



DOI: <https://doi.org/10.23859/estr-241120>

EDN: <https://elibrary.ru/mkmyti>

УДК 504.064.2: 574.2

*Научная статья*

## **Оценка степени повреждения березовых древостоев в очагах аэротехногенного загрязнения выбросами медеплавильного комбината**

С.Л. Менщиков , В.Д. Горбунова\* 

*Ботанический сад УрО РАН, 620144, Россия, г. Екатеринбург, ул. 8 Марта, д. 202а*

*\*botgarden.gor@yandex.ru*

**Аннотация.** Приведены результаты оценки жизненного состояния древостоя и уровня загрязнения на территории воздействия АО «Карабашмедь» с помощью вида-биоиндикатора березы повислой. Были измерены показатели дефолиации, дехромации, индексы повреждения древостоев, а также коэффициенты концентрации тяжелых металлов и суммарный показатель их концентрации в листьях березы. Показано, что наибольший вклад в загрязнение внесли такие элементы, как Cd, Pb, Zn, Ni, Cu. Максимальное суммарное содержание ТМ обнаружено на расстоянии 1.5 км от источника загрязнения, минимальное – на расстоянии 20 км. В древостоях, наиболее поврежденных выбросами комбината, суммарный показатель концентрации ТМ достиг 25.1, что позволило характеризовать уровень загрязнения как средний. Полученные количественные концентрации металлов в листьях березы повислой могут быть использованы для установления пороговых значений в условиях многолетнего влияния выбросов металлургических предприятий.

**Ключевые слова:** тяжелые металлы, береза повислая, жизненное состояние, техногенное загрязнение

**ORCID:**

С.Л. Менщиков, <https://orcid.org/0000-0001-6129-5939>

В.Д. Горбунова, <https://orcid.org/0000-0003-1859-8963>

**Для цитирования:** Менщиков, С.Л., Горбунова, В.Д., 2026. Оценка степени повреждения березовых древостоев в очагах аэротехногенного загрязнения выбросами медеплавильного комбината. *Трансформация экосистем* 9 (2), 181–194. <https://doi.org/10.23859/estr-241120>

Поступила в редакцию: 20.11.2024

Принята к печати: 14.06.2025

Опубликована онлайн: 29.05.2026

DOI: <https://doi.org/10.23859/estr-241120>

EDN: <https://elibrary.ru/mkmyti>

UDC 504.064.2: 574.2

### Article

# Assessing the degree of damage to birch stands in areas of airborne industrial pollution from copper smelter

S.L. Menshchikov , V.D. Gorbunova\* 

*Botanical Garden of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, 8 Marta St. 202a, Ekaterinburg, 620144 Russia*

\*[botgarden.gor@yandex.ru](mailto:botgarden.gor@yandex.ru)

---

**Abstract.** The article presents the results of assessing vital conditions of forests and pollution levels in the area affected by the “Karabashmed” JSC using a silver birch as the bioindication species. Defoliation, discoloration, and damage indices of tree stands were measured, including the concentration coefficients and total content of heavy metals in birch leaves. It was shown that Cd, Pb, Zn, Ni, and Cu made the greatest contribution to pollution. The highest total content of heavy metals was detected in 1.5 km from the pollution source, while the lowest at a distance of 20 km. In most damaged (by emissions) birch stands, the total content of heavy metals reached 25.1; contamination was characterized as moderate. The obtained quantitative metal concentrations in leaves of silver birch can be applied in establishing threshold values under long-term exposure to metallurgical emissions.

**Keywords:** heavy metals, silver birch, vital conditions, anthropogenic pollution

### ORCID:

S.L. Menshchikov, <https://orcid.org/0000-0001-6129-5939>

V.D. Gorbunova, <https://orcid.org/0000-0003-1859-8963>

**To cite this article:** Menshchikov, S.L., Gorbunova, V.D., 2026. Assessing the degree of damage to birch stands in areas of airborne industrial pollution from copper smelter. *Ecosystem Transformation* 9 (2), 181–194. <https://doi.org/10.23859/estr-241120>

Received: 20.11.2024

Accepted: 14.06.2025

Published online: 29.05.2026

## Введение

Развитие промышленности порождает огромное количество отходов, в том числе содержащих токсичные тяжелые металлы (ТМ). Недостаточная очистка выбросов приводит к загрязнению окружающей среды, а затем и к ее деградации.

Техногенное загрязнение вызывает изменение элементного состава структурных частей растений. Типичными последствиями повышенного содержания ТМ являются нарушение регуляции усвоения элементов, необходимых для правильного роста и развития растений, замедление прорастания семян и роста корневой системы, замедление прироста биомассы деревьев и подавление процессов фотосинтеза (Ivanov et al., 2011; Malinowska, 2010).

Низкий pH почвы повышает растворимость и токсичность различных металлов (меди, кадмия, цинка), вызывая дефицит азота и фосфора в растениях вместе со снижением микробной активности (Aguinaga et al., 2021). Это может быть ключевым фактором, обуславливающим фитотоксичность определенных территорий и отсутствие на них растений (Ferreira et al., 2021). Низкое значение pH шахтных стоков рудников приводило к более высокой скорости высвобождения металлов и, следовательно, к их выщелачиванию в окружающую среду (Favas et al., 2016; Sahoo et al., 2020).

Для объяснения устойчивости растений к токсичным металлам предлагаются различные механизмы (Baker, 1981). Некоторые виды древесных растений могут аккумулировать тяжелые металлы из хвостохранилищ (Brković et al., 2021). Береза повислая *Betula pendula* Roth является видом-первопроходцем в постиндустриальных средах обитания, поскольку обладает экспансивной стратегией размножения и низкими требованиями к среде обитания (Sitko et al., 2022). Все эти характеристики делают березу повислую перспективным видом для фиторемедиации. Известно, что этот вид способен к сверхаккумуляции цинка (Dmuchowski et al., 2012). Береза повислая накапливает тяжелые металлы, тем не менее, ее нельзя рассматривать как растение-гиперакумулятор, поскольку концентрация тяжелых металлов недостаточно высока (Naila et al., 2019).

Целью работы является анализ уровня загрязненности в зоне действия медеплавильного комбината (АО «Карабашмедь») методом биоиндикации с оценкой степени повреждения березовых древостоев (*Betula pendula* Roth)

## Материалы и методы

АО «Карабашмедь» (Челябинская область) – одно из старейших металлургических предприятий России, крупный производитель черновой меди из медного концентрата. Выбросы дымовых газов из труб предприятия включают до 82% диоксида серы, а также оксид углерода, диоксид азота, пары формальдегида и фтороводорода, неорганическую пыль и тяжелые металлы, которые в комплексе оказывают сильное токсичное воздействие на лесные биогеоценозы (Агиков, 2011; Калабин и Титова, 2011; Коротева и др., 2011). Кроме того, отвалы пород и шлаков, а также хвостохранилища с пиритом негативно сказываются на окружающей среде и здоровье жителей из-за пылеобразования (Агиков, 2011). За период работы комбината в окружающую среду было сброшено огромное количество производственных отходов, что привело к резкому ухудшению экологической ситуации и состояния элементов лесных насаждений (Бачурина, 2008; Усольцев и др., 2011). Для исследования были выбраны естественные древостои березы повислой *Betula pendula*, находящиеся под влиянием выбросов от АО «Карабашмедь» (КМК) на Южном Урале. В данном районе преобладают северо-западные, юго-западные и западные ветры. Водоемы на территории воздействия КМК загрязнены вследствие сброса отходов в реку Сак-Элга (Калабин и др., 2011).

Согласно розе ветров и рельефу, мы выбрали пять пробных площадей (ПП) с березовым насаждением различной степени загрязнения: С-1.5, СВ-5, СВ-15, СВ-20 и СВ-24 (Рис. 1) (буквенные обозначения указывают на направление, цифры – расстояние от источника загрязнений в километрах). С-1.5 находится в 1.5 км от источника выбросов в северном направлении на равнине, почва – серая горно-лесная. Расположенный здесь старовозрастной березняк семенного происхождения разнотравно-злаковый, высота деревьев около 20 м, средний диаметр стволов 26 см, возраст – 30–50 лет. СВ-5, СВ-15, СВ-20 и СВ-24 расположены соответственно в 5, 15, 20 и 24 км от источника выбросов, заложены в березняках разнотравно-злаковых, полнота древостоя – 0.7–0.8, класс – 7–8. Почва – серая горно-лесная. Высота березового древостоя около 25–32 м, диаметр около 31 см. В качестве фона был выбран участок на расстоянии 20 км от АО «Карабашмедь» (СВ-20), так как березовый древостой здесь характеризуется наилучшим состоянием.

Береза повислая была выбрана для исследования, поскольку данный вид преобладает на всех участках. Модельные деревья были отобраны из первого яруса, около 100 деревьев с каж-

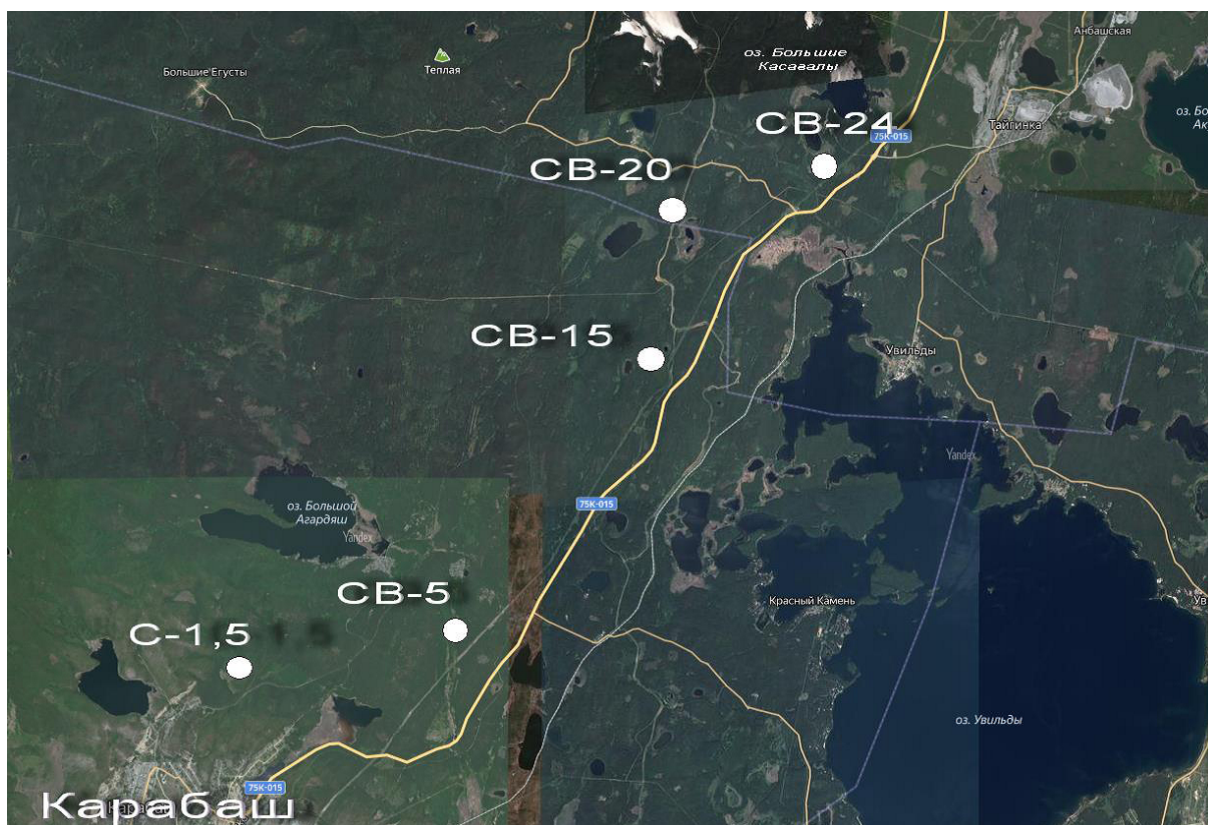


Рис. 1. Расположение пробных площадей на разном удалении от КМК.

дого участка. Оценка состояния березовых насаждений проводилась методом биоиндикации с использованием показателей дефолиации (процент потери листвы) и дехромации (изменение окраски) крон деревьев в качестве индикаторов (Методика организации и проведения работ., 1995). Были использованы общепринятые методы определения таксационных показателей (Моисеев, 1987).

Коэффициент концентрации позволяет оценить уровень содержания поллютантов в исследуемом объекте при техногенной нагрузке по отношению к среднефоновому его содержанию, т.е. в листьях деревьев, произрастающих в условиях регионального фона. Аномальными считаются концентрации, для которых  $K_c \geq 1.5$  (Саэт и др., 1990). Коэффициенты концентрации для оценки интенсивности накопления ТМ березой повислой рассчитывались по следующей формуле:

$$K_c = C_o / C_k,$$

где  $K_c$  – коэффициент концентрации,  $C_o$  – содержание элемента в листьях в условиях загрязнения,  $C_k$  – содержание элемента в фоновых условиях. В качестве фона использовались значения, полученные для ПП с наилучшим жизненным состоянием.

Категория ослабленности (санитарного состояния) насаждений определялась в соответствии с рекомендациями В.А. Алексеева (1989): здоровой характеризуется при  $K_c = 1.0–1.5$ , ослабленный при  $K_c = 1.6–2.5$ , сильно ослабленный при  $K_c = 2.6–3.5$ , отмирающий при  $K_c = 3.6–4.6$  и отмерший при  $K_c \geq 4.6$ .

Для оценки накопления в растениях тяжелых металлов рассчитывали суммарный показатель концентрации (СПК) (Неверова и Колмогорова, 2003):

$$СПК = \sum(C_o - C_k) / C_k.$$

Индекс СПК, как и другие индексы загрязнения тяжелыми металлами, основан на абсолютных данных измерений и не учитывает геохимический фон (Kowalska et al., 2018). Н.Н. Москаленко и

Р.С. Смирнова (1990) на основе величины СПК тяжелых металлов выделяют следующие уровни загрязнения растительности: минимальный (10–20); средний (20–30); высокий (30–40); очень высокий (40–60); чрезвычайно высокий (60–80 и более).

Для изучения вариабельности химического состава листьев и индивидуальной изменчивости было отобрано по 10 деревьев с каждого пробного участка в районе АО «Карабашмедь», с каждого дерева взят один образец листьев весом около 20 гр. Сбор образцов проводился в конце июля 2019 г. Были отобраны листья только с укороченных побегов, которые образуют основную часть полога у взрослых деревьев и имеют одинаковый возраст из-за синхронного распускания листьев весной (Macdonald and Mothersill, 1983). Отбор и подготовка проб к анализу проводились по общепринятым методикам (Rautio, 2020).

Содержание тяжелых металлов, входящих в состав выбросов завода (кадмия, кобальта, хрома, меди, железа, никеля, свинца, марганца и цинка), было определено методом атомно-абсорбционной спектrophотометрии с помощью атомно-абсорбционного спектрофотометра novAA-300 (AnalyticJena, Германия). Результат выражен в мг/кг сухого веса. Для интерпретации полученных результатов нами использовалась шкала, приводимая А. Кабата-Пендиас (1989), в которой приведены нормальные (или достаточные) концентрации микроэлементов (мг/кг сухой массы): Cd – 0.05–0.2; Co – 0.02–1; Cr – 0.1–0.5; Cu – 5–30; Ni – 0.1–5; Pb – 5–10; Zn – 27–150; при этом избыточными (или токсичными) считаются следующие: Cd – 5–30; Co – 15–50; Cr – 5–30; Cu – 20–100; Ni – 10–100; Pb – 30–300; Zn – 100–400.

Полученный материал был проанализирован с использованием пакета программ Microsoft Excel 2007 и метода статистического анализа в программе STATISTICA V. 10 (StatSoft Inc., США). Для определения различий между пятью группами использовался однофакторный дисперсионный анализ (ANOVA) с последующим определением достоверности различий при помощи критерия Фишера. Зависимость содержания элементов в растениях от жизненного состояния деревьев проверялась с помощью параметрического корреляционного теста г-Пирсона. Результаты статистического анализа оценивались по уровню значимости 5%.

## Результаты и обсуждение

В Табл. 1 представлена информация о состоянии лесов на разном расстоянии от АО "Карабашмедь". Березовые леса, находящиеся ближе к источнику загрязнения (С-1.5), имеют наибольшую степень повреждения. Уровень дефолиации составляет 59.5%, дехромации - 52% и индекс повреждения – 3.3, что в 2.7, 3.3 и 2 раза больше, чем в фоновых условиях. Пробные площади, находящиеся на расстоянии от 15 до 24 км, характеризуются наилучшим состоянием, по сравнению с другими точками. На СВ-15, СВ-20 и СВ-24 древостои характеризуются как ослабленные, на С-1.5 и СВ-5 – сильно ослабленные. Березовые древостои на расстоянии 24 км, несмотря на удаленность от АО «Карабашмедь», характеризуются худшим состоянием, что объясняется влиянием таких факторов, как рельеф местности, скорость ветра и др., которые имеют большое значение в горных регионах. Таким образом, можно сделать вывод о негативном воздействии КМК на жизненное состояние березовых древостоев, проявляющемся в увеличении дефолиации, дехромации и ухудшении категории состояния.

**Табл. 1.** Характеристика березового древостоя на разном удалении от АО «Карабашмедь». \* – значения достоверно отличаются от показателей для С-1.5 при  $p < 0.05$ .

Участок	Средняя дефолиация, %	Средняя дехромация, %	Категория состояния
С-1.5	59.5 ± 3.4	52 ± 4.5	3.2 ± 0.1
СВ-5	42.8 ± 6.1*	16.7 ± 5.6*	2.6 ± 0.2*
СВ-15	25.6 ± 3.2*	8.5 ± 2.6*	2.1 ± 0.07*
СВ-20 (фон)	22 ± 2.5*	16.1 ± 4.2*	1.6 ± 0.07*
СВ-24	39.5 ± 5.1*	17.8 ± 2.8*	2.4 ± 0.2*

В листьях берез было изучено валовое содержание ТМ и показан вклад каждого металла в их совокупном накоплении в листьях на разном расстоянии от АО «Карабашмедь». Общее содержание тяжелых металлов в листьях возрастало с приближением к источнику загрязнения; наибольшая концентрация (2100 мг/кг сухого веса) обнаружена на расстоянии в 1.5 км, тогда как на расстоянии в 20 км она составляла 1034 мг/кг. Кроме того, на расстоянии 20 км (фон) содержание почти всех изученных ТМ в листьях березы повислой было наименьшим по сравнению с другими участками.

Содержание железа, марганца и цинка в листьях березы повислой значительно превышало уровни других элементов (Рис. 2), что также было обнаружено в работе по исследованию аккумуляции ТМ в листьях древесных пород (Jurković et al, 2023). Наибольшая концентрация (648–1294 мг/г) в нашем исследовании отмечена для марганца. Марганец является одним из наиболее важных микроэлементов в растениях (Alejandro et al., 2020). Биоаккумуляция марганца березой повислой была описана в недавних исследованиях (Çomaklı and Bingöl, 2021; Zapata-Carbonell et al., 2020).

На участках, ближайших к источнику загрязнения, достоверно увеличивалось содержание в листьях березы металлов 1-го (Cd, Pb, Zn) и 2-го (Cu, Fe) классов опасности<sup>1</sup>, по сравнению с участками, удаленными на 15 и более км от КМК (Рис. 3, 4). Так, уровень кадмия превышает фоновые показатели на участке С-1.5 в 7 раз, на участке СВ-5 – в 3.5 раза. Концентрация цинка на участках СВ-1.5 и СВ-5 превышает значения фона в 3 раза, железа – в 2.3 раза. Во всех ПП содержание цинка превышает токсичные концентрации (Кабата-Пендиас и Пендиас, 1989). По отношению к цинку береза повислая выступает как селективный аккумулятор: даже в чистых местообитаниях этот элемент накапливается в листьях березы в повышенных количествах (Урагильдин и Сулейманов, 2022). На расстоянии от 15 до 24 км от завода концентрации кадмия, хрома, железа, меди, свинца и цинка достоверно не изменяются.

Концентрация меди на участке С-1.5 в 2.5 раза, а на участке СВ-5 в 2 раза выше фона.

Ион  $\text{Cu}^{2+}$  важен для метаболизма растений (Williams et al., 2000). Исследования показали, что интенсивность биоаккумуляции этого элемента сильно зависит от вида растений (Lange et al., 2017; Reeves et al., 2018; Xiao et al., 2008).

Накопление свинца в листьях березы повислой увеличивалось с 1.5–3 мг/кг на более отдаленных участках до 12 мг/кг на С-1.5.

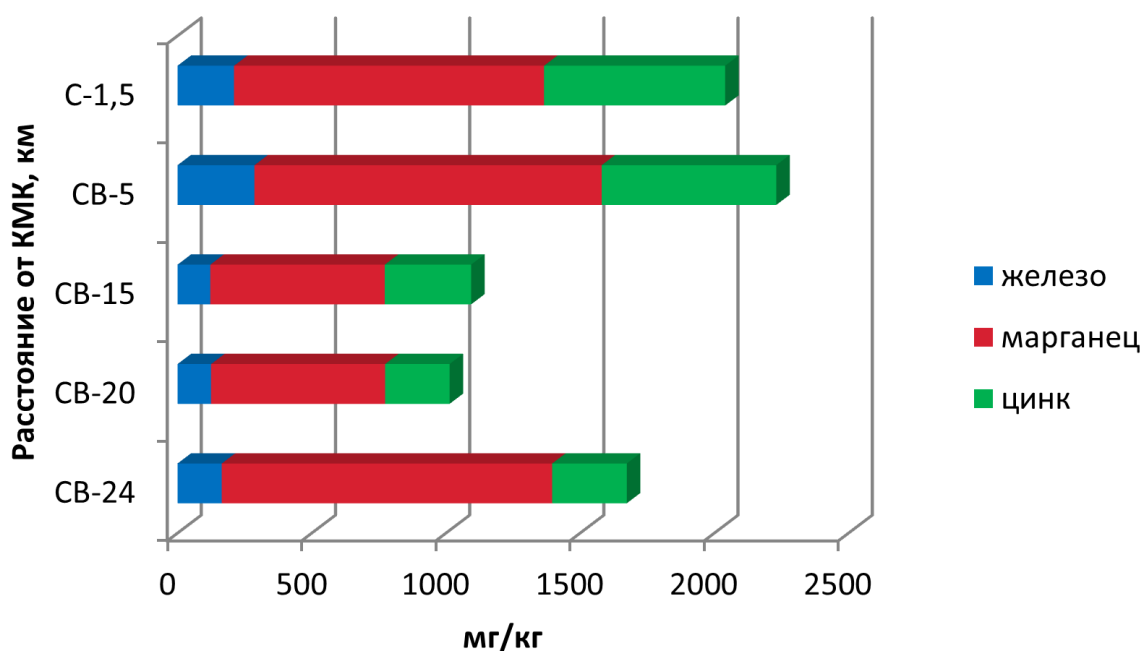


Рис. 2. Содержание железа, марганца и цинка в листьях березы повислой на разном удалении от КМК.

<sup>1</sup> МУ 2.1.7.730-99. Гигиеническая оценка качества почвы населенных мест.

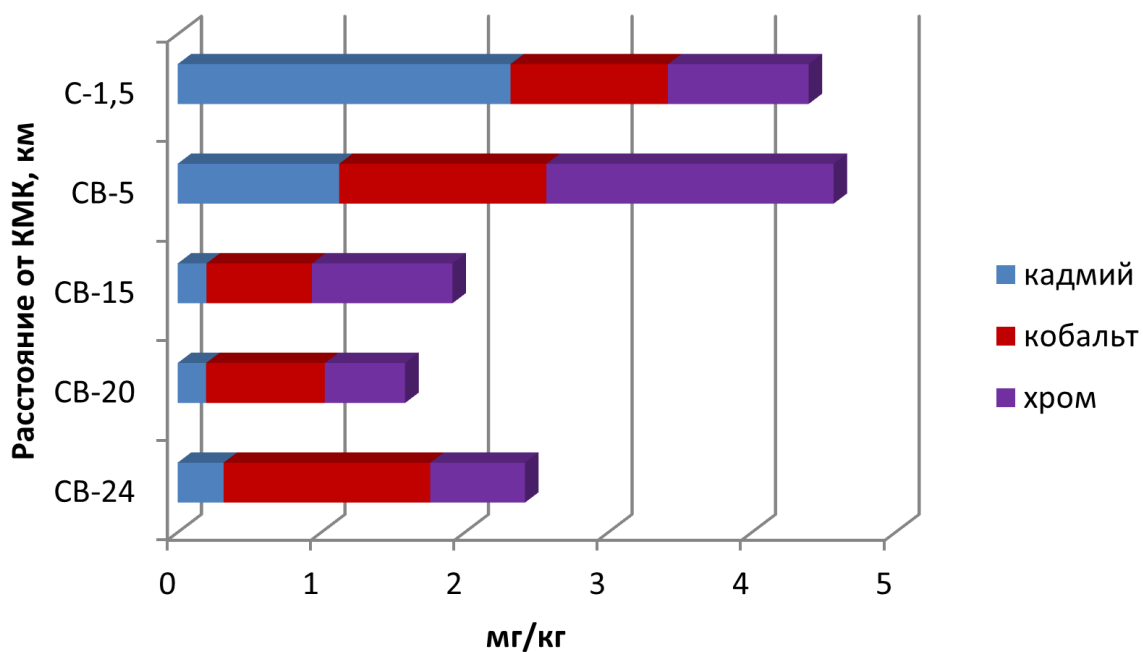


Рис. 3. Содержание кадмия, кобальта и хрома в листьях березы повислой на разном удалении от КМК.

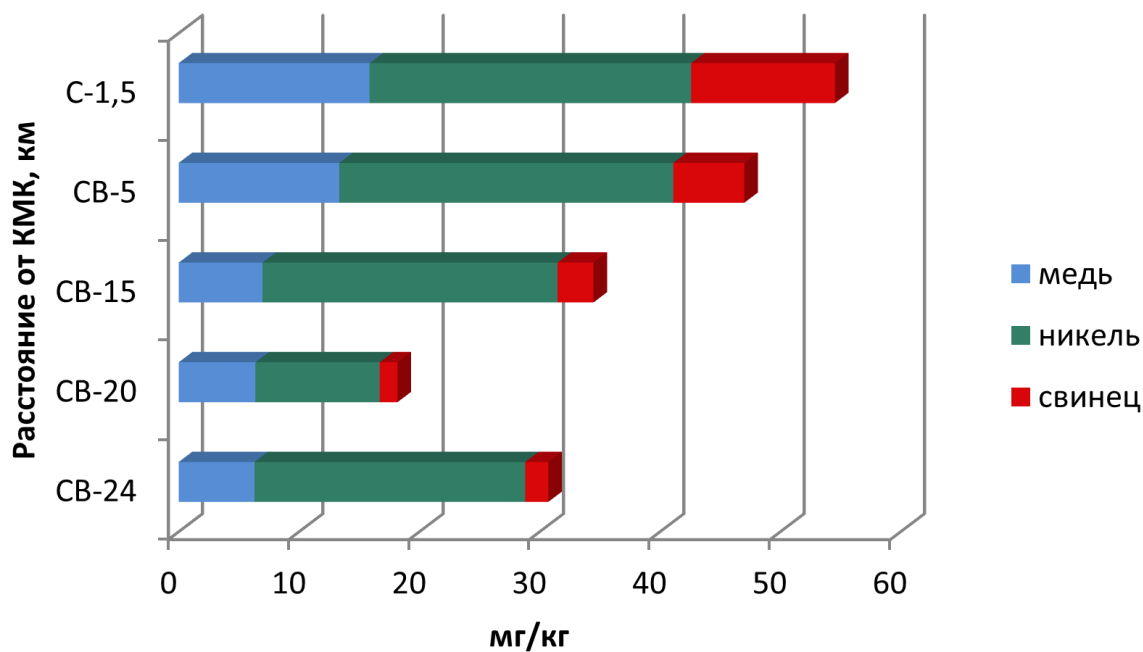


Рис. 4. Содержание меди, никеля и свинца в листьях березы повислой на разном удалении от КМК.

Содержание никеля на всех участках высокое (22.5–27.8 мг/кг), за исключением СВ-20, где уровень этого элемента равен 10.3 мг/кг. Среднее количество никеля в земной коре составляет около 20 мг/кг (Кабата-Пендиас и Пендиас, 1989). Из золотосодержащей руды никель получают из пирротина ( $\text{Fe}(1-x)\text{S}$ ), который может содержать до 5% никеля, и пентландита  $(\text{FeNi})_9\text{S}_8$ , а также из халькопирита ( $\text{CuFeS}_2$ ) и герсдорфита ( $\text{NiAsS}$ ) (Fashola et al., 2016). Научных доказательств существенной роли никеля в метаболизме растений нет.

Результаты расчетов коэффициентов концентрации ТМ и суммарного показателя концентрации в листьях березы повислой приведены в Табл. 2. На расстоянии 1.5–5 км от источника загрязнения Кс для листьев берез в несколько раз превышают фоновые значения по всем элементам. Наибольший вклад в загрязнение вносят кадмий, свинец, цинк, никель, медь максимальные значения обнаружены для кадмия. Никель накапливается в листьях берез в повышенных количествах даже на отдаленных ПП (Кс варьирует от 2.2 до 2.7). На расстоянии в 5 км (СВ-5) Кс кобальта, хрома, железа, марганца и никеля превышают аналогичные показатели на более близкой к источнику загрязнения ПП (С-1.5).

Показано, что на участках, близких к источнику загрязнения, СПК значительно возрастает за счет увеличения содержания кадмия и свинца, в меньшей степени цинка и меди (Табл. 2). Данные металлы входят в состав выбросов АО «Карабашмедь» и относятся к первому и второму классу опасности (токсичные и особо токсичные)<sup>2</sup>. Корреляционный анализ показал положительную связь СПК с жизненным состоянием древостоя. С увеличением СПК, увеличивается дефолиация ( $r = 0.92$ ,  $p < 0.05$ ), дехромация ( $r = 0.79$ ,  $p < 0.05$ ) и ухудшается санитарное состояние ( $r = 0.93$ ,  $p < 0.05$ ).

Максимальные значения СПК отмечаются на участке С-1.5, наиболее поврежденном выбросами комбината: загрязнение растительности здесь можно оценить как среднее (Москаленко и Смирнова, 1990). Показатель для СВ-5 соответствует минимальному уровню загрязнения, несмотря на то, что древостои здесь характеризуются как сильно ослабленные. На участках СВ-24 и СВ-15 уровень загрязнения также оценивается как минимальный. При этом коэффициенты концентрации Co, Cr, Fe, Mn, Ni на расстоянии 5 км от КМК были выше, чем на расстоянии 1.5 км, а Co, Cd, Fe и Mn на расстоянии 24 км (самый удаленный участок) – выше, чем в 15 км от источника загрязнения. Мы предполагаем, что предложенная Н.Н. Москаленко и Р.С. Смирновой (1990) шкала оценок СПК не учитывает жизненное состояние древостоя и нуждается в дополнении.

## Заключение

Полученные результаты показывают негативное влияние ОА «Карабашмедь» на древостои березы повислой в северо-восточном и северном направлении. Выявлено ухудшение жизненного состояния древостоев, находящихся ближе к источнику загрязнения: увеличение уровня дефолиации в 2.7 раза, дехромации в 3.3 раза и индекса повреждения в 2 раза по сравнению с более удаленными пробными площадями.

Табл. 2. Показатели загрязнения ТМ листьев березы повислой.

ПП	Кс									СПК
	Cd	Co	Cr	Cu	Fe	Mn	Ni	Pb	Zn	
С-1.5	11.56	1.32	1.75	2.49	1.6857	1.78	2.59	8.08	2.81	25.1
СВ-5	5.63	1.74	3.57	2.09	2.2941	1.99	2.69	3.99	2.71	17.7
СВ-15	1.01	0.88	1.75	1.09	0.9786	1.00	2.38	2.017	1.34	3.5
СВ-24	1.60	1.73	1.18	0.99	1.318	1.90	2.18	1.29	1.16	4.4

Наибольшее общее содержание тяжелых металлов в листьях берез обнаружено на расстоянии в 1.5 км (2100 мг/кг), наименьшее – на расстоянии в 20 км (1034 мг/кг). Содержание металлов 1-го класса опасности (кадмия, свинца, цинка) и 2-го класса опасности (меди и железа) достоверно возрастало по направлению к источнику загрязнения. При этом коэффициенты концентрации Co, Cr, Fe, Mn, Ni на расстоянии 5 км от КМК были выше, чем на расстоянии 1.5 км, а Co, Cd, Fe и Mn на расстоянии 24 км (самый удаленный участок) – выше, чем в 15 км от источника загрязнения.

По мере приближения к источнику загрязнения значительно повышается СПК, преимущественно за счет кадмия и свинца и в меньшей степени – цинка и меди. Корреляционный анализ показал связь СПК с жизненным состоянием деревьев: с увеличением СПК увеличивается дефолиация, дехромация и ухудшается санитарное состояние древостоя.

В целом, несмотря на повышение концентрации тяжелых металлов в листьях березы и ухудшение ее жизненного состояния в зонах загрязнения, данная аэротехногенная нагрузка не приводит к гибели березовых древостоев в течение длительного времени. Полученные количественные концентрации металлов в листьях березы повислой могут быть использованы для установления пороговых значений в условиях многолетнего влияния выбросов металлургических предприятий.

### Список литературы

- Агиков, И.Н., 2011. Биоиндикация воздействия аэротехногенных поллютантов цветной металлургии на сосну обыкновенную как показатель состояния лесных экосистем. *Экология и промышленность России* **7**, 26–28.
- Алексеев, В.А., 1989. Диагностика жизненного состояния деревьев и древостоев. *Лесоведение* **4**, 51–57.
- Бачурина, А.В., 2008. Влияние промышленных поллютантов ЗАО «Карабашмедь» на состояние прилегающих лесных насаждений. *Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата сельскохозяйственных наук*. Екатеринбург, Россия, 21 с.
- Кабата-Пендиас, А., Пендиас, Х., 1989. Микроэлементы в почвах и растениях. Мир, Москва, СССР, 439 с.
- Калабин, Г.В., Титова, А.В., Шаров, А.В., 2011. Модернизация медеплавильного производства комбината ЗАО «Карабашмедь» и динамика состояния природной среды в зоне его влияния. *Маркшейдерия и недропользование* **3** (53), 65–70.
- Коротеева, Е.В., Вейсберг, Е.И., Куянцева, Н.Б., 2011. Оценка состояния ценофлоры в зоне воздействия Карабашского медеплавильного комбината (Южный Урал). *Известия Самарского научного центра РАН* **13** (1–4), 1005–1011.
- Методика организации и проведения работ по наблюдению за лесами в европейской части России в рамках программы ИКП-Леса (методика ЕКО ООН), 1995. Москва, Россия, 42 с.
- Моисеев, В.С., 1987. Лесная таксация. Учебное пособие. РИО ЛТА, Ленинград, СССР, 83 с.
- Москаленко, Н.Н., Смирнова, Р.С., 1990. Геохимическая оценка загрязнения окружающей среды Ленинского района Москвы. Экология и охрана природы Москвы и Московского региона. МГУ, Москва, СССР, 237 с.
- Неверова, О.А., Колмогорова, Е.Ю., 2003. Древесные растения и урбанизированная среда: экологические и биотехнологические аспекты. Наука, Новосибирск, Россия, 222 с.
- Сает, Ю.Е., Ревич, Б.А., Янин, Е.П., 1990. Геохимия окружающей среды. Недр, Москва, СССР, 335 с.
- Уразгильдин, Р.В., Сулейманов, Р.Р., Гиниятуллин, Р.Х., Тагирова, О.В., Кулагин, А.Ю., 2022. Техногенное загрязнение почв тяжелыми металлами и их накопление в листьях и хвое лесобразователей Предуралья. *Экология и промышленность России* **26** (6), 60–66.

- Усольцев, В.А., Воробейчик, Е.Л., Бергман, И.Е., Трубина, М.Р., Бачурина, А.В., 2011. Структура фитомассы нижнего лесного яруса вблизи медеплавильных заводов Урала *Леса России и хозяйство в них* **4** (41), 37–44.
- Aguinaga, O.E., White, K.N., Dean, A.P., Pittman, J.K., 2021. Addition of organic acids to acid mine drainage polluted wetland sediment leads to microbial community structure and functional changes and improved water quality. *Environmental Pollution* **290**, 118064. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.118064>
- Alejandro, S., Höller, S., Meier, B., Peiter, E., 2020. Manganese in plants: from acquisition to subcellular allocation. *Frontiers in Plant Science* **11**, 1–23. <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.00300>
- Baker, A.J.M., 1981. Accumulators and excluders – strategies in the response of plants to heavy metals. *Journal of Plant Nutrition* **3** (1–4), 643–654. <https://doi.org/10.1080/01904168109362867>
- Brković, L.B., Bošković Rakočević, L.S., Mladenović, J., Grbović, F.J., Branković, S.R., 2021. Metal bioaccumulation, translocation and phytoremediation potential of some woody species at mine tailings. *Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca* **49** (4), 12487. <https://doi.org/10.15835/nbha49412487>
- Çomaklı, E., Bingöl, M.S., 2021. Evaluation of heavy metal accumulations in plant organs and soil white birch (*Betula verrucosa* Ehrh) Plantation. *Water, Air, & Soil Pollution* **232** (12), 515. <https://doi.org/10.1007/s11270-021-05473-w>
- Dmuchowski, W., Baczewska, A.H., Gozdowski, D., 2012. Silver birch (*Betula pendula* Roth) as zinc hyperaccumulator. *Heavy Metals in the Environment: Selected Papers from the ICHMET-15 Conference* **2**, 19–25. <https://doi.org/10.5645/b.2.2>
- Dubois, H., Verkasalo, E., Claessens, H., 2020. Potential of birch (*Betula pendula* Roth and *B. pubescens* Ehrh.) for forestry and forest-based industry sector within the changing climatic and socio-economic context of western Europe. *Forests* **11** (3), 1–26. <https://doi.org/10.3390/f11030336>
- Favas, P.J.C., Sarkar, S.K., Rakshit, D., Venkatachalam, P., Prasad, M.N.V., 2016. Acid mine drainages from abandoned mines: hydrochemistry, environmental impact, resource recovery, and prevention of pollution. In: Prasad, M.N.v., Shih, K. (eds.), *Environmental materials and waste: resource recovery and pollution*. Elsevier – Academic Press, Amsterdam, Netherlands, 413–462. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-803837-6.00017-2>
- Ferreira, R.A., Pereira, M.F., Magalhães, J.P., Maurício, A.M., Caçador, I. et al., 2021. Assessing local acid mine drainage impacts on natural regeneration revegetation of São Domingos mine (Portugal) using a mineralogical, biochemical and textural approach. *Science of the Total Environment* **755**, 142825. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.142825>
- Ivanov, Y.V., Savochkin, Y.V., Kuznetsov, V.V., 2011. Scots pine as a model plant for studying the mechanisms of conifers adaptation to heavy metal action: 1. Effects of continuous zinc presence on morphometric and physiological characteristics of developing Pine seedlings. *Russian Journal of Plant Physiology* **58** (5), 871–878.
- Jurković, J., Kazlagić, A., Sulejmanović, J., Smječanin, N., Karalija, E. et al., 2023. Assessment of heavy metals bioaccumulation in Silver Birch (*Betula pendula* Roth) from an AMD active, abandoned gold mine waste. *Environmen Geochemistry Health* **45** (12), 1–19. <https://doi.org/10.1007/s10653-023-01774-7>
- Kowalska, J.B., Mazurek, R., Gąsiorek, M., Zaleski, T., 2018. Pollution indices as useful tools for the comprehensive evaluation of the degree of soil contamination – A review. *Environmental Geochemistry and Health* **40**, 2395–2420.

- Lange, B., van der Ent, A., Baker, A.J.M., Echevarria, G., Mahy, G. et al., 2017. Copper and cobalt accumulation in plants: A critical assessment of the current state of knowledge. *New Phytologist* **213** (2), 537–551. <https://doi.org/10.1111/nph.14175>
- Macdonald, A.D., Mothersill, D.H., 1983. Shoot development in *Betula papyrifera*. 1. Short-shoot organogenesis. *Canadian Journal of Botany* **1** (12), 3049–3065.
- Malinowska, K., 2010. Content of selected elements in the leaves growing in an urban agglomeration. *Ecological Chemistry and Engineering* **17** (10), 1263–1268.
- Naila, A., Meerdink, G., Jayasena, V., Sulaiman, A.Z., Ajit, A.B., 2019. A review on global metal accumulators – mechanism, enhancement, commercial application, and research trend. *Environmental Science and Pollution Research* **26** (26), 26449–26471. <https://doi.org/10.1007/s11356-019-05992-4>
- Rautio, P., Fürst, A., Stefan, K., Raitio, H., Bartels, U., 2020: Part XII: Sampling and analysis of needles and leaves. Version 2020-3. In: UNECE ICP Forests Programme Co-ordinating Centre (ed.), *Manual on methods and criteria for harmonized sampling, assessment, monitoring and analysis of the effects of air pollution on forests*. Thünen Institute of Forest Ecosystems, Eberswalde, Germany, 1–16.
- Reeves, R., Baker, A.J.M., Jafré, T., Erskine, P.D., Echevarria, G., van der Ent, A., 2018. A global database for plants that hyperaccumulate metal and metalloid trace elements. *New Phytologist* **218** (2), 407–411. <https://doi.org/10.1111/nph.14907>
- Sahoo, H., Senapati, D., Thakur, I.S., Naik, U.C., 2020. Integrated bacteria-algal bioreactor for removal of toxic metals in acid mine drainage from iron ore mines. *Bioresource Technology Reports* **11**, 100422. <https://doi.org/10.1016/j.biteb.2020.100422>
- Sitko, K., Opała-Owczarek, M., Jemioła, G., Gieroń, Ż., Szopiński, M., et al., 2022. Effect of drought and heavy metal contamination on growth and photosynthesis of silver birch trees growing on post-industrial heaps. *Cells* **11** (1), 53. <https://doi.org/10.3390/cells11010053>
- Williams, L.E., Pittman, J.K., Hall, J.L., 2000. Emerging mechanisms for heavy metal transport in plants. *Biochimica et Biophysica Acta (BBA) – Biomembranes* **1465** (1), 104–126. [https://doi.org/10.1016/S0005-2736\(00\)00133-4](https://doi.org/10.1016/S0005-2736(00)00133-4)
- Xiao, W.L., Luo, C.L., Chen, Y.H., Shen, Z.G., Li, X.D., 2008. Bioaccumulation of heavy metals by wild plants growing on copper mine spoils in China. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* **39** (3–4), 315–328. <https://doi.org/10.1080/00103620701826415>
- Zapata-Carbonell, J., Ciadamidaro, L., Parelle, J., Chalot, M., Tatin-Froux, F., 2020. Improving silver birch (*Betula pendula*) growth and Mn accumulation in residual red gypsum using organic amendments. *Frontiers in Environmental Science* **8**, 1–9. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2020.00024>

## References

- Agikov, I.N., 2011. Bioindikaciya vozdeistviya aehrotekhnogennykh pollyutantov cvetnoi metallurgii na sosnu obyknovennuyu kak pokazatel' sostoyaniya lesnykh ehkosistem [Bioindication of the impact of aerotechnogenic pollutants of non-ferrous metallurgy on common pine as an indicator of the state of forest ecosystems]. *Ehkologiya i promyshlennost' Rossii [Ecology and Industry of Russia]* **7**, 26–28. (In Russian).
- Aguinaga, O.E., White, K.N., Dean, A.P., Pittman, J.K., 2021. Addition of organic acids to acid mine drainage polluted wetland sediment leads to microbial community structure and functional changes and improved water quality. *Environmental Pollution* **290**, 118064. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.118064>

- Alejandro, S., Höller, S., Meier, B., Peiter, E., 2020. Manganese in plants: from acquisition to subcellular allocation. *Frontiers in Plant Science* **11**, 1–23. <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.00300>
- Alekseev, V.A., 1989. Diagnostika zhiznennogo sostoyaniya derev'ev i drevostoev [Diagnostics of the vital condition of trees and stands]. *Lesovedenie [Forestry]* **4**, 51–57. (In Russian).
- Bachurina, A.V., 2008. Vliyanie promyshlennykh pollyutantov ZAO «Karabashmed'» na sostoyanie prilgayushchikh lesnykh nasazhdenii [The influence of industrial pollutants of Karabashmed CJSC on the condition of adjacent forest plantations]. *PhD in Agricultural Sciences thesis abstract*. Ekaterinburg, Russia, 21 p. (In Russian).
- Baker, A.J.M., 1981. Accumulators and excluders – strategies in the response of plants to heavy metals. *Journal of Plant Nutrition* **3** (1–4), 643–654. <https://doi.org/10.1080/01904168109362867>
- Brković, L.B., Bošković Rakočević, L.S., Mladenović, J., Grbović, F.J., Branković, S.R., 2021. Metal bioaccumulation, translocation and phytoremediation potential of some woody species at mine tailings. *Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca* **49** (4), 12487. <https://doi.org/10.15835/nbha49412487>
- Çomaklı, E., Bingöl, M.S., 2021. Evaluation of heavy metal accumulations in plant organs and soil white birch (*Betula verrucosa* Ehrh) Plantation. *Water, Air, & Soil Pollution* **232** (12), 515. <https://doi.org/10.1007/s11270-021-05473-w>
- Dmuchowski, W., Baczewska, A.H., Gozdowski, D., 2012. Silver birch (*Betula pendula* Roth) as zinc hyperaccumulator. *Heavy Metals in the Environment: Selected Papers from the ICHMET-15 Conference* **2**, 19–25. <https://doi.org/10.5645/b.2.2>
- Dubois, H., Verkasalo, E., Claessens, H., 2020. Potential of birch (*Betula pendula* Roth and *B. pubescens* Ehrh.) for forestry and forest-based industry sector within the changing climatic and socio-economic context of western Europe. *Forests* **11** (3), 1–26. <https://doi.org/10.3390/f11030336>
- Favas, P.J.C., Sarkar, S.K., Rakshit, D., Venkatachalam, P., Prasad, M.N.V., 2016. Acid mine drainages from abandoned mines: hydrochemistry, environmental impact, resource recovery, and prevention of pollution. In: Prasad, M.N.v., Shih, K. (eds.), *Environmental materials and waste: resource recovery and pollution*. Elsevier – Academic Press, Amsterdam, Netherlands, 413–462. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-803837-6.00017-2>
- Ferreira, R.A., Pereira, M.F., Magalhães, J.P., Maurício, A.M., Caçador, I. et al., 2021. Assessing local acid mine drainage impacts on natural regeneration revegetation of São Domingos mine (Portugal) using a mineralogical, biochemical and textural approach. *Science of the Total Environment* **755**, 142825. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.142825>
- Ivanov, Y.V., Savochkin, Y.V., Kuznetsov, V.V., 2011. Scots pine as a model plant for studying the mechanisms of conifers adaptation to heavy metal action: 1. Effects of continuous zinc presence on morphometric and physiological characteristics of developing Pine seedlings. *Russian Journal of Plant Physiology* **58** (5), 871–878.
- Jurković, J., Kazlagić, A., Sulejmanović, J., Smječanin, N., Karalija, E. et al., 2023. Assessment of heavy metals bioaccumulation in Silver Birch (*Betula pendula* Roth) from an AMD active, abandoned gold mine waste. *Environmen Geochemistry Health* **45** (12), 1–19. <https://doi.org/10.1007/s10653-023-01774-7>
- Kabata-Pendias, A., Pendias, X., 1989. Mikroelementy v pochvah i rasteniyah [Trace elements in soils and plants]. Mir, Moscow, USSR, 439 p. (In Russian).
- Kalabin, G.V., Titova, A.V., Sharov, A.V., 2011. Modernizaciya medeplavil'nogo proizvodstva kombinata ZAO «Karabashmed'» i dinamika sostoyaniya prirodnoi sredy v zone ego vliyaniya [Modernization

of the copper smelting plant of CJSC Karabashmed and the dynamics of the state of the natural environment in the zone of its influence]. *Marksheideriya i nedropol'zovanie [Surveying and Subsoil Use]* **3** (53), 65–70. (In Russian).

Koroteeva, E.V., Veisberg, E.I., Kuyanceva, N.B., 2011. Ocenka sostoyaniya cenoflory v zone vozdeistviya Karabashskogo medeplavil'nogo kombinata (Yuzhnyi Ural) [Assessment of the state of the cenoflora in the impact zone of the Karabash copper smelter (Southern Urals)]. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo centra RAN [Proceedings of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences]* **13** (1–4), 1005–1011. (In Russian).

Kowalska, J.B., Mazurek, R., Gąsiorek, M., Zaleski, T., 2018. Pollution indices as useful tools for the comprehensive evaluation of the degree of soil contamination – A review. *Environmental Geochemistry and Health* **40**, 2395–2420.

Lange, B., van der Ent, A., Baker, A.J.M., Echevarria, G., Mahy, G. et al., 2017. Copper and cobalt accumulation in plants: A critical assessment of the current state of knowledge. *New Phytologist* **213** (2), 537–551. <https://doi.org/10.1111/nph.14175>

Macdonald, A.D., Mothersill, D.H., 1983. Shoot development in *Betula papyrifera*. 1. Short-shoot organogenesis. *Canadian Journal of Botany* **1** (12), 3049–3065.

Malinowska, K., 2010. Content of selected elements in the leaves growing in an urban agglomeration. *Ecological Chemistry and Engineering* **17** (10), 1263–1268.

Metodika organizacii i provedeniya rabot po nablyudeniyu za lesami v evropeiskoi chasti Rossii v ramkakh programmy IKP-Lesa (metodika EKO OON) [Methodology for organizing and conducting forest monitoring in the European part of Russia as part of the ICP-Forests program (UNECE methodology)], 1995. Moscow, Russia, 42 p. (In Russian).

Moiseev, V.S., 1987. Lesnaya taksaciya. Uchebnoe posobie [Forest taxation. The training manual]. RIO LTA, Leningrad, USSR, 83 p. (In Russian).

Moskalenko, N.N., Smirnova, R.S., 1990. Geohimicheskaya ocenka zagryazneniya okruzhayushchei sredy Leninskogo raiona Moskvy. Ekologiya i ohrana prirody Moskvy i Moskovskogo regiona [Geochemical assessment of environmental pollution in the Leninsky district of Moscow. Ecology and nature protection of Moscow and the Moscow region]. Moscow State University, Moscow, USSR, 237 p. (In Russian).

Naila, A., Meerdink, G., Jayasena, V., Sulaiman, A.Z., Ajit, A.B., 2019. A review on global metal accumulators – mechanism, enhancement, commercial application, and research trend. *Environmental Science and Pollution Research* **26** (26), 26449–26471. <https://doi.org/10.1007/s11356-019-05992-4>

Neverova, O.A., Kolmogorova, E.Yu., 2003. Drevesnye rasteniya i urbanizirovannaya sreda: ekologicheskie i biotekhnologicheskie aspekty [Woody plants and urbanized environment: ecological and biotechnological aspects]. Nauka, Novosibirsk, Russia, 222 p. (In Russian).

Rautio, P., Fürst, A., Stefan, K., Raitio, H., Bartels, U., 2020: Part XII: Sampling and analysis of needles and leaves. Version 2020-3. In: UNECE ICP Forests Programme Co-ordinating Centre (ed.), *Manual on methods and criteria for harmonized sampling, assessment, monitoring and analysis of the effects of air pollution on forests*. Thünen Institute of Forest Ecosystems, Eberswalde, Germany, 1–16.

Reeves, R., Baker, A.J.M., Jafré, T., Erskine, P.D., Echevarria, G., van der Ent, A., 2018. A global database for plants that hyperaccumulate metal and metalloid trace elements. *New Phytologist* **218** (2), 407–411. <https://doi.org/10.1111/nph.14907>

- Saet, Yu.E., Revich, B.A., Yanin, E.P., 1990. Geohimiya okruzhayushchei sredy [Geochemistry of the environment]. Nedra, Moscow, USSR, 335 p. (In Russian).
- Sahoo, H., Senapati, D., Thakur, I.S., Naik, U.C., 2020. Integrated bacteria-algal bioreactor for removal of toxic metals in acid mine drainage from iron ore mines. *Bioresource Technology Reports* **11**, 100422. <https://doi.org/10.1016/j.biteb.2020.100422>
- Sitko, K., Opała-Owczarek, M., Jemioła, G., Gieroń, Ż., Szopiński, M., et al., 2022. Effect of drought and heavy metal contamination on growth and photosynthesis of silver birch trees growing on post-industrial heaps. *Cells* **11** (1), 53. <https://doi.org/10.3390/cells11010053>
- Urazgil'din, R.V., Suleimanov, R.R., Giniyatullin, R.Kh., Tagirova, O.V., Kulagin, A.Yu., 2022. Tekhnogennoe zagryaznenie pochv tyazhelymi metallami i ikh nakoplenie v list'yakh i khvoe lesoobrazovatelei Predural'ya [Anthropogenic pollution of soils with heavy metals and their accumulation in the leaves and conifers of forest-forming plants in the Urals]. *Ekologiya i promyshlennost' Rossii [Ecology and Industry of Russia]* **26** (6), 60–66. (In Russian).
- Usoltsev, V.A., Vorobeichik, E.L., Bergman, I.E., Trubina, M.R., Bachurina, A.V., 2011. Ctruktura fitomassy nizhnego lesnogo yarusa vblizi medeplavil'nykh zavodov Urala [Biomass structure of forest understory near copper smelters on the Ural]. *Lesn Rossii i khozyaistvo v nikh [Russian Forests and Their Management]* **4** (41), 37–44. (In Russian).
- Williams, L.E., Pittman, J.K., Hall, J.L., 2000. Emerging mechanisms for heavy metal transport in plants. *Biochimica et Biophysica Acta (BBA) – Biomembranes* **1465** (1), 104–126. [https://doi.org/10.1016/s0005-2736\(00\)00133-4](https://doi.org/10.1016/s0005-2736(00)00133-4)
- Xiao, W.L., Luo, C.L., Chen, Y.H., Shen, Z.G., Li, X.D., 2008. Bioaccumulation of heavy metals by wild plants growing on copper mine spoils in China. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* **39** (3–4), 315–328. <https://doi.org/10.1080/00103620701826415>
- Zapata-Carbonell, J., Ciadamidaro, L., Parelle, J., Chalot, M., Tatin-Froux, F., 2020. Improving silver birch (*Betula pendula*) growth and Mn accumulation in residual red gypsum using organic amendments. *Frontiers in Environmental Science* **8**, 1–9. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2020.00024>