

УДК 630*181.2:630*425

DOI: 10.31040/2222-8349-2026-0-1-62-69

**БИОАККУМУЛЯЦИЯ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ БЕРЕЗЫ ПОВИСЛОЙ
(*BETULA PENDULA* ROTH.): ОЦЕНКА СОДЕРЖАНИЯ В ПОЧВЕ, КОРНЯХ
И АССИМИЛИРУЮЩИХ ОРГАНАХ ПРИ ТЕХНОГЕННОМ ЗАГРЯЗНЕНИИ**

© Р.Х. Гиниятуллин

Представлены результаты исследования относительного жизненного состояния насаждений березы повислой (*Betula pendula* Roth.) в условиях полиметаллического загрязнения в районе Стерлитамакского промышленного центра (СПЦ). Несмотря на загрязнение атмосферы в санитарно-защитной зоне СПЦ, произрастающие березы относятся к категории «здоровых». Изучалось накопление тяжелых металлов (Cr, Co, Cu, Ni, Mn, Cd, Pb) в отмытых и неотмытых листьях, что позволило определить специфику их аккумуляции. Анализ показал, что такие элементы, как Co, Cu, Ni, Mn и Pb в основном поглощаются и накапливаются внутри тканей листа. Исключением является хром, концентрация которого в неотмытых листьях в 27.6 раза выше, чем в отмытых. Это означает, что 96.38% хрома задерживается кутикулой и впоследствии удаляется атмосферными осадками. Cd, по сравнению с другими металлами, также сравнительно легко удаляется с поверхности листа. Тяжелые металлы, аккумулирующиеся в листьях древесных растений, возвращаются в почву с опадом. В верхнем почвенном горизонте (0–20 см) на загрязненных территориях зафиксировано превышение ПДК для подвижных форм металлов: кадмия – в 10.7 раза, никеля – в 1.9, марганца – в 1.4, свинца – в 1.3 раза. Установлено, что корни березы в промышленной зоне поглощают значительные количества металлов из почвы (Mn – 389 мг/кг, Ni – 85, Cu – 19, Cd – 2.1, Pb – 25 мг/кг). Согласно коэффициенту биологического поглощения, марганец, медь, никель, кадмий и свинец относятся к элементам «среднего захвата». Таким образом, береза повислая, произрастающая в санитарно-защитных зонах промышленных объектов, успешно выполняет фиторемедиационную функцию, снижая уровень полиметаллического загрязнения. Способность этого вида аккумулировать техногенные металлы делает его ценным компонентом озеленения территорий в условиях антропогенной нагрузки.

Ключевые слова: береза, листья, корни, тяжелые металлы, Стерлитамакский промышленный центр.

Введение. Проблема загрязнения окружающей среды тяжелыми металлами связана с многочисленными природными и антропогенными источниками. Однако основной вклад вносят именно промышленные предприятия. Наибольшую опасность представляют производства, не укомплектованные достаточно эффективными системами очистки, что приводит к неконтролируемым выбросам токсичных веществ в атмосферу [1]. Помимо тяжелых металлов и газообразных загрязнителей, промышленные предприятия выбрасывают в атмосферу большое количество пыли. В состав пыли техногенного происхождения входят металлы [2]. Чаще всего в составе выбросов пыли обнаруживаются оксиды металлов: цинка, меди, никеля, свинца, кадмия, хрома. Осевшие пылевидные частицы обычно удерживаются прочно и полностью, не смываются даже продолжительным

дождем. Налет карбонатной пыли способствует повышению температуры листа, снижению интенсивности фотосинтеза, нарушению транспирации [2]. В условиях полиметаллического загрязнения Стерлитамакского промышленного центра (СПЦ) насаждения березы повислой вблизи промышленных предприятий выполняют функции эффективного фитофильтра и оказывают значительное положительное влияние на экологическую обстановку. Самым большим накопителем пыли оказалась береза повислая *Betula pendula* Roth. с наибольшей пылефильтрующей способностью (до 70% всей выпавшей пыли) [3]. В рамках данного исследования рассмотрены результаты локального мониторинга содержания тяжелых металлов в городских древесных растениях в зоне наибольшей концентрации токсикантов и оценки жизненного состояния древостоя березовых насаждений

санитарно-защитной зоны с учетом специфики ее расположения.

Материал и методы исследований. Настоящее исследование выполнено в зоне санитарно-защитных насаждений СПЦ, расположенного в Стерлитамаке – городе с высокой техногенной нагрузкой из-за развитой химической и нефтеперерабатывающей промышленности. Следует отметить, что в последние годы проводимые природоохранные мероприятия приводят к постепенному снижению объема валовых выбросов загрязнителей [4]. Преобладают ветры южного, юго-западного и северного направлений. Почвообразующими породами служат делювиальные и аллювиально-делювиальные отложения. В почвенном покрове преобладают типичные и выщелоченные черноземы [5]. За основу полевых исследований были взяты ранее изученные постоянные пробные площади (ППП) в условиях полиметаллического загрязнения СПЦ расположенные в 2–3 км от источников нефтехимического и химического загрязнения в промышленной зоне. В качестве объекта исследования была выбрана береза повислая (*Betula pendula* Roth.) в возрасте 55 лет.

Средний возраст определяли по древесным кернам, отобраным возрастным буром Naglöf, с последующей обработкой в соответствии с методикой Столярова и др. (1988) [6]. На пробной площади керны отбирали у каждого пятого дерева при проведении перечета и описания. Оценка относительного жизненного состояния насаждений выполнена на основе учета состояния отдельных деревьев по методике В.А. Алексеева с изменениями для лиственных древесных растений [7]. Значительное воздействие на растения может оказывать и поступление металлов через листья. Содержание металлов определяли в образцах листьев березы повислой с предварительно отмытой и неотмытой поверхностью для оценки пылевого загрязнения. Это позволило рассчитать долю металлов, поступающих на поверхность наземной части древесных растений, а также смывов с его поверхности листа, сравнив содержание Cr, Co, Ni, Cu, Zn, Cd и Pb в неотмытых и отмытых фотосинтезирующих частях растений. На постоянных пробных площадях отбирались образцы листьев из средней части кроны у 10 деревьев березы повислой в условиях полиметаллического загрязнения СПЦ в непосредственной близости от источников нефтехимического и химиче-

ского загрязнений. Общее количество проб составило 10 для каждого дерева. Листья собирали в конце августа. Полученные результаты анализа отмытых листьев березы повислой показывают содержание металлов, прочно фиксируемых в листовой ткани в условиях промышленного загрязнения. Результаты анализа неотмытых листьев используются исследователями для фитоиндикации загрязнения городских насаждений по сравнению с их природными аналогами [10]. Листья перед высушиванием делились на две части, одна из которых отмывалась дистиллированной водой, а вторая оставлялась неотмытой. На тех же постоянных пробных площадках параллельно с отбором листьев были взяты образцы корней и почвы. Почвенные пробы отбирали послойно, на глубину от 0 до 50 см, с интервалом в 10 см (0–10, 10–20, 20–30, 30–40, 40–50 см), в соответствии с требованиями ГОСТ 17.4.4.02-2017 [8]. Для химического анализа из каждого 10-сантиметрового слоя на пробной площадке составляли объединенную пробу, взятую из трех точек.

Образцы высушивали, перетирали в фарфоровой ступке и просеивали через сито (1 мм) Растительные, почвенные образцы отбирали и подготавливали для химического анализа в соответствии с требованиями [9]. Большое число проб в каждой пробной площади позволяет объективно оценить содержания тяжелых металлов в листьях и почвах под насаждениями деревьев. Всего проанализировано: 100 проб листьев, 15 проб почвы. Содержание металлов в растительных и почвенных образцах определялось методом атомно-абсорбционного анализа на спектрометре ZEEnit-650 (Analytik Jena AD, Germany). Статистическая обработка данных выполнялась с помощью пакета программы Microsoft Office Excel версии 2016. Данные представлены в виде средней арифметической \pm стандартное отклонение ($M \pm S$).

Результаты и их обсуждение. Береза повислая (*Betula pendula* Roth.) благодаря своим биолого-экологическим особенностям широко используется в создании защитных лесонасаждений на территории СПЦ. Санитарное состояние березовых древостоев в промышленном центре определяется комплексом природных и антропогенных факторов. Расчет индексов состояния древостоев березы по числу деревьев:

$$Ln = 81.75\%.$$

Анализ проведенных исследований по изучению относительного жизненного состояния березы повислой свидетельствует, что в условиях полиметаллического загрязнения СПЦ древостой березы характеризуется как «здоровые» ($L_n = 81.75\%$) [10]. Важно подчеркнуть, что значительная часть деревьев в насаждении относится к категории «здоровые», при этом со временем доля таких деревьев в условиях СПЦ будет уменьшаться. При осеннем визуальном обследовании березовых насаждений было обнаружено значительное количество пылевого налета на поверхности листьев. В данном исследовании изучалась возможность удаления с листьев березы повислой (*Betula pendula*) осаждаемых из атмосферы тяжелых металлов: Cr, Co, Ni, Cu, Zn, Cd и Pb. Мы сравнили содержание этих металлов в отмытых и неотмытых листьях в условиях полиметаллического загрязнения, характерного для селитебно-промышленного комплекса СПЦ. Как отмечает О.В. Новикова (2005), анализ отмытых листьев дает возможность оценить содержание тяжелых металлов, прочно закрепленных в тканях. Оно позволяет наиболее полно и достоверно охарактеризовать накопление тяжелых металлов в растении при разной антропогенной нагрузке, оценить влияние на жизнеспособность организма, а также выявить сезонную и видовую специфику поглощения [11]. Наше исследование подтвердило, что содержание металлов в неотмытых листьях березы повислой превышает их содержание в отмытых. Сравнительный анализ данных демонстрирует существенную разницу между этими двумя типами проб. В условиях полиметаллического загрязнения СПЦ эффективность вымывания Cr, Co, Ni, Cu, Zn, Cd и Pb, содержащихся в аэрозолях и пыли, осевших на листовой поверхности, оказалась неодинаковой. В табл. 1 представлены данные по содержанию Cr, Co, Ni, Cu, Zn, Cd и Pb в отмытых и неотмытых листьях березы повислой в условиях СПЦ. Исследование показало, что наиболее значительные различия в концентрациях наблюдаются для хрома, никеля, марганца и кадмия. Хром относится к числу химических элементов, жизненно необходимых для растений. Его нормальное содержание в растительных тканях варьирует от 0.1 до 0.5 мг/кг сухого вещества, в то время как избыточной считается концентрация в пределах 5.0–30 мг/кг [12]. Максимальная концентрация хрома (Cr) была выявлена в неотмытых листьях березы повислой и составила

55.25±2.75 мг/кг сухого вещества. Значительная часть хрома, осаждающегося на листьях, может быть удалена дождевой водой. Согласно табличным данным, видно, что в ткани листа проникает не более 3.62% этого элемента, что подтверждается его низкой концентрацией в отмытых листьях (менее 2.0±0.2 мг/кг сухого вещества). Таким образом, по сравнению с другими металлами, хром относительно легко вымывается атмосферными осадками с поверхности листа. Иная картина наблюдается в случае кобальта (Co). Его концентрация в отмытых листьях снижается лишь в 1.5 раза по сравнению с неотмытыми, что свидетельствует о более активном его поглощении растением.

Наибольшее накопление отмечено для никеля (Ni) в неотмытых листьях березы повислой. Его содержание в неотмытых листьях березы повислой достигает 176±5.5 мг/кг сухого вещества. Для сравнения, нормальным содержанием никеля в растениях считается диапазон 0.1–5 мг/кг, избыточным – от 10–100 мг/кг сухого вещества [12]. Таким образом, в исследуемых листьях, как отмытых, так и неотмытых, концентрация Ni существенно превышает не только норму, но и уровень, считающийся фитотоксичным. Сравнительный анализ показывает, что в неотмытых листьях содержится в 1.5 раза больше никеля, не в отмытых. За счет пыли содержание Ni в неотмытых листьях березы повышается до 34.3%. Одной из причин снижения фотосинтетической активности под воздействием никеля может быть повреждение формирования фотосинтетического аппарата [13]. Что касается меди (Cu), то ее концентрация в неотмытых листьях березы была сравнительно невысокой (22.81±2.99 мг/кг сухого вещества). Достоверного увеличения содержания меди в листовых пластинках не наблюдается, что указывает на незначительное поступление этого металла в наземную часть растения. Полученные значения находятся в пределах нормы, которая для большинства трав составляет от 5.0 до 30 мг/кг. Критической концентрацией Cu для растений считается 150 мг/кг сухого вещества [14]. Результаты определения меди, представленные в табл. 1, показывают, что из всего количества меди, попадающего на листовую пластинку, большая часть (81.4%) проникает внутрь тканей, а 18.6% удаляется атмосферными осадками. При этом в условиях полиметаллического загрязнения СПЦ ни в отмытых, ни в неотмытых листьях березы не зафиксировано превышения ПДК по меди.

Среднее содержание тяжелых металлов мг/кг в отмытых и неотмытых листьях березы повислой в условиях полиметаллического загрязнения Стерлитамакского промышленного центра

Элемент	Содержание тяжелых металлов, мг/кг							
	Cr	Co	Ni	Cu	Zn	Mn	Cd	Pb
Отмытые листья	менее 2.0 ± 0.2	1.57± 0.12	116±4	18.56± 2.04	менее 0.25±0.03	1231± 5.1	1.28± 0.11	4.02± 0.38
Неотмытые листья	55.25±2.75	2.58± 0.08	176.5± 5.5	22.81± 2.99	менее 0.25±0.03	1501± 82	5.11± 1.91	8.84± 0.12

Анализ содержания цинка (Zn) в листьях березы повислой показал, что его концентрация оставалась неизменной в неотмытых образцах и составляла менее 0.25±0.03 мг/кг сухого вещества. В целом содержание цинка в листьях березы было низким. Отметим, что цинк играет важную роль в азотном обмене растений. Как мы уже отмечали, наибольшая часть Cu проникает во внутрь листа. Схожая картина наблюдалась и для марганца (Mn). В условиях загрязнения его максимальная концентрация была установлена в неотмытых листьях (1501±82 мг/кг сухого вещества). Марганец, осаждающийся на поверхности листа, более чем на 82% проникает внутрь тканей, и лишь 17.9% его может быть удалено дождевой водой. Марганец критически важен для растений, так как участвует в биосинтезе хлорофилла, повышает интенсивность фотосинтеза, а его дефицит приводит к быстрому разрушению хлорофилла на свету [15]. Кадмий (Cd) поглощается как корневой системой, так и непосредственно листьями. Наиболее общим показателем токсичности кадмия является хлороз листьев: снижается содержание хлорофилла, появляется пурпурная окраска; также наблюдается скручивание листьев и задержка роста [16]. Помимо этого, избыток кадмия подавляет фотосинтез, биосинтез пигментов и негативно влияет на газообмен [17]. В нашем исследовании основное накопление кадмия было обнаружено в неотмытых листьях березы (5.11±1.91 мг/кг сухого вещества), в то время как в отмытых листьях его содержание было в несколько раз ниже (1.0–1.28 мг/кг). Повышение содержания кадмия на поверхности листьев, вероятно, связано с антропогенным загрязнением. Содержание кадмия в отмытых листьях снижается на 74% по сравнению с неотмытыми. Это позволяет предположить, что незначительная часть Cd, оседающая на листовой пластинке, задерживается кутикулой, и внутрь тканей проникает не более 25% элемента. В результате

большая часть может быть удалена с поверхности листьев дождевой водой. Свинец (Pb) является токсичным элементом для растений, и его негативное воздействие в первую очередь связано с нарушением фундаментальных биологических процессов, таких как фотосинтез, рост и митоз. Нормальное содержание Pb в растениях варьирует от 5.0 до 10.0 мг/кг сухого вещества [12]. В неотмытых листьях березы повислой была обнаружена концентрация Pb, равная 8.84 ± 0.12 мг/кг сухого вещества. Количество свинца в неотмытых листьях на 54% превышает его содержание в отмытых. По данным Лепнева и Обухова (1987), в условиях сильного загрязнения через листья в растения может поступать до 50% свинца, содержащегося в воздухе [18]. В нашем случае в условиях полиметаллического загрязнения СПЦ, свинец, оседающий на листовой пластинке, в значительной степени удаляется атмосферными осадками (54.5%), частично задерживается кутикулой и внутрь листа проникает не более 45.5%. При этом в обоих типах проб (отмытых и неотмытых) уровень содержания Pb у березы повислой остается в пределах нормы, и превышения ПДК не наблюдается. По степени возрастания концентраций и способности проникать внутрь растения в отмытых листьях березы повислой в условиях полиметаллического загрязнения элементы можно расположить в следующей последовательности (мг/кг сухой биомассы): Mn > Cu > Ni > Co > Pb > Cd > Cr > Zn.

Загрязнение древесных растений металлами происходит не только из атмосферы, но и из почвы. Тяжелые металлы накапливаются в листьях древесных растений, а затем возвращаются в почву вместе с опавшими листьями. Избыточное поступление в почву определенных элементов, таких как тяжелые металлы (ТМ), может приводить к уменьшению содержания органического вещества [19]. Вблизи промышленных предприятий, длительное время выбра-

сывающих пылевидные частицы металлов, формируются зоны с повышенным содержанием этих элементов в почве. В условиях полиметаллического загрязнения в промышленном центре (СПЦ) было изучено содержание валовых и подвижных форм Mn, Cd, Pb и Ni в почвах. Установлено, что металлы преимущественно накапливаются в верхнем слое почвы (0–10 (20) см) (табл. 2). Данные по образцам почвы с глубины 20–50 см в таблицах не приведены, поскольку содержание тяжелых металлов в них не превышало предельно допустимой концентрации (ПДК).

Валовое содержание тяжелых металлов является одним из ключевых санитарно-гигиенических показателей, отражающих общий уровень загрязнения почвы. Проведенные исследования показали, что в условиях полиметаллического загрязнения почвенно-растительного комплекса концентрации валовых форм ТМ являются относительно невысокими, что осложняет оценку их токсического воздействия на древесные растения. Превышение ПДК было зафиксировано для марганца (Mn), никеля (Ni), меди (Cu) и кадмия (Cd). Наибольшее превышение норматива отмечено для кадмия – в 1.5 раза, тогда как для никеля и марганца оно составило

1.2 и 1.12 раза соответственно. В верхнем почвенном горизонте (0–20 см) на загрязненных территориях ПДК концентрация подвижных форм металлов была превышена для никеля (в 1.9 раза), марганца (в 1.4 раза) и свинца (в 1.3 раза). При этом концентрация подвижного кадмия превысила норму в 10.7 раза. Поглощение металлов корневой системой приводит к их накоплению в надземных органах растений. В табл. 3 представлены данные о накоплении металлов в корнях березы повислой в условиях полиметаллического загрязнения СПЦ.

Для оценки миграции элементов в системе «почва–растение» был рассчитан коэффициент биологического поглощения (КБП) по формуле:

$$КБП = P/\Pi,$$

где P – содержание химического элемента в золе растения, Π – содержание химического элемента в почве, на которой произрастает данное растение. Для березы в условиях загрязнения СПЦ ряд КБП выстроился следующим образом: Pb (0.92) > Ni (0.81) > Cu (0.81) > Cd (0.67) > Mn (0.23). Согласно классификации А.И. Перельмана [21], такие значения коэффициентов свидетельствуют о том, что свинец, никель, медь, кадмий и марганец относятся к группе элементов среднего захвата (КБП = 0.1–1).

Т а б л и ц а 2

Содержание валовых и подвижных форм тяжелых металлов (мг/кг) в почвенном покрове под насаждениями березы повислой (Betula pendula Roth.) в условиях полиметаллического загрязнения Стерлитамакского промышленного центра и в зоне условного контроля [20]

Глубина 0–20 см	Стерлитамакский промышленный центр					Предельно-допустимые концентрации (ПДК) в почве				
	Мn	Ni	Cu	Cd	Pb	Mn	Ni	Cu	Cd	Pb
ВФ	1680±11	104.2±8.9	23.2±1.4	3.1±0.15	27.7±4.4	1500	85	23	2	32
ПФ	84±6.5	7.1±0.5	3.8±0.4	2.59±0.7	7.8±0.6	60	4.0	2	0.24	6.0

Примечание. Жирным шрифтом выделены значения, превышающие ПДК.

Т а б л и ц а 3

Среднее содержание тяжелых металлов в корнях березы повислой (Betula pendula Roth.) в условиях полиметаллического загрязнения Стерлитамакского промышленного центра

Вид, место произрастания анализируемых растений	Исследованная ткань	Содержание тяжелых металлов воздушно-сухой массы					
		Mn	Co	Ni	Cu	Cd	Pb
СПЦ	корни	389±12	сл.	85±3.9	19±2	2.1±0.10	25±1.76

Примечание. сл. – следы тяжелых металлов, обнаруженных растительных тканях.

На основании полученных результатов была дана оценка роли насаждений березы повислой как компонента биологического фильтра в условиях загрязнения СПЦ. Расчеты показали, что одно среднее дерево березы повислой (в возрасте 55 лет, диаметром 26 см, высотой 18.7 м) формирует 11 кг свежей фитомассы листьев, или 3.8 кг в пересчете на сухую массу. За вегетационный сезон это дерево аккумулирует в отмытых листьях значительные количества металлов: Mn – 4676 мг/кг, Ni – 440, Cu – 70, Pb – 15.27, Cr – 7.59, Co – 5.96, Cd – 4.86, Zn – 0.94 мг/кг.

Заключение. Насаждения березы в санитарно-защитной зоне СПЦ характеризуются как «здоровые», что свидетельствует об их относительной устойчивости к техногенной нагрузке. В зоне максимального загрязнения береза повислая демонстрирует интенсивную аккумуляцию тяжелых металлов техногенного происхождения, таких как Cr, Co, Cu, Ni, Mn, Cd и Pb. Выявлены значительные различия в способности элементов к вымыванию атмосферными осадками с поверхности листьев: Co, Cu, Ni, Mn и Pb преимущественно накапливаются внутри листовых тканей, о чем свидетельствует их низкая доля в смываемой фракции. Исключение составляет Cr, концентрация которого в неотмытых листьях березы в 27.6 раза больше, чем в отмытых листьях. В условиях полиметаллического загрязнения СПЦ Cr, попадающий на листовую пластинку, может удаляться атмосферными осадками с поверхности листа на 96.38%, задерживается кутикулой и внутрь проникает всего 3.62%. Cd, в отличие от других металлов, также сравнительно легко удаляется с поверхности листьев осадками. Тяжелые металлы накапливаются в листьях древесных растений, а затем возвращаются в почву вместе с опавшими листьями. В верхнем почвенном горизонте (0–20 см) на загрязненных территориях зафиксировано превышение ПДК для подвижных форм металлов: кадмия – в 10.7 раза, никеля – в 1.9, марганца – в 1.4, свинца – в 1.3 раза. Установлено, что в условиях загрязнения корневая система березы способна поглощать значительные количества металлов из почвы. Содержание элементов в корнях составляет: Mn – 389 мг/кг, Ni – 85, Cu – 19, Cd – 2.1, Pb – 25 мг/кг. Согласно показателям КБП, марганец, медь, никель, кадмий и свинец относятся к элементам «среднего захвата». Береза повислая

эффективно выполняет фиторемедиационную функцию в санитарно-защитных зонах. Аккумулируя тяжелые металлы (как через корневую систему, так и из атмосферы), она временно выводит их из круговорота, а последующее опадание листьев приводит к их возвращению в почву, но уже в иной форме и локализации, что способствует снижению общего уровня полиметаллического загрязнения. Наличие как корневого, так и атмосферного пути поступления загрязнителей подтверждается значительной разницей в содержании металлов в отмытых и неотмытых листьях. Таким образом, полученные данные подчеркивает высокую устойчивость и аккумуляционную способность березы повислой в условиях техногенного пресса. Это делает ее ценным компонентом для создания и перспективным объектом для использования в программах биологического мониторинга и фиторемедиации.

Работы выполнены на оборудовании центра коллективного пользования «Агидель» в рамках плановых исследований по бюджетной теме № 123020700152-5 FMRS-2023-0008 «Устойчивость лесообразующих древесных видов и эколого-биологические адаптации с учетом антропогенной трансформации ландшафтно-природных комплексов».

Литература

1. Геоэкологическая оценка современного содержания свинца в почвенном покрове урбанизированных территорий Нижнего Поволжья / Синцов А.В. [и др.] // Геология, география и глобальная энергия. Геоэкология. 2021. №2(81). С. 137–144.
2. Неверова О.А., Колмогорова Е.Ю. Древесные растения и урбанизированная среда // Экологические и биотехнологические аспекты. Новосибирск: Наука, 2003. 222 с.
3. Артамонов В.И. Растения и чистота природной среды. М.: Наука, 1986. 196 с.
4. Государственный доклад «О состоянии природных ресурсов и окружающей среды Республики Башкортостан в 2022 году». Уфа, 2023. 318 с.
5. Атлас Республики Башкортостан / под. ред. И.М. Япарова. Уфа: Китап, 2005. 420 с.
6. Использование кернов в лесоводственных исследованиях: метод. рекомендации / Ленингр. НИИ лесн. хоз-ва; [сост. Д.П. Столяров и др.]. Ленинград: ЛенНИИЛХ, 1988. 43 с.
7. Лесные экосистемы и атмосферное загрязнение / под. ред. В.А. Алексеева. Л.: Наука, 1990. 200 с.

8. ГОСТ 17.4.4.02-2017 Охрана природы (ССОП). Почвы. Методы отбора и подготовки проб для химического, бактериологического, гельминтологического анализа. 7 с.

9. Методика количественного химического анализа. Определение As, Cd, Co, Cr, Cu, Hg, Mn, Pb, Sb, Tl (кислотно-растворимые формы) в почвах и данных отложениях атомно-абсорбционным методом. СПб., 2005. 12 с

10. Гиниятуллин Р.Х. Биогеохимическая активность древесных видов в поглощении марганца, кадмия, свинца, никеля в зоне наибольшей концентрации токсикантов промышленного центра и зоне условного контроля // Известия Уфимского научного центра РАН, № 1. С. 52–59. 2025. DOI: 10.31040/2222-8349-2025-0-1-52-59

11. Новикова О.В. Эколого-геохимическая оценка состояния древесной растительности городских ландшафтов: на примере г. Москвы и Кито: дис. ... канд. геогр. наук: 25.00.36: М., 2005. 164 с. РГБ ОД, 61:05 – 11/143.

12. Кабата-Пендиас А., Пендиас Х. Микроэлементы в почвах и растениях. М.: Мир, 1989. С. 191–201.

13. Устойчивость к тяжелым металлам дикорастущих видов / под. ред. Н.В. Алексеевой–Поповой. Ленинград, 1991. 213 с.

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

15. Чернявская Н.М., Васильева Л.Ю. Роль марганца при выделении кислорода в фотосинтезе // Физиология растительных организмов и роль металлов. М.: МГУ, 1989. С. 56–117.

16. Серегин И.В., Иванов В.Б. Физиологические аспекты токсического действия кадмия и свинца на высшие растения // Физиология растений. 2001. Т. 48. Вып.4. С. 606–630.

17. Keck R.W. Cadmium Alteration of Root Physiology and Potassium Ion Fluxes // Plant Physiol. 1978. V. 62. P. 94–96.

18. Лепнев О.М., Обухов А.И. Состояние свинца в системе почва–растение в зонах влияния автомагистралей // Свинец в окружающей среде. М.: Наука, 1987. С. 149–165.

19. Кашулина Г.М. Экстремальное загрязнение почв выбросами медно-никелевого предприятия на Кольском полуострове // Почвоведение. 2017. № 7. С. 860–873.

20. Гиниятуллин Р.Х., Тагирова О.В., Кулагин А.Ю. Состояние насаждений березы повислой (*Betula pendula* Roth.) и особенности накопления и транслокации металлов в системе «почва–растение» в условиях техногенного загрязнения (Стерлитамакский промышленный центр, Республика Башкортостан) // Природообустройство. 2025. № 1. С. 111–119. DOI: 10.26897/1997-6011-2025-1-111-119.

21. Перельман А.И., Касимов Н.С. Геохимия ландшафта. М.: Астрель-2000, 1999. 610 с.

References

1. Geoeconomic assessment of the current lead content in the soil cover of the urbanized territories of the Lower Volga region / Sintsov A.V. [et al.] // Geology, geography and global energy. Geoeconomics, 2021, no. 2(81), pp. 137–144.

2. Neverova O.A., Kolmogorova E.Yu. Woody plants and the urbanized environment. Ecological and biotechnological aspects. Novosibirsk: Nauka, 2003, 222 p.

3. Artamonov V.I. Plants and the Purity of the Natural Environment. Moscow: Nauka, 1986, 196 p.

4. State Report «On the State of Natural Resources and the Environment of the Republic of Bashkortostan in 2022». Ufa, 2023, 318 p.

5. Atlas of the Republic of Bashkortostan / Edited by I.M. Yaparov. Ufa: Kitap, 2005. 420 p.

6. The use of cores in forestry research: A method. Recommendations / Leningr. Lesn Research Institute. household; [comp. D.P. Stolyarov et al.], Leningrad: LenNIILH, 1988, 43 p.

7. Forest Ecosystems and Atmospheric Pollution / Edited by V.A. Alekseev. Leningrad: Nauka, 1990, 200 p.

8. GOST 17.4.4.02-2017 Nature Protection (SSOP). Soils. Methods of sampling and preparation of samples for chemical, bacteriological, and helminthological analysis (with Amendment) Applied since 01.01.2019 instead of GOST 17.4.4.02-84. 7 p.

9. Methodology for quantitative chemical analysis. Determination of As, Cd, Co, Cr, Cu, Hg, Mn, Pb, Sb, Tl (acid-soluble forms) in soils and sediments by the atomic absorption method. St. Petersburg, 2005, 12 p.

10. Giniyatullin R.Kh. Biogeochemical activity of wood species in the absorption of manganese, cadmium, lead, nickel in the zone of the highest concentration of toxicants of the industrial center and the zone of conditional control // Izvestiya of the Ufa Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, no. 1, pp. 52–59, 2025. DOI: 10.31040/2222-8349-2025-0-1-52-59

11. Novikova, O.V. Ecological and Geochemical Assessment of the State of Woody Vegetation in Urban Landscapes: The Case of Moscow and Quito: PhD Thesis in Geography: 25.00.36: Moscow, 2005. 164 p. RGD OD, 61:05 – 11/143.

12. Kabata-Pendias A., Pendias H. Micronutrients in soils and plants. M.: Mir, 1989, pp. 191–201.

13. Resistance to heavy metals of wild species / Ed. by N.V. Alekseeva–Popova. Leningrad, 1991, 213 p.

14. Prokhorova N.V., Matveyev N.M., Pavlovsky V.A. Accumulation of Heavy Metals by Wild and Cultivated Plants in the Forest-Steppe and Steppe Regions of the Volga Region. Samara: Samara University, 1998, 97 p.

15. Chernyavskaya N.M., Vasilyeva L.Yu. The Role of Manganese in Oxygen Release in Photosynthesis // Physiology of Plant Organisms and the Role of Metals. Moscow: Moscow State University, 1989, pp. 56–117.

16. Seregin I.V., Ivanov V.B. Physiological Aspects of the Toxic Effects of Cadmium and Lead on Higher Plants // Plant Physiology, 2001, vol. 48, no. 4, pp. 606–630.

17. Keck R.W. Cadmium Alteration of Root Physiology and Potassium Ion Fluxes // Plant Physiol., 1978, vol. 62, pp. 94–96.

18. Lepnev O.M., Obukhov A.I. The state of lead in the soil-plant system in areas affected by highways //

Lead in the environment. Moscow: Nauka, 1987, pp. 149–165.

19. Kashulina G.M. Extreme soil contamination by emissions from a copper-nickel enterprise on the Kola Peninsula // Soil Science, 2017, no. 7, pp. 860–873.

20. Giniyatullin R.Kh., Tagirova O.V., Kulagin A.Yu. The state of birch plantations (*Betula pendula* Roth) and features of accumulation and translocation of metals in the soil-plant system under conditions of anthropogenic pollution (Sterlitamak Industrial Center, Republic of Bashkortostan) // Prirodoobustoystvo, 2025, no. 1, pp. 111–119, DOI: 10.26897/1997-6011-2025-1-111-119

21. Perelman A.I., Kasimov N.S. Geochemistry of the Landscape. Moscow: Astreya-2000, 1999, 610 p.



BIOACCUMULATION OF HEAVY METALS IN THE BROWN BIRCH (*BETULA PENDULA* ROTH.): ASSESSMENT OF CONTENT IN SOIL, ROOTS, AND ASSIMILATING ORGANS IN TECHNOGENIC POLLUTION

© **R.Kh. Giniyatullin**

Ufa Institute of Biology – Separate Structural Subdivision of the Federal State Budgetary Scientific Institution Ufa Federal Research Centre of the RAS,
69, prospect Oktyabrya, 450054, Ufa, Russian Federation

The results of the study of the relative vital state of the brown birch (*Betula pendula* Roth.) plantations in conditions of polymetallic pollution in the area of the Sterlitamak industrial center (SIC) are presented. Despite the air pollution in the sanitary protection zone of the SIC the growing birches are classified as "healthy." The accumulation of heavy metals (Cr, Co, Cu, Ni, Mn, Cd, and Pb) in washed and unwashed leaves was studied, allowing for the determination of their specific accumulation patterns. The analysis revealed that elements such as Co, Cu, Ni, Mn, and Pb are primarily absorbed and accumulated within the leaf tissues. The exception is chromium, which is 27.6 times more concentrated in unwashed leaves than in washed leaves. This means that 96.38% of chromium is retained by the cuticle and subsequently removed by precipitation. Cd, in comparison with other metals, is also relatively easy to remove from the surface of the sheet. Heavy metals accumulating in the leaves of woody plants return to the soil as they fall. In the upper soil horizon (0–20 cm) in the polluted territories, an excess of the maximum permissible concentration in terms of gross and mobile forms was recorded: manganese – 3.8 times, cadmium and lead 6.8 times, nickel – 4.3 times. It has been established that birch roots in the industrial zone absorb significant amounts of metals from the soil (Mn – 389 mg/kg, Ni – 85 mg/kg, Cu – 19 mg/kg Cd – 2.1 mg/kg, Pb – 25 mg/kg). According to the coefficient of biological absorption, manganese, copper, nickel, cadmium, and lead are classified as elements of "medium absorption. Thus, the pendulous birch, which grows in the sanitary protection zones of industrial facilities, successfully performs the phytoremediation function, reducing the level of polymetallic pollution. The ability of this species to accumulate technogenic metals makes it a valuable component of landscaping in areas with anthropogenic stress.

Keywords: birch, leaves, roots, heavy metals, Sterlitamak Industrial Center.