

## СВЯЗЬ СОДЕРЖАНИЯ ПОЛЛЮТАНТОВ В ЛИСТЬЯХ БЕРЕЗЫ ПОВИСЛОЙ С ЖИЗНЕННЫМ СОСТОЯНИЕМ ДРЕВОСТОЯ НА ПРИМЕРЕ АО «КАРАБАШМЕДЬ»

В.Д. Горбунова✉, С.Л. Менщиков

ФГБУН «Ботанический сад Уральского отделения Российской академии наук», Россия, 620144, Свердловская обл., г. Екатеринбург, ул. 8 Марта, д. 202 а

botgarden.gor@yandex.ru

Проанализирована связь содержания поллютантов (серы и тяжелых металлов) в листьях березы повислой и жизненного состояния древостоя. Установлено, что наибольшее влияние на состояние древостоев в зоне действия АО «Карабашмедь» оказывают металлы — кадмий, свинец, медь и цинк. Выявлена положительная корреляционная связь параметров жизненного состояния (дефолиации, дехромации и категории состояния) и содержания этих микроэлементов (коэффициенты корреляции свыше 0,4...0,6). Зафиксировано повышение концентрации кадмия, свинца, цинка, меди и хрома в листьях березы на пробных площадях, ближайших к источнику загрязнения АО «Карабашмедь».

**Ключевые слова:** береза повислая, тяжелые металлы, аэротехногенные выбросы

**Ссылка для цитирования:** Горбунова В.Д., Менщиков С.Л. Связь содержания поллютантов в листьях березы повислой с жизненным состоянием древостоя на примере АО «Карабашмедь» // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2024. Т. 28. № 5. С. 129–137. DOI: 10.18698/2542-1468-2024-5-129-137

Поиск показателей для диагностики жизненного состояния растительности в условиях воздействия внешних факторов, таких как техногенное загрязнение — актуальная задача при разработке методических аспектов оценки ущерба природным экосистемам, в результате техногенного воздействия одного из основных антропогенных факторов, которые обуславливают изменение природных сообществ. Город Карабаш Челябинской области рассматривается в качестве примера экологической катастрофы, связанной с промышленным производством. Зона воздействия АО «Карабашмедь» (КМК) распространяется на площадь более 35 км<sup>2</sup> [1]. Негативное влияние на природные сообщества территории в значительной мере происходит вследствие выбросов газов и пыли. Около 98 % всех выбросов составляет сернистый газ, который является источником кислотного загрязнения. Пыль, содержащаяся в выбросах, включает в себя разнообразные тяжелые металлы. В частности на 1 т черновой меди, выплавленной на предприятии, приходится 3,75 т выбросов в атмосферу [2].

Основными источниками загрязнения служат отходы медеплавильного производства (отходы обогащения медных и медно-цинковых руд, пиритные отложения в пойме р. Сак-Элга (бассейн Тобола), гранулированный шлак, литой шлак, шламы гидроокислов металлов). Согласно государственному докладу о состоянии окружающей среды в Челябинской области за 2020 г., всего выброшено в атмосферу загрязня-

ющих веществ в 2020 г. в Карабашском районе Челябинской области — 5305 т, из них, в том числе твердых — 0,019 т, газообразных и жидких — 5234 т, диоксида серы — 4116 т, оксида углерода — 382 т, оксида азота (в пересчете на NO<sub>2</sub>) — 505 т, углеводородов (без летучих органических соединений) — 199 т, летучих органических соединений (ЛОС) — 27 т [3]. В список приоритетных веществ, характерных для выбросов АО «Карабашмедь», были включены 18 химических соединений: кадмия оксид, марганец, меди оксид, свинец и его соединения, хром 6+, азота диоксид, азота оксид, кислота серная, мышьяк, углерод (сажа), серы диоксид, сероводород, сероуглерод, углерода оксид, фтористые газообразные соединения, бенз(а)пирен, взвешенные вещества, керосин, в том числе шесть канцерогенов (хром 6+, углерод (сажа), бенз(а)пирен, свинец, кадмий, мышьяк) [4].

На территории воздействия КМК изучались почва [5, 6], древесная [7–10] и травянистая растительность [11, 12], было проанализировано содержание тяжелых металлов в разных органах березы повислой в южном направлении [1]. Береза занимает 124,8 тыс. га площади Челябинской области, занятой лесом, что составляет 52,8 % площади всех древесных видов [4]. *Betula pendula* имеет на листьях толстую кутикулу, в связи с этим вид характеризуется повышенной стойкостью к загрязняющим веществам, выбрасываемым в атмосферу промышленными предприятиями, в том числе к сернистому газу [13]. В свою очередь плодородие почвы оказывает влияние на

надземную фитомассу березы повислой в случае аэротехногенного загрязнения [14].

Несмотря на быструю адаптацию растений к химическим стрессам, они остаются весьма чувствительными к избытку того или иного микроэлемента. Адаптивная стратегия древесных видов к техногенному загрязнению зависит от адаптивного потенциала вида в целом к конкретному виду загрязнения [15]. Однако существуют растения, способные концентрировать отдельные тяжелые металлы без каких-либо видимых маркеров фитотоксичности. Видовая специфичность металлоаккумуляции может проявляться очень четко, так как для некоторых видов нормой становится концентрация тяжелых металлов, в сотни и тысячи раз превосходящая фоновую [16].

О механизмах устойчивости различных культур к повышенной концентрации тяжелых металлов пока мало сведений, установить величину фитотоксичности металла для растений достаточно трудно. Исследователи по-разному оценивают фитотоксичность одного и того же металла. Кроме того, токсичные концентрации тяжелых металлов в растительных тканях установить крайне сложно [17].

Оценка уровня аккумуляции тяжелых металлов в отдельных тканях и органах березы повислой показала, что в период активного роста наибольшее количество тяжелых металлов накапливается в ее листьях, брахибластах и коре [18]. Для древесных растений пороговые значения предельно допустимой концентрации (ПДК) были установлены только для некоторых элементов и древесных пород. Растения, тем не менее, обладают гомеостатическими механизмами, позволяющими поддерживать правильную концентрацию необходимых ионов металлов в различных клеточных компартментах и минимизировать ущерб от воздействия токсичных ионов металлов. [19]. В зависимости от вида и между особями одного вида, видимые симптомы фитотоксичности могут различаться, при этом наиболее распространены хлорозные или бурые пятна на листьях [17]. К широко известным воздействиям тяжелых металлов на растения относят угнетение процесса фотосинтеза, нарушение транспорта питательных веществ и минералов, изменение водного и гормонального обмена, замедление роста [20, 21].

Связь жизненного состояния древостоя с содержанием тяжелых металлов в листьях растений до сих пор остается не изученной.

## Цель работы

Цель работы — изучение связи содержания поллютантов в листьях березы повислой (*Betula pendula*) с жизненным состоянием древостоя в пределах распространения загрязнения АО «Карабашмедь».

## Объекты и методы исследования

Были исследованы природные древостои березы повислой (*Betula pendula* Roth), находящиеся под влиянием выбросов от КМК, расположенного в естественной депрессии Саймоновской долины. В данном районе преобладают юго-западные и западные ветры. Количество осадков составляет 400 мм в год, из них 90 мм выпадает в морозный (ноябрь – декабрь), а 300 мм — в безморозный период (апрель – октябрь) [22]. Почвенный профиль характеризуется каменистостью и незначительной мощностью [23]. Загрязнение водоемов в пределах рассматриваемой территории произошло в результате сброса отходов в р. Сак-Элга [24].

В зависимости от господствующих ветров и рельефа выбрано пять пробных площадей (ПП) с березовыми насаждениями различной степени загрязнения: С-1,5, СВ-5, СВ-15, СВ-20 и СВ-24 (буквами обозначены северное и северо-восточное направления ветра, числами показано расстояние от источника загрязнений до насаждения в километрах).

Для исследования выбрали один вид березы: береза повислая (*Betula pendula* Roth), поскольку он преобладает на всех участках. Модельные деревья были выбраны из верхнего яруса насаждений. Оценка состояния березовых насаждений проводилась методом биоиндикации с помощью показателей дефолиации (потеря хвои и листвы) и дехромации (изменение окраски) крон деревьев в качестве индикаторов [25]. Категория состояния деревьев ( $K_c$ ) определялась в соответствии с рекомендациями Б.И. Ковалева [26]. Древостой характеризуется как здоровый при  $K_c = 1,0 \dots 1,5$ , ослабленный — при  $K_c = 1,6 \dots 2,5$ , сильно ослабленный — при  $K_c = 2,6 \dots 3,5$ , отмирающий — при  $K_c = 3,6 \dots 4,6$  и отмерший — при  $K_c = 4,6$  и выше.

Для изучения вариабельности химического состава листьев березы повислой и индивидуальной изменчивости было отобрано по 10 деревьев с каждой ПП в районе АО «Карабашмедь». Со всех деревьев взят образец листьев массой около 20 г, причем только с укороченных побегов, которые образуют основную часть полога у взрослых деревьев и имеют одинаковый возраст вследствие синхронного распускания листьев весной [27].

В листьях определяли содержание серы по методу ЦИНАО (1999) [28], тяжелых металлов — методом атомно-абсорбционной спектrophотометрии с помощью атомно-абсорбционного спектрофотометра novAA-300 (AnalyticJena, Германия).

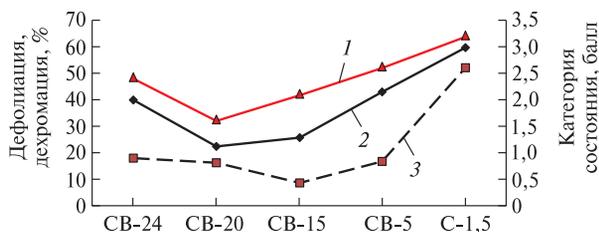
Для интерпретации полученных результатов использовали шкалу, из работы [17], в которой приведены нормальные (или достаточные)

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, избыточные (или токсичные): 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 системе STATISTICA V. 10 (StatSoft, Inc.). Для определения различий между пятью группами был использован однофакторный дисперсионный анализ (ANOVA) с последующим определением с помощью критерия Фишера. Зависимость содержания элементов в растениях от жизненного состояния деревьев проверялась с помощью параметрического коэффициента и корреляции  $r$  Пирсона. Результаты статистического анализа были оценены по уровню значимости 5 %.

## Результаты и обсуждение

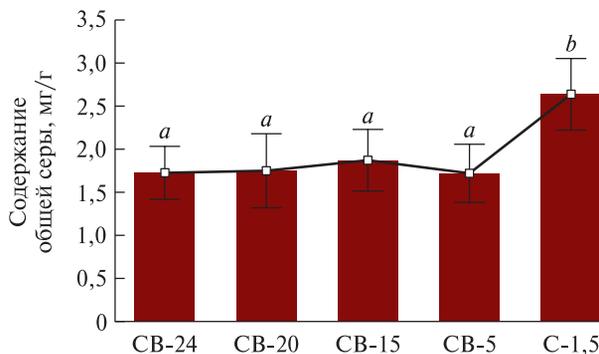
В районе исследования была проведена оценка жизненного состояния березовых древостоев, в частности на разном расстоянии от источника загрязнения — АО «Карабашмедь» (рис. 1).



**Рис. 1.** Характеристика пробных площадей на разном удалении от АО «Карабашмедь»: 1 — категория состояния; 2 — средняя дефолиация, %; 3 — средняя дехромация, %

**Fig. 1.** Characteristics of sample areas at different distances from Karabashmed JSC: 1 — condition category; 2 — average defoliation, %; 3 — average dechromation, %

Березовые леса, находящиеся ближе к источнику загрязнения (С-1,5), имеют наибольшую степень повреждения. Уровень дефолиации, дехромации и категории состояния на С-1,5 в 1,5...2 раза выше, чем на более удаленных от АО «Карабашмедь» ПП. Пробные площади, находящиеся на расстоянии 15...24 км, характеризуются наилучшим состоянием по сравнению с другими. Древостои на СВ-24, СВ-20, СВ-15 ослабленные ( $K_c = 2,4$ ,  $K_c = 1,6$ ,  $K_c = 2,1$  соответственно), на СВ-5 и С-1,5 — сильно ослабленные ( $K_c = 2,6$ ,  $K_c = 3,2$  соответственно). По этим данным можно сделать вывод о негативном воздействии КМК на березовые древостои, проявляющемся в увеличении дефолиации, дехромации и ухудшении категории состояния.



**Рис. 2.** Содержание серы в листьях березы повислой *B. pendula* на различном расстоянии от АО «Карабашмедь». Одинаковые буквы над столбцами обозначают отсутствие статистически значимых отличий между ПП,  $F$ -критерии Фишера при 5%-м уровне значимости,  $n = 15$ . Вертикальные линии на столбцах обозначают стандартное отклонение (SD), индивидуальную изменчивость по 15 деревьям

**Fig. 2.** Sulphur content in Silver birch leaves (*Betula pendula*) at different distances from Karabashmed JSC. Identical letters above the columns denote the absence of statistically significant differences between PPs, Fisher's  $F$ -criteria at 5% significance level,  $n = 15$ . Vertical lines on columns denote standard deviation (SD), individual variability of 15 trees

## Теснота связи (коэффициенты корреляции Пирсона) между содержанием элементов и жизненным состоянием березового древостоя в градиенте загрязнения АО «Карабашмедь»

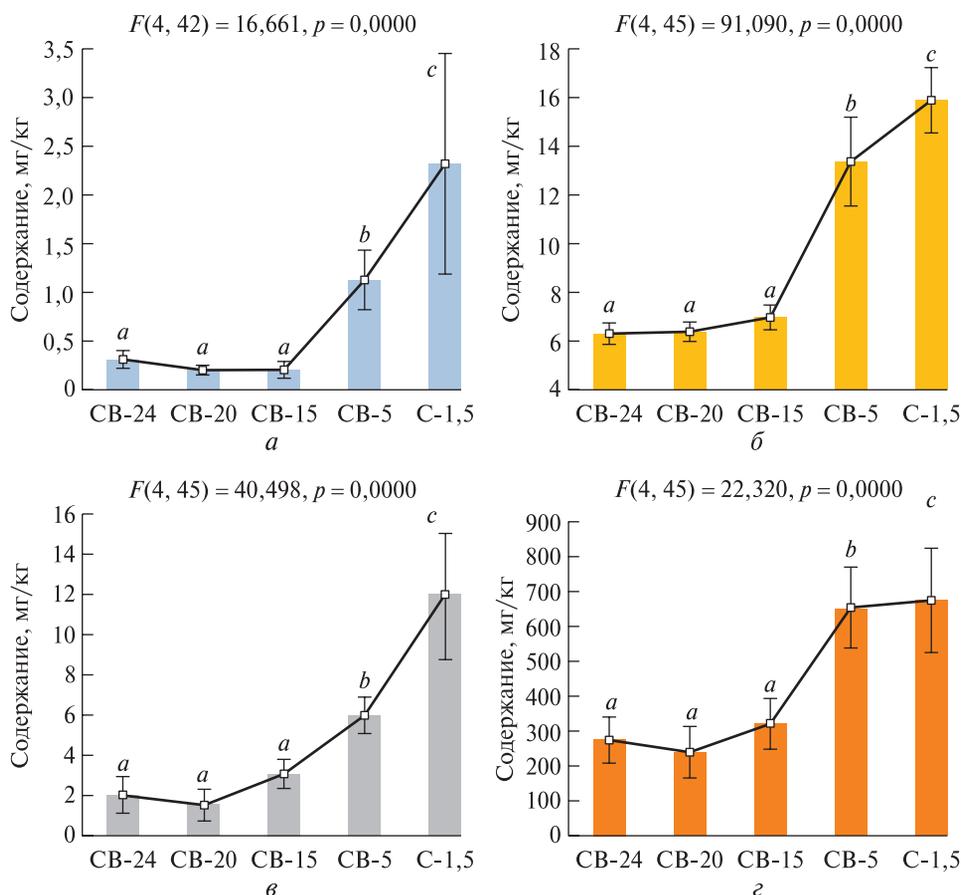
The relationship (Pearson correlation coefficients) between the elements content and the vital state of birch stands in the polluted area by Karabashmed JSC

Элементы	Дефолиация, %	Дехромация, %	Категория состояния, балл
Сера	0,18	<b>0,30</b>	0,21
Кадмий	0,59	0,46	0,58
Медь	0,62	0,59	0,59
Свинец	0,48	0,53	0,56
Цинк	0,54	0,41	0,49
Железо	<b>0,44</b>	0,23	<b>0,34</b>
Никель	<b>0,40</b>	0,04	<b>0,38</b>
Кобальт	0,019	0,00	0,05
Хром	0,22	-0,04	0,22

*Примечание.* Выделены статистически значимые коэффициенты корреляции ( $p < 0,05$ )

Установлено, что в листьях березы повислой содержание серы увеличивается на 35 % ( $p < 0,05$ ) на ПП, ближайшей к источнику загрязнения, по сравнению с другими ПП (рис. 2).

Получена положительная корреляция содержания серы с дехромацией листвы ( $r = 0,30$ ,  $p < 0,05$ ) (таблица), т. е. содержание серы увеличивается



**Рис. 3.** Содержание кадмия (а), меди (б), свинца (в) и цинка (з) в листьях березы повислой *B. pendula* на различном расстоянии от АО «Карабашмедь». Одинаковые буквы над столбцами обозначают отсутствие статистически значимых отличий между ПП, *F*-критерии Фишера при 5%-м уровне значимости,  $n = 15$ . Вертикальные линии на столбцах обозначают стандартное отклонение (*SD*), индивидуальную изменчивость по 15 деревьям

**Fig. 3.** Content of cadmium (a), copper (b), lead (v) and zinc (z) in *B. pendula* leaves at different distances from Karabashmed JSC. Identical letters above the columns denote the absence of statistically significant differences between PPs, Fisher's *F*-criteria at 5% significance level,  $n = 15$ . Vertical lines on columns denote standard deviation (*SD*), individual variability across 15 trees

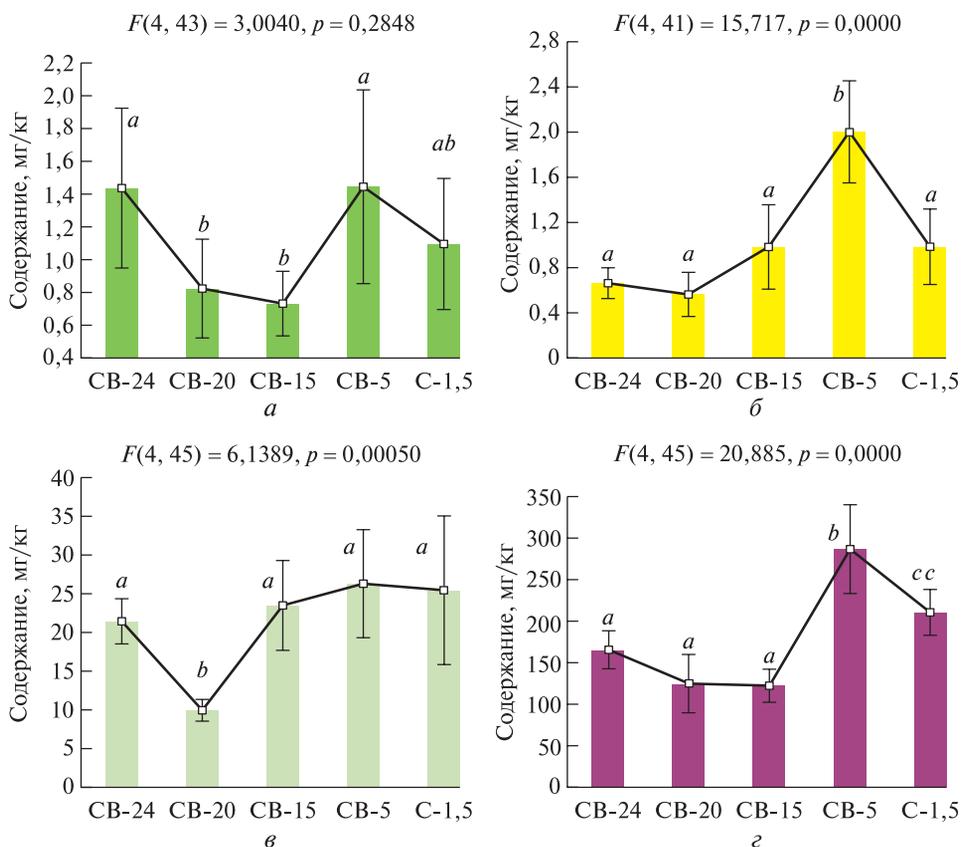
в листе поврежденных выбросами сернистого газа древостоях березы, что также визуально проявлялось в пожелтении листьев и, следовательно, увеличении дехромации. Сернистый ангидрид, подкисляя среду, повышает подвижность и биологическую активность ионов металлов, резко увеличивая их токсическое воздействие на биоту [28]. Поступление серы в ассимиляционный аппарат возможно как через атмосферу, так и из почвы, поскольку вблизи металлургического производства валовое содержание серы в почвах превышает ПДК в среднем в 2–8 раз [29].

Основными загрязнителями комбината наряду с диоксидом серы, являются также тяжелые металлы. Особенность токсического эффекта данных загрязнителей заключается в совместном действии, оказываемом на лесные экосистемы [30]. Береза характеризуется «нейтральной» адаптивной стратегией и средним адаптивным потен-

циалом [31]. Проведен анализ содержания тяжелых металлов в листьях березы повислой на разном удалении от АО «Карабашмедь» (рис. 3, см. рис. 2). В районе функционирования предприятия сформировалась техногенная среда с повышенным содержанием тяжелых металлов. По мере приближения к источнику загрязнения, увеличивается концентрация металлов в листьях березы. Повышена также концентрация кадмия, свинца, цинка, меди, хрома в листьях березы повислой ближайших к источнику загрязнения ПП. Тем не менее их концентрация не превышает токсичные значения, за исключением цинка и никеля — их содержание превышает токсичные концентрации на всех ПП.

Содержание цинка превышает токсичные значения (300...680 мг/кг) на всех ПП.

На расстоянии 15...24 км содержание цинка между ПП достоверно не изменяется и составляет около 300 мг/кг. На ПП, приближенных к источ-



**Рис. 4.** Содержание кобальта (а), хрома (б), никеля (в) и железа (г) в листьях березы повислой *B. pendula* на различном расстоянии АО «Карабашмедь». Одинаковые буквы над столбцами обозначают отсутствие статистически значимых отличий между ПП, *F*-критерии Фишера при 5%-м уровне значимости,  $n = 15$ . Вертикальные линии на столбцах обозначают стандартное отклонение (SD), индивидуальную изменчивость по 15 деревьям

**Fig. 4.** Content of cobalt (a), chromium (б), nickel (в) and iron (г) in leaves of *B. pendula* at different distances from Karabashmed JSC. Identical letters above the columns denote the absence of statistically significant differences between PPs, Fisher's *F*-criteria at 5% significance level,  $n = 15$ . Vertical lines on the columns denote standard deviation (SD), individual variability across 15 trees

нику загрязнения, содержание цинка в 4,3 раза выше нормальных концентраций и достигает 650...700 мг/кг. Виды *Betula* относят к растениям — концентраторам цинка [32], при этом листья по содержанию цинка могут служить биоиндикаторами, поскольку этот элемент концентрируется именно в случае техногенного загрязнения [33], а высокое его накопление свидетельствует об аэротехногенном загрязнении [34].

Содержание кадмия в листьях березы повислой на С-1,5 и СВ-5 составляет  $2,3 \pm 0,5$  мг/кг и  $1,1 \pm 0,1$  мг/кг соответственно, что выше нормальных концентраций этого микроэлемента в 11 раз на ПП, находящихся на расстоянии 1,5 км, и в 5,6 раза — на расстоянии 5 км. Содержание кадмия на более удаленных от КМК ПП достоверно не отличается ( $p < 0,05$ ) и не превышает нормальную концентрацию (0,2 мг/кг).

Содержание свинца на расстоянии 5...24 км от КМК составляет менее 10 мг/кг, что не превышает нормальные концентрации. На С-1,5 содержа-

ние свинца незначительно выше —  $12 \pm 1,3$  мг/кг. В лесной подстилке и гумусо-аккумулятивном почвенном горизонте происходит накопление таких тяжелых металлов, как медь, цинк, свинец, железо и кадмий, что прослеживается на расстоянии до 10 км от КМК. В фоновых условиях (24 км) содержание железа, цинка и меди в снежном покрове ниже на 95 %, чем вблизи от источника загрязнения. Установлено превышение содержания тяжелых металлов — кобальта, хрома, никеля и меди в березовых древостоях, как приближенных к источнику загрязнения, так и в более удаленных. Содержание кобальта в листьях на СВ-24 и СВ-5 превышает нормальные значения в 1,5 раза, хрома на СВ-15 и С-1,5 — в 2 раза, на СВ-5 — в 4 раза. Содержание никеля достигает токсичных концентраций на СВ-20 (более 10 мг/кг), на остальных ПП превышает токсичные концентрации в 2,5 раза.

Концентрация меди на удаленных ПП изменяется от  $6,3 \pm 0,2$  мг/кг до  $7 \pm 0,2$  мг/кг и не превышает нормальные значения (5...30 мг/кг).

На С-1,5 содержание меди составляет  $16 \pm 0,6$  мг/мг. Кадмий, никель, хром и кобальт, как правило, являются для березы повислой элементами слабого поглощения и среднего захвата [13].

Анализ связи содержания тяжелых металлов с жизненным состоянием деревьев выявил следующее (см. таблицу). Получена положительная корреляционная связь параметров жизненного состояния с содержанием поллютантов (коэффициенты корреляции на уровне 0,4...0,6). С ухудшением состояния березового древостоя, содержание тяжелых металлов в листьях увеличивается. Результаты корреляционного анализа показали наличие достоверных положительных связей между параметрами жизненного состояния и накоплением в листе кадмия ( $r = 0,46 \dots 0,58$ ), меди ( $r = 0,59 \dots 0,61$ ), свинца ( $r = 0,48 \dots 0,56$ ), цинка ( $r = 0,41 \dots 0,54$ ). Отмечается положительная корреляция дефолиации ( $r = 0,44$ ) и санитарного состояния ( $r = 0,34$ ) с содержанием железа и дефолиации ( $r = 0,40$ ) и санитарного состояния ( $r = 0,37$ ) с содержанием никеля. Содержание кобальта и хрома в листе не коррелирует с дефолиацией, дехромацией и санитарным состоянием древостоя.

## Выводы

Установлено комплексное негативное воздействие на березовые древостои на расстоянии до 5 км к северо-востоку от КМК. Воздействие на фотосинтетический аппарат происходит как через прямое влияние аэрополлютантов, в большей степени диоксида серы, а также через поступление тяжелых металлов и серы из почвы. Наибольшее влияние на растительность в зоне действия КМК оказывают диоксид серы, кадмий, свинец, медь и цинк. Выявленное ухудшение состояния березовых древостоев с увеличением содержания тяжелых металлов в листьях, подтверждает прямую корреляционную связь параметров жизненного состояния (дефолиация, дехромация и категория состояния) с содержанием тяжелых металлов и серы (коэффициенты корреляции 0,4...0,6). Полученные результаты свидетельствуют о связи содержания поллютантов в листьях берез с жизненным состоянием древостоя и позволяют прогнозировать деградацию древостоя при воздействии аэротехногенного загрязнения.

*Работа выполнена в рамках государственного задания Ботанического сада Уральского отделения Российской академии наук*

## Список литературы

- [1] Коротеева Е.В., Веселкин Д.В., Куянцева Н.Б., Мумбер А.Г., Чашина О.Е. Накопление тяжелых металлов в разных органах березы повислой возле Карабашского медеплавильного комбината // *Агрохимия*. 2015. № 3. С. 88–96
- [2] Шнейдмиллер Н.Ф., Мамедов Г.Р. Особенности развития малых городов России в условиях экологического кризиса на примере города Карабаш Челябинской области // *Вестник Кемеровского государственного университета*. Серия: Политические, социологические и экономические науки, 2018. № 3. С. 183–190. DOI:10.21603/2500-3372-2018-3-183-190
- [3] Доклад об экологической ситуации в Челябинской области в 2020 году. Челябинск: Изд-во Министерства экологии Челябинской области, 2021, 385 с.
- [4] Доклад об экологической ситуации в Челябинской области в 2014 году. Челябинск: Изд-во Министерства экологии Челябинской области, 2015, 204 с.
- [5] Синдирева А.В., Бурмирова А.С., Клименко В.В., Нуртазина В.К., Серeda М.С. Содержание цинка и меди в почвах национального парка «Таганай» (Южный урал) // *Социально-экологические технологии*, 2022. Т. 12. № 1. С. 43–61.
- [6] Shabanov M.V., Marichev M.S., Minkina T.M., Mandzhieva S.S., Nevidomskaya D.G. Assessment of the impact of industry-related air emission of arsenic in the soils of forest ecosystems // *Forests*, 2023, t. 14, no. 3, p. 632.
- [7] Тагирова О.В., Ольберг О.В. Оценка состояния березы повислой (*Betula pendula* Roth) в условиях загрязнения окружающей среды выбросами медеплавильного комбината г. Карабаш, Челябинская область // *Устойчивое развитие территорий: теория и практика*. Материалы II Междунар. науч.-практ. конф. Сибай: Издательский дом «Республика Башкортостан», 2021. С. 245–247.
- [8] Усольцев В.А., Мезенцев А.Т., Кох Е.В., Крудышев В.В., Лазарев И.С. О возможности использования унифицированных аллометрических уравнений фитомассы деревьев // *Вестник Алтайского государственного аграрного университета*, 2012. № 3 (89). С. 37–40.
- [9] Бачурина А.В. Влияние аэропромвыбросов ЗАО «Карабашмедь» на таксационные показатели и санитарное состояние сосновых и березовых древостоев // *Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии*, 2007. № 181. С. 35–40.
- [10] Глинских А.Д. Биогеохимические особенности сосняков лесостепи Челябинской области // *Экосистемы*, 2023. № 34. С. 30–35.
- [11] Ситников И.А., Шаихова Д.Р., Чукина Н.В., Киселева И.С. Влияние аэротехногенного загрязнения на фотосинтетический аппарат растений *Scorzonera glabra* Rupr // *Ученые записки Петрозаводского государственного университета*, 2016. № 8 (161). С. 84–90.
- [12] Ночевный А.Д., Тептина А.Ю. Анализ фертильности пыльцы в ценопопуляциях видов рода *Alyssum* L. на южном Урале // *Проблемы ботаники Южной Сибири и Монголии*, 2020. № 19–2. С. 325–330.
- [13] Бухарина, И.Л., Двоеглазова А.А. Биоэкологические особенности травянистых и древесных растений в городских насаждениях. Ижевск: Изд-во Удмуртского университета, 2010. 184 с.
- [14] Zavyalov K.E., Menshikov S.L., Mokhnachev P.E. Application of ameliorants for recultivation of technogenic-disturbed lands by aerotechnogenic emissions of magnesite production // *AIP Conference Proceedings*. 4th International Conference on Modern Synthetic Methodologies for Creating Drugs and Functional Materials, MOSM 2020. American Institute of Physics Inc., 2021, p. 040024.
- [15] Уразгильдин Р.В., Кулагин А.Ю. Развитие классификации адаптивных стратегий растительности применительно к древесным видам и техногенезу и оценка на ее основе лесообразователей предруралья // *Известия Уфимского научного центра РАН*, 2017. № 4–1. С. 126–130.
- [16] Fernandes, J.C., Henriques F.S. Biochemical, physiological, and structural effect of excess copper in plants // *The Botanical Rev*, 1991, v. 57, no. 3, pp. 246–254.

- [17] Кабата-Пендиас А., Пендиас Х. Микроэлементы в почвах и растениях / Пер. с англ. М.: Мир, 1989. 439 с.
- [18] Кузнецова Т.Ю., Ветчинникова Л.В., Титов А.Ф. Аккумуляция тяжелых металлов в различных органах и тканях березы в зависимости от условий произрастания // Труды Карельского научного центра РАН, 2015. № 1. С. 86–94. DOI:10.17076/eco27
- [19] Clemens S. Molecular mechanisms of plant metal tolerance and homeostasis // *Planta*, 2001, v. 212, pp. 475–486.
- [20] Кузнецов В.В., Дмитриева Г.А. Физиология растений. М.: Высшая школа, 2006. 742 с.
- [21] Титов А.Ф. Устойчивость растений к тяжелым металлам. Петрозаводск: Изд-во КарНЦ РАН, 2007. 172 с.
- [22] Дзугаев М.Д. Карабаш — город «экологического бедствия» // Вестник Челябинского государственного университета. Серия: Право, 2003. № 2(6). С. 92–97.
- [23] Залесов С.В., Бачурина А.В., Бачурина С.В. Состояние лесных насаждений, подверженных влиянию промышленных поллютантов ЗАО «Карабашмедь», и реакция их компонентов на проведение рубок обновления. Екатеринбург: УГЛТУ, 2017. 277 с.
- [24] Калабин Г.В., Титова А.В., Шаров А.В. Модернизация медеплавильного производства комбината ЗАО «Карабашмедь» и динамика состояния природной среды в зоне его влияния // Маркшейдерия и недропользование, 2011. № 3 (53). С. 65–70.
- [25] Методика организации и проведения работ по наблюдению за лесами в европейской части России в рамках программы ИКП-Леса (методика ЕКО ООН). М.: Федеральная служба лесного хозяйства России, 1995. 42 с.
- [26] Ковалев Б.И. Состояние заподоченных сосновых лесов // Лесное хозяйство, 1993. № 5. С. 35–38.
- [27] Macdonald A.D., Mothersill D.H. Shoot development in *Betula papyrifera*. I. Short-shoot organogenesis // *Can. J. Bot.*, 1983, pp. 3049–3065.
- [28] Воробейчик Е.Л., Хантемирова Е.В. Реакция лесных фитоценозов на техногенное загрязнение: зависимость доза-эффект // *Экология*, 1994. № 3. С. 31–43.
- [29] Шабанов М.В. Сера в геохимически сопряженных ландшафтах Соймоновской долины Челябинской области // Известия УГТУ, 2021. Вып. 1 (61). С. 118–126. DOI 10.21440/2307-2091-2021-1-118-126
- [30] Менщиков С.Л., Ившин А.П. Закономерности трансформации предтундровых и таежных лесов в условиях аэротехногенного загрязнения. Екатеринбург, 2006. 294 с.
- [31] Urazgildin R.V., Kulagin A.Yu. Damage, adaptations, and strategies of tree species in technogenesis conditions: structural and functional levels of realization of adaptive potential // *Biology Bulletin Reviews*, 2022, t. 12, no. 4, pp. 441–457.
- [32] Цандекова О.Л. Аккумулирующая способность листьев древесных растений в условиях породного отвала кедровского угольного разреза // Бюллетень науки и практики, 2016. № 8 (9). С. 39–43.
- [33] Zakrzewska M., Klimek B. Trace Element Concentrations in Tree Leaves and Lichen Collected Along a Metal Pollution Gradient Near Olkusz (Southern Poland) // *Bull. Environ. Contam. Toxicol.*, 2017, no. 100(2), pp. 245–249.
- [34] Kosiorek M., Modrzewska B., Wyszkowski M. Levels of selected trace elements in Scots pine (*Pinus sylvestris* L.), silver birch (*Betula pendula* L.), and Norway maple (*Acer platanoides* L.) in an urbanized environment // *Environ. Monit. Assess.*, 2016, no. 188(10), p. 598.

## Сведения об авторах

**Горбунова Виктория Дмитриевна**  — канд. биол. наук, науч. сотр. лаборатории техногенных растительных сообществ, ФГБУН «Ботанический сад УрО РАН», botgarden.gor@yandex.ru

**Менщиков Сергей Леонидович** — д-р с.х. наук, вед. науч. сотр. лаборатории техногенных растительных сообществ, ФГБУН «Ботанический сад УрО РАН», msl@botgard.uran.ru

Поступила в редакцию 07.03.2024.

Одобрено после рецензирования 15.07.2024.

Принята к публикации 05.09.2024.

## CONNECTION BETWEEN POLLUTANT CONTENT IN SILVER BIRCH LEAVES AND STAND VITAL STATE AT JSC «KARABASHMED»

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

Botanical Garden of the Ural Branch of the RAS, 202a, 8 Marta st., 620144, Yekaterinburg, Russia

botgarden.gor@yandex.ru

The paper analyzes the connection between the pollutants content (sulfur and heavy metals) in birch leaves and the vital state of the stand. It was found that metals such as cadmium, lead, copper and zinc have the greatest influence on the state of stands in the operating area of Karabashmed JSC. A positive correlation between the parameters of the vital state (defoliation, dechromation and the category of the state) and the content of these trace elements (correlation coefficients greater than 0,4...0,6) was revealed. An increase in the concentration of such heavy metals as cadmium, lead, zinc, copper and chromium in birch leaves in the trial plots closest to the pollution emission source by JSC «Karabashmed» was found.

**Keywords:** silver birch, heavy metals, aerotechnogenic emissions

**Suggested citation:** Gorbunova V.D., Menshchikov S.L. *Svyaz' sodержaniya pollyutantov v list'yakh berezy povisloy s zhiznennym sostoyaniem drevostoya na primere AO «Karabashmed'»* [Connection between pollutant content in silver birch leaves and stand vital state at JSC «Karabashmed»]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2024, vol. 28, no. 5, pp. 129–137. DOI: 10.18698/2542-1468-2024-5-129-137

## References

- [1] Koroteeva E.V., Veselkin D.V., Kuyantseva N.B., Mumber A.G., Chashchina O.E. *Nakoplenie tyazhelykh metallov v raznykh organakh berezy povisloy vozle Karabashskogo medeplavil'nogo kombinata* [Accumulation of heavy metals in different organs of silver birch near the Karabash copper smelter]. *Agrokhimiya* [Agrochemistry], 2015, no. 3, pp. 88–96.
- [2] Shneydmiller N.F., Mamedov G.R. *Osobennosti razvitiya malykh gorodov Rossii v usloviyakh ekologicheskogo krizisa na primere goroda Karabash Chelyabinskoy oblasti* [Features of the development of small towns in Russia in conditions of environmental crisis using the example of the city of Karabash in the Chelyabinsk region]. *Vestnik Kemerovskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Politicheskie, sotsiologicheskie i ekonomicheskie nauki* [Bulletin of Kemerovo State University. Series: Political, sociological and economic sciences], 2018, no. 3, pp. 183–190. DOI:10.21603/2500-3372-2018-3-183-190
- [3] *Doklad ob ekologicheskoy situatsii v Chelyabinskoy oblasti v 2020 godu* [Report on the environmental situation in the Chelyabinsk region in 2020]. Chelyabinsk: Ministry of Ecology of the Chelyabinsk Region, 2021, 385 p.
- [4] *Doklad ob ekologicheskoy situatsii v Chelyabinskoy oblasti v 2014 godu* [Report on the environmental situation in the Chelyabinsk region in 2014]. Chelyabinsk: Ministry of Ecology of the Chelyabinsk Region, 2015, 204 p.
- [5] Sindireva A.V., Burmistrova A.S., Klimenko V.V., Nurtazina V.K., Sereda M.S. *Soderzhanie tsinka i medi v pochvakh natsional'nogo parka «Taganay» (Yuzhnyy ural)* [The content of zinc and copper in the soils of the Taganay National Park (Southern Urals)]. *Sotsial'no-ekologicheskoe tekhnologii* [Social and environmental technologies], 2022, t. 12, no. 1, pp. 43–61.
- [6] Shabanov M.V., Marichev M.S., Minkina T.M., Mandzhieva S.S., Nevidomskaya D.G. Assessment of the impact of industry-related air emission of arsenic in the soils of forest ecosystems. *Forests*, 2023, t. 14, no. 3, p. 632.
- [7] Tagirova O.V., Ol'berg O.V. *Otsenka sostoyaniya berezy povisloy (Betula pendula Roth) v usloviyakh zagryazneniya okruzhayushchey sredy vybrosami medeplavil'nogo kombinata g. Karabash, Chelyabinskaya oblast'* [Assessment of the condition of silver birch (*Betula pendula* Roth) in conditions of environmental pollution by emissions from the Karabash copper smelter, Chelyabinsk Region]. *Ustoychivoe razvitiye territoriy: teoriya i praktika. Materialy II Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii. Sibay: Sibayskiy informatsionnyy tsentr — filial GUP RB Izdatel'skiy dom «Respublika Bashkortostan»* [Sustainable development of territories: theory and practice. Materials of the II International Scientific and Practical Conference]. Sibay: Sibay Information Center — branch of the State Unitary Enterprise of the Republic of Belarus Publishing House «Republic of Bashkortostan», 2021, pp. 245–247.
- [8] Usol'tsev V.A., Mezentsev A.T., Kokh E.V., Krudyshev V.V., Lazarev I.S. *O vozmozhnosti ispol'zovaniya unifikirovannykh allometricheskikh uravneniy fitomassy derev'ev* [On the possibility of using unified allometric equations of phytomass of trees]. *Vestnik Altayskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta* [Bulletin of the Altai State Agrarian University], 2012, no. 3(89), pp. 37–40.
- [9] Bachurina A.V. *Vliyaniye aeropromvybrosov ZAO «Karabashmed'» na taksatsionnyye pokazateli i sanitarnoe sostoyaniye sosnovykh i berezovykh drevostoev* [The influence of aeroprom emissions of Karabashmed CJSC on the taxation indicators and sanitary condition of pine and birch stands]. *Izvestiya Sankt-Peterburgskoy lesotekhnicheskoy akademii* [Bulletin of the St. Petersburg Forest Engineering Academy], 2007, no. 181, pp. 35–40.
- [10] Glinkikh A.D. *Biogekhimicheskie osobennosti sosnyakov lesostepi chelyabinskoy oblasti* [Biogeochemical features of pine forests in the forest-steppe of the Chelyabinsk region]. *Ekosistemy* [Ecosystems], 2023, no. 34, pp. 30–35.
- [11] Sitnikov I.A., Shaikhova D.R., Chukina N.V., Kiseleva I.S. *Vliyaniye aerotekhnogenogo zagryazneniya na fotosinteticheskiy apparat rasteniy Scorzonera glabra Rupr* [The influence of aerotechnogenic pollution on the photosynthetic apparatus of plants *Scorzonera glabra* Rupr]. *Uchenye zapiski Petrozavodskogo gosudarstvennogo universiteta* [Scientific notes of Petrozavodsk State University], 2016, no. 8 (161), pp. 84–90.
- [12] Nochevnyy A.D., Teptina A.Yu. *Analiz fertil'nosti pyl'tsy v tsenopopulyatsiyakh vidov roda Alyssum L. na yuzhnom Urale* [Analysis of pollen fertility in cenopopulations of species of the genus *Alyssum* L. in the southern Urals]. *Problemy botaniki Yuzhnoy Sibiri i Mongolii* [Problems of Botany of Southern Siberia and Mongolia], 2020, no. 19–2, pp. 325–330.
- [13] Bukharina, I.L., Dvoeglazova A.A. *Bioekologicheskoe osobennosti travyanistykh i drevesnykh rasteniy v gorodskikh nasazhdeniyakh* [Bioecological features of herbaceous and woody plants in urban plantings]. Izhevsk: Udmurt University Publishing House, 2010, 184 p.
- [14] Zavalov K.E., Menschikov S.L., Mokhnachev P.E. Application of ameliorants for recultivation of technogenic-disturbed lands by aerotechnogenic emissions of magnesite production. AIP Conference Proceedings. 4th International Conference on Modern Synthetic Methodologies for Creating Drugs and Functional Materials, MOSM 2020. American Institute of Physics Inc., 2021, p. 040024.
- [15] Urazgil'din R.V., Kulagin A.Yu. *Razvitiye klassifikatsii adaptivnykh strategiy rastitel'nosti primenitel'no k drevesnym vidam i tekhnogenezu i otsenka na ee osnove lesoobrazovateley predural'ya* [Development of classification of adaptive vegetation strategies in relation to woody species and technogenesis and assessment on its basis of forest growers of the Urals]. *Izvestiya Ufimskogo nauchnogo tsentra RAN* [Proceedings of the Ufa Scientific Center of the Russian Academy of Sciences], 2017, no. 4–1, pp. 126–130.
- [16] Fernandes, J.C., Henriques F.S. Biochemical, physiological, and structural effect of excess copper in plants. *The Botanical Rev*, 1991, v. 57, no. 3, pp. 246–254.
- [17] Kabata-Pendias A., Pendias X. *Mikroelementy v pochvakh i rasteniyakh* [Microelements in soils and plants]. Moscow: Mir, 1989, 439 p.
- [18] Kuznecova T.Yu., Vetchinnikova L.V., Titov A.F. *Akkumulyatsiya tyazhelykh metallov v razlichnykh organakh i tkanyakh berezy v zavisimosti ot usloviy proizvodstva* [Accumulation of heavy metals in various organs and tissues of birch depending on growing condition] // *Trudy Karel'skogo nauchnogo tsentra RAN*, 2015. № 1. S. 86–94. DOI:10.17076/eco27
- [19] Clemens S. Molecular mechanisms of plant metal tolerance and homeostasis. *Planta*, 2001, v. 212, pp. 475–486.
- [20] Kuznetsov V.V., Dmitrieva G.A. *Fiziologiya rasteniy* [Physiology of plants]. Moscow: Higher School, 2006, 742 p.
- [21] Titov A.F. *Ustoychivost' rasteniy k tyazhelym metallam* [Plant resistance to heavy metals]. Petrozavodsk: Publishing house KarRC RAS, 2007, 172 p.

- [22] Dzugaev M.D. *Karabash — gorod «ekologicheskogo bedstviya»* [Karabash is a city of «ecological disaster»]. Vestnik Chelyabinskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Pravo [Bulletin of Chelyabinsk State University. Series: Law], 2003, no. 2(6), pp. 92–97.
- [23] Zalesov S.V., Bachurina A.V., Bachurina S.V. *Sostoyaniye lesnykh nasazhdeniy, podverzhennykh vliyaniyu promyshlennykh pollyutantov ZAO «Karabashmed», i reaktsiya ikh komponentov na provedeniye rubok obnovleniya* [The state of forest plantations exposed to the influence of industrial pollutants of JSC «Karabashmed», and the reaction of their components to renewal felling]. Ekaterinburg: UGFLTU, 2017, 277 p.
- [24] Kalabin G.V., Titova A.V., Sharov A.V. *Modernizatsiya medeplavil'nogo proizvodstva kombinata ZAO «Karabashmed» i dinamika sostoyaniya prirodnoy sredy v zone ego vliyaniya* [Modernization of copper smelting production at the Karabashmed CJSC plant and the dynamics of the state of the natural environment in the zone of its influence]. Marksheyderiya i nedropol'zovanie [Mine surveying and subsoil use], 2011, no. 3 (53), pp. 65–70.
- [25] *Metodika organizatsii i provedeniya rabot po nablyudeniyu za lesami v evropeyskoy chasti Rossii v ramkakh programmy ICP-Lesa (metodika EKO OON)* [Methodology for organizing and conducting forest monitoring work in the European part of Russia within the framework of the ICP-Forests program (UNECF methodology)]. Moscow: Federal Forestry Service of Russia, 1995, 42 p.
- [26] Kovalev B.I. *Sostoyaniye zapodsochennykh sosnovykh lesov* [The state of weeded pine forests]. Lesnoe khozyaystvo [Forestry], 1993, no. 5, pp. 35–38.
- [27] Macdonald A.D., Mothersill D.H. Shoot development in *Betula papyrifera*. I. Short-shoot organogenesis. Can. J. Bot., 1983, pp. 3049–3065.
- [28] Vorobeychik E.L., Khantemirova E.V. *Reaktsiya lesnykh fitotsenozov na tekhnogennoye zagryazneniye: zavisimosti doza-effekt* [Response of forest phytocenoses to technogenic pollution: dose-effect dependencies]. Ekologiya [Ecology], 1994, no. 3, pp. 31–43.
- [29] Shabanov M.V. *Sera v geokhimicheski sopryazhennykh landshaftakh Coymonovskoy doliny Chelyabinskoy oblasti* [Sulfur in geochemically related landscapes of the Soymonovskaya valley of the Chelyabinsk region]. Izvestiya UGGU [News of the USGU], 2021, v. 1 (61), pp. 118–126. DOI 10.21440/2307-2091-2021-1-118-126
- [30] Menshchikov S.L., Ivshin A.P. *Zakonomernosti transformatsii predtundrovyykh i taezhnykh lesov v usloviyakh aerotekhnogennoy zagryazneniya* [Patterns of transformation of pre-tundra and taiga forests under conditions of aerotechnogenic pollution]. Ekaterinburg: Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, 2006, 294 p.
- [31] Urazgildin R.V., Kulagin A.Yu. Damage, adaptations, and strategies of tree species in technogenesis conditions: structural and functional levels of realization of adaptive potential. Biology Bulletin Reviews, 2022, t. 12, no. 4, pp. 441–457.
- [32] Tsandekova O.L. *Akkumuliruyushchaya sposobnost' list'ev drevesnykh rasteniy v usloviyakh porodnogo otvala kedrovskogo ugol'nogo razreza* [Accumulating capacity of leaves of woody plants in the conditions of the waste dump of the Kedrovsky coal mine]. Byulleten' nauki i praktiki [Bulletin of Science and practice], 2016, no. 8 (9), pp. 39–43.
- [33] Zakrzewska M., Klimek B. Trace Element Concentrations in Tree Leaves and Lichen Collected Along a Metal Pollution Gradient Near Olkusz (Southern Poland). Bull. Environ. Contam. Toxicol., 2017, no. 100(2), pp. 245–249.
- [34] Kosiorek M., Modrzewska B., Wyszowski M. Levels of selected trace elements in Scots pine (*Pinus sylvestris* L.), silver birch (*Betula pendula* L.), and Norway maple (*Acer platanoides* L.) in an urbanized environment. Environ. Monit. Assess., 2016, no. 188(10), p. 598.

*The work was carried out under the state assignment of the Botanical Garden of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences.*

## Authors' information

**Gorbunova Viktoria Dmitrievna**  — Cand. Sci. (Biology), Researcher of the Laboratory of Technogenic Plant Communities of the Botanical Garden of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, botgarden.gor@yandex.ru

**Menshchikov Sergey Leonidovich** — Dr. Sci. (Agriculture), Leading Researcher of the Laboratory of Technogenic Plant Communities of the Botanical Garden of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, msl@botgard.uran.ru

Received 07.03.2024.

Approved after review 15.07.2024.

Accepted for publication 05.09.2024.

Вклад авторов: все авторы в равной доле участвовали в написании статьи  
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов  
Authors' Contribution: All authors contributed equally to the writing of the article  
The authors declare that there is no conflict of interest