод), нефтеперерабатывающего завода (НПЗ), аккумуляторного завода (Аккумуляторный завод) и металлургического завода (УГМК).

Пробы почвы отбирали методом конверта с площади 100 м² на глубину 0–10 см согласно ГОСТ 17.4.4.02-2017. В качестве контроля был выбран участок, удалённый от источников антропогенного загрязнения. Почвы на всех участках относились к дерново-подзолисто-му типу. Зелёные листья берёзы (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 растениях оценивали вклад аэротехногенной миграции металлов.

В пробах почв извлекали кислоторастворимую форму металлов с помощью 5 М HNO₃ (РД 52.18.191-2018) и подвижную форму с помощью ацетатно-аммонийного буфера с рН, равным 4,8 (РД 52.18.289-90). Извлечение металлов из проб листьев берёзы проводили 5 М HNO₃. Процедуру пробоподготовки проводили в двух повторностях. Содержание металлов определяли методом атомно-эмиссионной спектроскопии с индуктивно-связанной плазмой на приборе PlasmaQuant PQ 9000 в центре коллективного пользования «Рациональное природопользование и физико-химические исследования» Тюменского государственного университета.

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

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

где C_i – содержание кислоторастворимой формы металла в почве исследуемого района, C_{контроль} – содержание кислоторастворимой формы металла в почве контроля, n – количество исследуемых металлов.

Подвижность ТМ в почве определяли как отношение содержания подвижной формы к кислоторастворимой. 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 расчётом дове-

рительного интервала и проведением корреляционного анализа в программе Statistica 12 при P=0,95.

Результаты и обсуждение

Результаты определения содержания тяжёлых металлов в изученных почвах г. Тюмени представлены в таблице 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: Cd>Pb>Cr>Ni>Zn>Cu>Fe>Co>Mn. Превышение содержания кислоторастворимой формы ТМ достигало для Cd 18 раз, для Pb – 20 раз, Cr – 12 раз, Ni – 11 раз, Zn – 5,5 раз по сравнению с контрольной почвой. В то же время, накопления Fe, Co и Mn в почвах городской среды относительно контроля практически не наблюдалось, что свидетельствует преимущественно о 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 [10], а содержание Cu и Zn было аналогичным в промышленной

городской зоне в Польше [11]. Аналогичное содержание Ni было зарегистрировано в почвах Красноярского края [12] и промышленной зоне в Узбекистане [13]. Содержание Pb вблизи аккумуляторного завода и железнодорожного вокзала было близким к его уровню в почве вблизи горно-металлургического завода в Узбекистане [13]. Содержание Mn в почвах г. Тюмени соответствовало ранее опубликованным данным [7], а также близко к его содержанию в почве из карьеров Челябинской области [14]. На Южном Урале отмечено близкое загрязнение почв Zn, Pb и Cd под влиянием горно-металлургической промышленности, выбросов предприятий машиностроения, нефтеперерабатывающих и нефтехимических заводов [15]. Загрязнение почвы Cr вблизи железнодорожного вокзала оказалось сравнимым с промышленной зоной в провинции Шэньси, Китай [16]. Содержание Co в городских почвах было близким к его содержанию в почвах из урановых шахт в Южном Китае [17].

По степени накопления ТМ относительно контроля изученные участки можно расположить в следующий ряд: железнодорожный вокзал > аккумуляторный завод > УГМК >

Содержание тяжёлых металлов в почвах г. Тюмени (мг/кг)
Heavy metal content (mg/kg) in Tyumen soil

Таблица 1 / Table 1

Металл Metal	Контроль Control	Авто- вокзал Bus station	Моторный завод Engine- building plant	НПЗ Oil refinery	Аккумуля- торный завод Battery- manufacturing plant	УГМК Metallur- gical plant	Аэропорт Airport	Железнодорожный вокзал Railway station
Cu	<u>0,33±0,01</u> 6,1±0,2	<u>0,24±0,03</u> 12±1	<u>0,45±0,02</u> 7,5±0,3	<u>0,64±0,05</u> 9,4±0,3	<u>0,35±0,02</u> 20±1	<u>0,51±0,02</u> 15±1	<u>0,17±0,01</u> 14±1	<u>2,9±0,1</u> 30±2
Zn	<u>1,1±0,1</u> 15±1	<u>2,1±0,1</u> 25±2	<u>2,7±0,1</u> 13±1	<u>8,0±0,4</u> 27±2	<u>5,3±0,2</u> 45±3	<u>14,2±0,6</u> 44±3	<u>4,5±0,2</u> 33±2	<u>29±1</u> 84±5
Fe	<u>100±10</u> 4200±500	<u>5,9±0,2</u> 5200±400	<u>26±1</u> 2000±100	<u>15±1</u> 2500±500	<u>12±1</u> 8400±100	<u>26±2</u> 3700±500	<u>7,7±0,2</u> 7000±800	<u>22±1</u> 6400±900
Mn	<u>109±2</u> 580±20	<u>88±5</u> 550±20	<u>115±2</u> 380±10	<u>119±3</u> 370±10	<u>121±4</u> 480±10	<u>158±7</u> 430±10	<u>113±1</u> 600±10	<u>96±2</u> 300±10
Pb	<u>1,2±0,1</u> 7,9±0,2	<u>1,3±0,1</u> 9,7±0,5	<u>2,0±0,1</u> 8,1±0,4	<u>4,6±0,2</u> 14±1	<u>53±2</u> 156±9	<u>3,2±0,2</u> 13±1	<u>2,4±0,1</u> 17±1	<u>54±2</u> 120±4
Cd	<u>≤0,01</u> ≤0,01	<u>0,01±0,01</u> 0,02±0,01	<u>≤0,01</u> ≤0,01	<u>0,03±0,01</u> 0,03±0,01	<u>0,08±0,01</u> 0,17±0,01	<u>0,07±0,01</u> 0,10±0,01	<u>0,08±0,01</u> 0,15±0,01	<u>0,14±0,01</u> 0,17±0,01
Ni	<u>3,8±0,1</u> 13±1	<u>2,3±0,1</u> 24±1	<u>3,5±0,2</u> 14±1	<u>3,1±0,2</u> 23±1	<u>2,4±0,1</u> 38±2	<u>2,9±0,2</u> 19±1	<u>1,9±0,1</u> 31±2	<u>12±1</u> 145±4
Co	<u>0,28±0,01</u> 6,6±0,9	<u>0,17±0,01</u> 9,6±0,9	<u>0,41±0,04</u> 5,4±0,1	<u>0,30±0,02</u> 4,8±0,2	<u>0,41±0,02</u> 8,8±1,6	<u>0,46±0,02</u> 5,8±0,8	<u>0,33±0,01</u> 9,8±0,3	<u>0,64±0,03</u> 8,8±0,6
Cr	<u>0,60±0,05</u> 8,4±0,4	<u>0,26±0,02</u> 17±1	<u>0,28±0,03</u> 6,2±0,1	<u>0,43±0,08</u> 14±1	<u>0,28±0,09</u> 25±1	<u>0,48±0,02</u> 14±1	<u>0,19±0,04</u> 19±1	<u>1,3±0,1</u> 99±3

Примечание: над чертой – подвижная форма, под чертой – кислоторастворимая.
Note: above the line – mobile fraction, under the line – acid-soluble fraction.

аэропорт > НПЗ > автовокзал > моторостроительный завод. По результатам расчёта суммарного показателя загрязнения район железнодорожного вокзала и аккумуляторного завода можно отнести к участку «высокого загрязнения» ($Z_c=60, 45$ соответственно), район аэропорта – к участку «среднего загрязнения» ($Z_c=22$), УГМК – «низкому загрязнению» ($Z_c=14$).

Высокое содержание ТМ в почве вблизи железнодорожного 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 аккумуляторного завода и железнодорожного 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 железнодорожный 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.

В ряде случаев содержание ТМ в почвах превышало ПДК (СанПиН 1.2.3.3685-21) по подвижным формам: Pb, Ni и Zn в районе железнодорожного вокзала в 9,0, 3,0 и 1,3 раза, Pb в районе аккумуляторного завода в 9 раз, а также на уровне ПДК по содержанию Cu в районе железнодорожного вокзала. Кроме того, зарегистрировано превышение ПДК по валовому содержанию Ni и Pb в районе железнодорожного вокзала в 1,8 и 1,2 раза соответственно. Практически во всех изученных пробах, включая контроль, отмечено превышение ПДК подвижной формы (100 мг/кг), что свидетельствует о повышенном биогеохимическом фоне этого элемента в районе исследования.

Подвижность ТМ в почвах убывала в ряду: Cd > Pb > Mn > Zn > Ni > Co > Cu > Cr > Fe (рис.). Подвижность Cd в почве достигала 94%, в то время как доля подвижных форм Fe не превышала 2,4%. Подвижность металлов может указывать на их форму в почве. Для Fe характерно присутствие в почве в форме малорастворимых оксидов [3]. Низкая подвижность Cr указывает на его нахождение в трёхвалентной форме, т. к. соединения шестивалентного Cr более растворимы и подвижны в почве [18]. Низкая подвижность Cu и Co, вероятно, говорит о закреплении металлов в минеральной части почвы. Высокая подвижность Zn находится в соответствии с данными, что Zn имеет более низкое сродство к гумусовым кислотам,

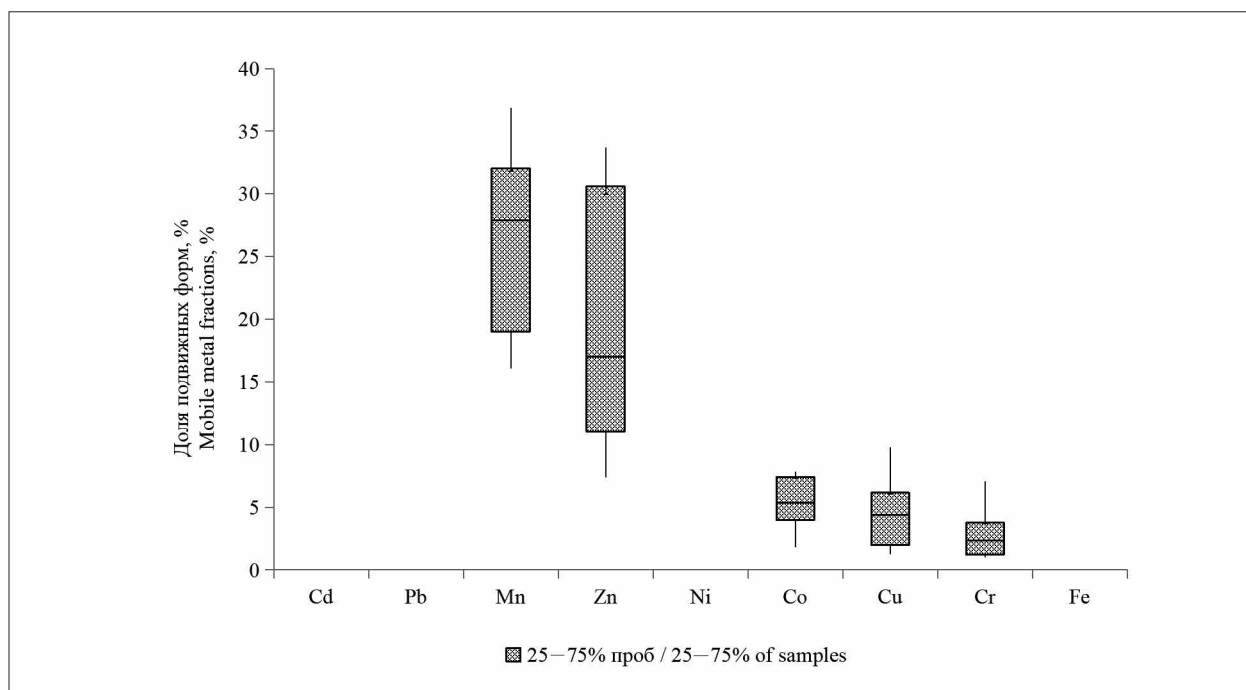


Рис. Подвижность тяжёлых металлов в почвах г. Тюмени
Fig. Heavy metal mobility in Tyumen soils

чем другие ТМ [3]. Марганец и кадмий образуют стабильные аквакомплексы и обладают низким сродством к гумусовому веществу, слабой комплексообразующей способностью, что обуславливает высокую подвижность в почве [3]. Подвижность **Mn в почве оказалась** близкой к его подвижности в почвах в районе горного комбината в Армении [19]. Свинец в среде ацетатно-аммонийного буфера переходит в хорошо растворимую и стабильную форму ацетата $Pb(CH_3COO)_2$. В ряде случаев загрязнение почвы ТМ относительно контроля сопровождалось их максимальной подвижностью: на участке УГМК (Zn, Co, Mn), железнодорожный вокзал (Zn, Pb, Mn, Cu), НПЗ (Cd). **Это может создать опасность** поступления металлов в растения и пищевые цепи.

Содержание ТМ в листьях берёзы представлено в таблице 2. Концентрация практически всех металлов в листьях берёзы из городской среды была повышена по сравнению с контролем. В целом, накопление металлов растениями относительно 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. Интенсивное накопление Pb растениями коррелирует с его высокой подвижностью в почве.

Содержание Cu и Pb в листьях берёзы в районе бывшей угольной шахты в Чехии оценивали в 6–14 и 0,8–9,5 мг/кг соответственно, что близко к полученным результатам [20]. Содержание **Cu, Zn, Fe, Mn, Pb, Cd и N в листьях берёзы** оказалось близким к их концентрациям в листьях берёзы из парков и скверов г. Красноярска [21]. Листья берёзы в промышленной зоне г. Калининграда накапливали 80 мг/кг Zn и 360 мг/кг Mn [22], что соответствует результатам нашего исследования.

Изученные районы можно расположить в следующий ряд по относительному накоплению металлов листьями берёзы: УГМК > аккумуляторный завод > НПЗ > железнодорожный вокзал > моторостроительный завод > автовокзал > аэропорт. Несмотря на «очень высокое загрязнение» в районе железнодорожного вокзала, накопление ТМ в листьях берёзы оказалось невысоким, вероятно, из-за адаптации растений к высокому уровню загрязнения путём исключения металлов в ризосфере. То же можно отметить для Cd: несмотря на его высокую подвижность в почве, аккумуляции Cd растениями не выявлено, вероятно, из-за барьеров растений перед его высокой токсичностью. С другой стороны,

наблюдалось накопление железа, обладающего низкой подвижностью в почве, по всей видимости, за счёт его активного транспорта белками-транспортёрами как жизненно важного микроэлемента. В отличие от накопления в почвах, отмечено высокое накопление Cr и Co листьями берёзы в районе НПЗ, что вероятно обусловлено применением этих металлов в качестве катализаторов нефтехимических процессов.

В связи с отсутствием ПДК металлов в растениях для санитарно-гигиенической оценки листьев берёзы и сравнения полученных результатов можно использовать временный максимально-допустимый уровень (МДУ) содержания некоторых химических элементов и госсипола в кормах для сельскохозяйственных животных и кормовых добавках (123-4/281-8-87) и государственную фармакопею Российской Федерации ОФС 1.5.3.0009.15. Выявлено превышение МДУ по содержанию Pb в районе УГМК и аккумуляторного завода (5 мг/кг), фармакопейной нормы Pb (6 мг/кг) вблизи аккумуляторного завода. Содержание Zn и Ni превышало МДУ (50 и 3 мг/кг соответственно) на всех изученных участках, включая контроль, до 3 и 2,5 раз соответственно. Содержание Fe превышало МДУ (100 мг/кг) на большинстве участков в городской среде. Зарегистрировано превышение МДУ Cr (0,5 мг/кг) в районе автовокзала, моторостроительного завода, НПЗ, УГМК и железнодорожного вокзала до 5 раз.

Обработка листьев берёзы дистиллированной водой выявила аэротехногенную миграцию металлов. Вклад аэротехногенной миграции отличался для разных металлов и в целом уменьшался в ряду: $Cr > Ni > Cd \approx Mn > Fe > Zn \approx Pb \approx Co > Cu$. Это соответствует ранее полученным результатам о высокой склонности Cr к воздушному переносу и о низком вкладе Cu в аэротехногенную миграцию [23]. Аэротехногенная миграция Cr и Ni достигала 50–60% (в среднем 25–30%) и наблюдалась практически на всех участках, а для Cu была незначима, выражена только в районе железнодорожного вокзала – до 15%. В предыдущих исследованиях анализ пыли древесных растений указал на вклад атмосферного поступления Cu, как минимум, 30% [24]. Снижение содержания Mn в отмытых листьях дуба в г. Риме по сравнению с неотмытыми составляло до 25% [25], в нашем исследовании 12–45%. За исключением отдельных случаев воздушного переноса Ni и Cr, почвенная миграция металлов в листья

берёзы преобладала над воздушным переносом и составляла соответственно 65–100%.

Обнаружена корреляция между склонностью металлов к аэротехногенной миграции и температурами плавления их хлоридов ($R=0,63$) и кипения их оксидов ($R=0,62$). Вероятно, металлы, образующие более летучие соединения, следовательно, и более стабильные аэрозоли, с меньшей вероятностью осаждаются на поверхности листьев растений.

Кроме зависимости от свойств металлов, наблюдалась тенденция к воздушному переносу металлов на определённых участках. Аэротехногенная миграция была наиболее выражена и зарегистрирована практически для всех ТМ в районе УГМК и автовокзала. Вероятно, это связано с выбросами дымовых труб сталеплавильного производства, выхлопными трубами автотранспорта, истиранием резиновых покрышек. На контрольном участке 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 исполь-

зовании растительного сырья на загородных территориях.

Результаты расчёта фактора биоконцентрации (ФБК) представлены в таблице 3. В целом, значение ФБК металлов убывало в ряду: $Zn > Cd > Mn > Cu > Ni > Pb > Cr > Fe > Co$. Для большинства металлов (Pb, Co, Fe, Cr, Ni, Cu) зарегистрировано низкое значение ФБК, не превышающее единицы. Это означает, что только малая доля ТМ переходит из почвы в растения. Фактор биоконцентрации Fe был менее единицы при анализе подорожника из района автотрассы [26]. Значение ФБК > 1 для Mn, Cd и Zn указывает на способность ТМ преодолевать барьеры защитных систем растений и накапливаться в них, даже при низких концентрациях в почвах. Ранее было обнаружено, что фактор биоконцентрации Zn для мать-и-мачехи превышает единицу в районе полигона твёрдых бытовых отходов на севере Тюменской области [27].

Расчёт ФБК указывает на различную биодоступность металлов и склонность к извлечению их из почвы. Однако, как правило, значение ФБК в городской среде было ниже, чем в контроле. Этот эффект был наиболее

Таблица 2 / Table 2
Содержание (мг/кг) тяжёлых металлов в листьях берёзы на территории г. Тюмени
Heavy metal content (mg/kg) in birch leaves (Tyumen)

Металл Metal	Контроль Control	Автовокзал Bus station	Моторный завод Engine-building plant	НПЗ Oil refinery	Аккумуляторный завод Battery-manufacturing plant	УГМК Metallurgical plant	Аэропорт Airport	Железнодорожный вокзал Railway station
Cu	<u>3,4±0,1</u> 3,6±0,1	<u>4,4±0,1</u> 4,3±0,1	<u>3,8±0,1</u> 3,9±0,1	<u>5,7±0,1</u> 5,3±0,1	<u>4,5±0,1</u> 4,4±0,1	<u>8,3±0,2</u> 7,6±0,1	<u>3,1±0,1</u> 2,9±0,1	<u>3,9±0,1</u> 3,4±0,1
Zn	<u>94±2</u> 90±2	<u>82±2</u> 86±3	<u>102±2</u> 94±2	<u>154±6</u> 137±7	<u>113±3</u> 106±5	<u>138±2</u> 90±1	<u>80±2</u> 82±1	<u>83±4</u> 53±1
Fe	<u>84±2</u> 82±1	<u>153±10</u> 126±2	<u>88±2</u> 68±2	<u>365±8</u> 245±5	<u>151±2</u> 155±5	<u>480±6</u> 392±4	<u>97±3</u> 82±4	<u>219±5</u> 207±4
Mn	<u>272±8</u> 279±10	<u>112±3</u> 84±1	<u>412±9</u> 228±2	<u>399±12</u> 404±11	<u>112±4</u> 93±2	<u>228±2</u> 157±2	<u>303±11</u> 266±10	<u>49±1</u> 53±4
Pb	<u>0,07±0,01</u> 0,10±0,03	<u>0,48±0,07</u> 0,36±0,02	<u>1,3±0,1</u> 1,3±0,1	<u>1,3±0,1</u> 0,96±0,07	<u>6,4±0,2</u> 7,0±0,5	<u>5,1±0,2</u> 4,8±0,1	<u>0,14±0,02</u> 0,14±0,02	<u>1,4±0,1</u> 1,0±0,1
Cd	<u>0,20±0,02</u> 0,16±0,01	<u>0,02±0,01</u> 0,01±0,01	<u>0,15±0,01</u> 0,18±0,02	<u>0,07±0,01</u> 0,08±0,02	<u>0,06±0,01</u> 0,05±0,01	<u>0,21±0,01</u> 0,12±0,01	<u>0,08±0,01</u> 0,10±0,01	<u>≤0,01</u> ≤0,01
Ni	<u>4,1±0,2</u> 3,0±0,1	<u>7,6±0,2</u> 6,8±0,3	<u>3,8±0,2</u> 3,9±0,2	<u>4,1±0,2</u> 3,0±0,1	<u>3,0±0,1</u> 3,1±0,2	<u>3,8±0,1</u> 3,3±0,1	<u>6,0±0,2</u> 5,2±0,1	<u>4,6±0,1</u> 1,7±0,1
Co	<u>0,08±0,01</u> 0,08±0,01	<u>0,10±0,01</u> 0,09±0,01	<u>0,20±0,01</u> 0,20±0,01	<u>0,31±0,02</u> 0,31±0,02	<u>0,08±0,01</u> 0,06±0,01	<u>0,17±0,01</u> 0,09±0,01	<u>0,12±0,01</u> 0,14±0,01	<u>0,10±0,01</u> 0,10±0,01
Cr	<u>0,17±0,01</u> 0,10±0,01	<u>0,89±0,05</u> 0,57±0,12	<u>0,51±0,04</u> 0,32±0,11	<u>2,5±0,1</u> 1,3±0,1	<u>0,45±0,07</u> 0,47±0,04	<u>2,6±0,1</u> 2,1±0,2	<u>0,43±0,02</u> 0,34±0,05	<u>1,2±0,1</u> 1,0±0,1

Примечание: над чертой – не отмытые листья, под чертой – отмытые листья.
Note: above the line – unwashed leaves, under the line – washed leaves.

Таблица 3 / Table 3

Значения фактора биоконцентрации (ФБК) тяжёлых металлов в листьях берёзы г. Тюмени
Heavy metal bioconcentration factor (BCF) in birch leaves (Tyumen)

Металл Metal	Конт- роль Control	Авто- вокзал Bus station	Моторный завод Engine- building plant	НПЗ Oil refinery	Аккумуля- торный завод Battery- manufacturing plant	УГМК Metallur- gical plant	Аэропорт Airport	Железно- дорожный вокзал Railway station
Cu	0,59	0,37	0,64	0,56	0,22	0,50	0,21	0,11
Zn	5,85	3,9	7,18	5,13	2,37	2,07	2,50	0,63
Fe	0,02	0,02	0,03	0,10	0,02	0,11	0,01	0,03
Mn	0,53	0,15	0,61	1,70	0,19	0,37	0,45	0,31
Pb	0,02	0,04	0,16	0,07	0,05	0,36	0,01	0,01
Cd	16	0,58	18	4,23	0,27	1,27	1,14	0,02
Ni	0,23	0,28	0,35	0,13	0,11	0,17	0,17	0,01
Co	0,01	0,01	0,04	0,07	0,01	0,02	0,02	0,01
Cr	0,01	0,03	0,05	0,09	0,02	0,16	0,02	0,01

Примечание: ФБК – отношение содержания ТМ в отмытых листьях к кислоторастворимой форме в почве.
Note: BCF – the ratio of heavy metal content in washed leaves to acid-soluble fraction in soil.

выражен в районе с «высоким загрязнением» – железнодорожный вокзал. Полученный результат объясняется защитными механизмами растений и исключением их поступления в условиях загрязнения окружающей среды. В целом, ряд подвижности ТМ в почвах и ряд значения ФБК согласованы: низкая биодоступность Cr, Fe и Co коррелирует с их низкой подвижностью в почве, а высокая подвижность Cd и Mn в почве обеспечивает их биодоступность. Вероятно, это указывает на преимущественно пассивный транспорт ионов металлов по градиенту электрохимического потенциала в почвенном растворе. Полученный ряд значений ФБК в целом соответствует ранее описанному ряду для травянистых растений, что указывает на схожесть механизмов транслокации металлов.

Корреляционный анализ выявил положительную взаимосвязь между содержанием подвижной и кислоторастворимой форм Pb в почве с содержанием Pb в листьях берёзы ($R=0,50-0,59$), 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 содержанием в растениях ($R=-0,59, -0,66, -0,54$ соответственно). Вероятно, это связано с действием защитных систем растений. Выявлены положительные корреляции между содержанием разных металлов в почве, как для кислоторастворимой формы, так и подвижной ($R=0,59-0,96$), например, корреляция между 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 пре-

обладали и между содержанием металлов в растениях, например, между Zn и Co ($R=0,75$), Cr и Fe ($R=0,98$), Pb и Cu ($R=0,59$), Mn и Cd ($R=0,61$). Полученные корреляции указывают на комплексное антропогенное поступление ТМ в окружающую среду.

Корреляционный анализ выявил отрицательные корреляции между содержанием Zn в почве и Ni в растении ($R=-0,56$), а также между Zn в растении и Ni в почве ($R=-0,66$). Аналогичные пары корреляции получены между Ni и Cd ($R=-0,52 - -0,63$), Cr и Mn ($R=-0,50 - -0,66$). Это может свидетельствовать об избирательном поглощении металлов растениями и об антагонизме металлов: присутствие одного металла в почве приводит к подавлению транслокации другого в листья.

Заключение

Накопление тяжёлых металлов почвами г. Тюмени относительно контроля достигало 20 раз, и в целом убывало в ряду: **Cd>Pb>Cr>Ni>Zn>Cu>Fe>Co>Mn**, отмечены превышения ПДК для Pb и Ni. Листья берёзы повислой в городской среде накапливали металлы до 95 раз относительно контроля, с наибольшим накоплением Pb и Cr: **Pb>Cr>Fe>Co>Cu>Ni>Zn>Mn>Cd**. Биодоступность металлов убывала в ряду **Zn>Cd>Mn>Cu>Ni>Pb>Cr>Fe>Co**, что в целом коррелирует с изменением подвижности тяжёлых металлов в почве в ряду **Cd>Pb>Mn>Zn>Ni>Co>Cu>Cr>Fe**. Выявлены защитные механизмы растений, что проявлялось в снижении биодоступности металлов

в условиях их накопления в почве, а также антагонизм металлов при транслокации в парах Ni и Zn, Ni и Cd, Cr и Mn. Поступление металлов в листья берёзы осуществлялось преимущественно переносом загрязнения из почвы, вклад аэротехногенной миграции металлов в основном составлял 20–30% (в отдельных случаях до 50–60%), по склонности к воздушному переносу металлы располагались в ряд: Cr>Ni>Cd≈Mn>Fe>Zn≈Pb≈Co>Cu. Осаждение металлов на поверхности листьев обратно коррелировало с летучестью их оксидов и хлоридов.

References

1. Titov A.F., Kaznina N.M., Talanova V.V. Heavy metals and plants. Petrozavodsk: Karelskiy nauchnyy tsentr RAN, 2014. 194 p. (in Russian).
2. Rai P.K., Lee S.S., Zhang M., Tsang Y.F., Kim K. Heavy metals in food crops: health risks, fate, mechanisms and management // *Environ. Int.* 2019. V. 125. P. 365–385. doi: 10.1016/j.envint.2019.01.067
3. Kabata-Pendias A., Pendias H. Trace elements in soils and plants. Moskva: Mir, 1989. 440 p. (in Russian)
4. Skugoreva S.G., Ashihmina T.Ya., Fokina A.I., Lyalina E.I. Chemical grounds of toxic effect of heavy metals (review) // *Theoretical and Applied Ecology*. 2016. No. 1. P. 4–13 (in Russian). doi: 0.25750/1995-4301-2016-1-014-019
5. Shahid M., Dumat C., Khalid S., Schreck E., Xiong T., Niazi N.K. Foliar heavy metal uptake, toxicity and detoxification in plants: a comparison of foliar and root metal uptake // *J. Hazard. Mater.* 2017. V. 325. P. 36–58. doi: 10.1016/j.jhazmat.2016.11.063
6. Berseneva A.G. The content of the heavy metals in soils on territory of the industrial enterprises in Tyumen // *Bulletin of KrasGAU*. 2015. No. 6. P. 41–44 (in Russian).
7. Shigabaeva G.N. Heavy metals in soils of several districts of Tyumen // *Tyumen State University Herald. Natural Resource Use and Ecology*. 2015. No. 2. P. 92–102 (in Russian).
8. Konstantinova E., Minkina T., Sushkova S., Konstantinov A., Rajput V.D., Sherstnev A. Urban soil geochemistry of an intensively developing Siberian city: a case study of Tyumen, Russia // *J. Environ. Manage.* 2019. V. 239. P. 366–378. doi: 10.1016/j.jenvman.2019.03.095
9. Seleznev A., Rudakov M. Some geochemical characteristics of puddle sediments from cities located in various geological, geographic, climatic and industrial zones // *Carpath. J. Earth Environ. Sci.* 2019. V. 14. No. 1. P. 95–106. doi: 10.26471/cjees/2019/014/062
10. Meysurova A.F. Heavy metal technogenic pollution of soils in the city of Tver (Russia) // *Vestnik of Tver State University. Series: Biology and Ecology*. 2017. No. 2. P. 324–342 (in Russian).
11. Świercz A., Zającka E. Accumulation of heavy metals in the urban soils of the city Skarżysko-Kamienna (Poland) with regard to land use // *Carpath. J. Earth Environ. Sci.* 2018. V. 13. No. 1. P. 249–266. doi: 10.26471/cjees/2018/013/022
12. Pobilat A.E., Voloshin E.I. The content of nickel in agrocenosis of Krasnoyarsk region // *Trace Elements in Medicine*. 2019. V. 20. No. 1. P. 52–58 (in Russian). doi: 10.19112/2413-6174-2019-20-1-52-58
13. Kodirov O., Shukurov N. Heavy metal distribution in soils near the Almalyk mining and smelting industrial area, Uzbekistan // *Acta Geol. Sin.* 2009. V. 83. No. 5. P. 985–990. doi: 10.1111/j.1755-6724.2009.00127.x
14. Semenova I.N., Biktimerova G.Ya., Ilbulova G.R., Isanbaeva G.T. Contents of heavy metals in soil around quarries Chelyabinsk region // *Modern problems of science and education*. 2015. No. 2-1. P. 561–566.
15. Kuramshina N., Rebezov M., Kuramshin E., Krasnogorskay N., Tretyak L., Somova Y., Dolmatova I., Zaitseva T., Grigoryeva I., Bakirova L. Heavy metals contamination of soil in urban areas of Southern Ural Region of Russia // *International Journal of Engineering & Technology*. 2018. V. 7. No. 4.42. P. 14–18. doi: 10.14419/ijet.v7i4.42.25536
16. Li X., Huang C. Environment impact of heavy metals on urban soils in the vicinity of industrial area of Baoji city, P.R. China // *Environ. Geol.* 2007. V. 52. P. 1631–1637. doi: 10.1007/s00254-006-0608-3
17. Wang Z., Qin H., Wang J. Accumulation of uranium and heavy metals in the soil-plant system in Xiazhuang uranium ore field, Guangdong Province, China // *Environ. Geochem. Health*. 2019. V. 41. No. 6. P. 2413–2423. doi: 10.1007/s10653-019-00286-7
18. Petrov V.G., Shumilova E.A., Haraldina E.A., Esenkulova S.V. Comparison of mobility for chromium substances in soil // *Bulletin of Udmurt University. Series Physics and Chemistry*. 2012. No. 2. P. 69–73 (in Russian).
19. Sukiasyan A.R., Jhangiryan T.A., Hunanyan S.A., Kirakosyan A.A. Translocation of heavy metals unto plants from the soil near the Alaverdi copper smelting enterprise // *Theoretical and Applied Ecology*. 2023. No. 3. P. 120–128 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2023-3-120-128
20. Kříbek B., Miková J., Knésl I., Mihaljevič M., Sýkorová I. Uptake of trace elements and isotope fractionation of Cu and Zn by birch (*Betula pendula*) growing on mineralized coal waste pile // *Appl. Geochem.* 2020. V. 122. Article No. 104741. doi: 10.1016/j.apgeochem.2020.104741
21. Podluzhnaya A.S., Badmaeva S.E. Accumulation of heavy metals in arboreal plants of squares and parks on the right bank of Krasnoyarsk // *Bulletin of KrasGAU*. 2016. No. 8. P. 91–96 (in Russian).
22. Maslennikov P.V., Dedkov V.P., Kurkina M.V., Vashcheykin A.S., Zhuravlev I.O., Bavtruk N.V. Metal accumulation in plants of urban ecosystems // *Vestnik*

Baltiyskogo federalnogo universiteta imeny Kanta. 2015. No. 7. P. 57–69 (in Russian).

23. Petukhov A.S., Kremleva T.A., Khritokhin N.A., Petukhova G.A. Assessment of the contribution of aerotechnogenic heavy metal migration to urban environments // Ecology and Industry of Russia 2023. V. 27. No. 6. P. 62–66 (in Russian). doi: 10.18412/1816-0395-2023-6-62-66

24. 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 J. Atmos. Environ. 2016. V. 10. No. 3. P. 137–145. doi: 10.5572/ajae.2016.10.3.137

25. Gratani L., Crescente M.F., Petrucci M. Relationship between leaf life-span and photosynthetic activity of

Quercus ilex in polluted urban areas (Rome) // Environ. Pollut. 2000. V. 110. No. 1. P. 19–28. doi: 10.1016/S0269-7491(99)00285-7

26. 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 // Ecol. Indic. 2015. No. 48. P. 244–251. doi: 10.1016/j.ecolind.2014.08.013

27. Popova E. Accumulation of heavy metals in soil and plants adjacent to municipal solid waste disposal facility // J. Phys.: Conf. Ser. 2019. V. 1145. Article No. 012021. doi: 10.1088/1742-6596/1145/1/012021