

МАКРОЭЛЕМЕНТНЫЙ СОСТАВ ЛИСТЬЕВ БЕРЕЗЫ ПОВИСЛОЙ (*BETULA PENDULA* ROTH) В ГРАДИЕНТЕ АЭРОТЕХНОГЕННОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ 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

Установлена зависимость содержания макроэлементов (азота, фосфора, калия, магния, кальция, серы) в листьях березы повислой (*Betula pendula* Roth) от жизненного состояния древостоя в градиенте аэротехногенных выбросов АО «Карабашмедь». Изучено изменение их содержания и рассчитано суммарное содержание азота, фосфора и калия (НРК) в листьях березы повислой на разном удалении от этого комбината. Определено снижение общего содержания макроэлементов в листьях березы повислой при загрязненности воздуха диоксидом серы. Выявлено сильное повреждение листьев березы диоксидом серы в зоне поражения древостоев от выбросов АО «Карабашмедь», на что указывает повышенная концентрация серы в листьях — в полтора раза больше, чем на других пробных площадях. Установлено ухудшение жизненного состояния древостоя (степень дефолиации и дехромации выше в 1,5–2 раза, ухудшение санитарного состояния в 1,5 раза). Определено увеличение дехромации листовой, уменьшение содержания калия, увеличение содержания серы; снижение содержания азота, фосфора и натрия с увеличением дефолиации. Установлено, что содержание кальция и магния не связано с дефолиацией, дехромацией и категорией состояния дерева.

Ключевые слова: береза повислая, макроэлементы, аэротехногенные выбросы

Ссылка для цитирования: Горбунова В.Д., Менщиков С.Л. Макроэлементный состав листьев березы повислой (*Betula pendula* Roth) в градиенте аэротехногенного загрязнения АО «Карабашмедь» // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2023. Т. 27. № 5. С. 170–178. DOI: 10.18698/2542-1468-2023-5-170-178

Концентрация питательных элементов в ассимиляционных органах является одним из критериев оценки влияния аэротехногенного загрязнения, состояния лесных экосистем и питательного обеспечения древесных видов. Анализ химического состава ассимилирующих органов позволяет выявить дисбаланс питания в лесных экосистемах при недостатке или избытке необходимых питательных элементов в почве. Изменения концентрации питательных элементов в ассимилирующих органах можно использовать для мониторинга состояния лесных биогеоценозов, оценки влияния антропогенного загрязнения на них и выявления особенностей питательного режима деревьев [1–6].

Лесные экосистемы, находящиеся вблизи АО «Карабашмедь» [7–11], а также почвы [12–14] служили объектами исследований в течение многих десятилетий. Предприятия по производству меди признаются основными источниками техногенного загрязнения, в частности в окрестностях г. Карабаша. Газообразные отходы этих предприятий, состоящие из сернистого газа на 98 %, обуславливают кислотное загрязнение атмосферного воздуха. Эти территории характеризуются

огромным накопленным экологическим ущербом. Содержание в почвах соединений таких металлов, как медь, цинк, свинец, мышьяк, кадмий, ртуть, в 3–25 раз выше по сравнению с контрольными образцами почв из незагрязненных площадей [8]. Согласно литературным данным [15] содержание меди выше фоновых значений в 404 раза, кадмия — в 233, цинка — в 68, кобальта и никеля — в 2–3 раза. Исследования показали [14], что концентрация цинка и мышьяка в почвенном слое толщиной от 0 до 5 см на участках мониторинга превышает литосферные показатели в сотни раз, а содержание меди, свинца и хрома превышает их литосферные показатели в десятки раз. Концентрация ртути в почве выше предельно допустимых показателей в 2 раза, мышьяка — в 279 раз, меди — в 368, свинца — в 300, кадмия — в 5,2, цинка — в 3,8 раза [12]. Ранее, на 1 т черновой меди, выплавленной на предприятии до 1974 года, приходилось более 7 т выбросов в атмосферу, а к 2018 г. этот показатель снизился до 3,75 т [16].

Использование березы повислой широко распространено в различных климатических условиях. Поскольку этот вид хорошо приспособляется к неблагоприятным факторам, особенно к загрязнению атмосферного воздуха и почв [17],

характеризуется особенностями в потреблении химических элементов. Листья березы аккумулируют медь, никель и марганец интенсивнее, чем хвоя ели или сосны [18, 19]. Береза повислая имеет важное значение в восстановлении растительности, особенно на загрязненных участках [20], и способствует повышению устойчивости лесов, заселяясь на лесные прогалины, увеличению питательности почвы и биоразнообразию [21]. Сравнение содержания макро- и микроэлементов в листьях разных форм березы повислой показало, что соотношение потребления и закрепления в листе макроэлементов устойчиво и не зависит от загрязненности почв [22]. Популяции *B. pendula*, произрастающие на постиндустриальных пустошах, представляют собой различные морфотипы с более низкими значениями почти всех репродуктивных признаков по сравнению с популяцией березы из незагрязненных территорий [23].

Состояние березовых древостоев в районе действия АО «Карабашмедь» оценивалось с помощью методов флуктуирующей асимметрии листовых пластинок [24] и интегрального показателя стабильности развития [25]. В условиях атмосферного загрязнения у березы повислой отмечалось снижение накопления биомассы фотосинтезирующего аппарата и прироста годичных побегов [26], радиального прироста ствольной древесины [27], количества хлорофилла а и b и изменение соотношения хлорофиллов а/b [28–30].

Современное состояние зоны действия АО «Карабашмедь», обуславливает необходимость изучения лесных экосистем в ее пределах. Мониторинг лесов и сбор фактических данных способствуют развитию устойчивого лесопользования и защиты лесов. Поскольку защита лесов от негативных биотических и абиотических факторов отнесена к одному из приоритетов лесной политики, информация о состоянии лесов в России определяется как актуальная.

Концентрация элементов (питательных веществ) и их соотношение в листе показывают питательный статус дерева с точки зрения их дефицита или избытка. Содержание питательных веществ в листе деревьев отражает влияние атмосферы и почвы на состояние древостоя, является важной частью Международной совместной программы комплексного мониторинга воздействий загрязнения воздуха на экосистемы в реализации которых принимает участие Российская Федерация.

Тем не менее, макроэлементный состав листьев березы повислой, обеспечивающий основные метаболические процессы и формирующий жизнедеятельность вида, изучен недостаточно.

Цель работы

Цель работы — изучение влияния загрязнения атмосферного воздуха на состояние лесных экосистем с помощью оценки жизненного состояния (используя показатели дефолиации, дехромации, санитарного состояния) деревьев березы повислой (*Betula pendula* Roth) и макроэлементного (азот, фосфор, калий, магний, кальций, сера) состава листьев.

Объекты и методы исследования

Объектами исследования являются естественные древостои березы повислой (*Betula pendula* Roth), произрастающие в условиях воздействия выбросов АО «Карабашмедь», расположенного в естественной депрессии — Саймоновской долине. Здесь преобладают северо-, юго-западное и западное направления ветра. Годовая сумма осадков составляет 400 мм, в морозный период (ноябрь–декабрь) — 90 мм, безморозный (апрель–октябрь) — 300 мм [31].

Почвенный профиль характеризуется каменистостью и низкой мощностью [32]. Водоемы сильно загрязнены вследствие сброса отходов в пойму р. Сак-Элга [33]. В результате работы АО «Карабашмедь» и других горнорудных предприятий на территории, прилегающей к г. Карабаш образовался большой объем различных химических элементов I–III классов опасности — кадмия, хрома, меди, цинка, железа, мышьяка, свинца и др. Эти элементы в сотни раз превышают предельно допустимые санитарные нормы, установленные в Российской Федерации [16]. В 2000 г. содержание диоксида серы в воздухе в подфакельной зоне комбината на расстоянии 1 км составляло 20 000 мг/м³ [34].

На разной удаленности от источника эмиссии были выбраны загрязненные и условно чистые участки березового древостоя — С-1,5, СВ-5, СВ-15, СВ-20 и СВ-24 (буквы обозначают направление, числа — расстояние от источника загрязнения до временной пробной площади (ВПП) в километрах). Всего было заложено пять ВПП на расстоянии от 1,5 до 24 км от комбината в северном и северо-восточном направлениях.

Для исследования состояния березовых древостоев использовался метод биоиндикации, основанный на учете повреждения деревьев по таким показателям, как дефолиация (потеря хвои и листья) и дехромация (изменение окраски) крон деревьев [35]. Модельные деревья были взяты из верхнего яруса древостоя.

Для изучения индивидуальной изменчивости брали образец листьев массой около 20 г с одного дерева. Всего было отобрано с 10 деревьев с каждой ВПП. Согласно литературным данным [36],

род береза имеет два типа побегов, однако в данном исследовании рассматриваются только листья с коротких побегов, поскольку они составляют основную часть кроны взрослых деревьев и характеризуются одинаковым возрастом благодаря синхронному раскрытию листьев весной.

В листьях определяли содержание общего азота, фосфора, калия, кальция, магния, натрия и серы. Общее содержание азота определяли по методу Кьельдаля с помощью автоматического анализатора азота UDK 152 (VELP scientifica, Italy). Содержание калия, кальция, магния, натрия и фосфора определяли из одной навески мокрым озолением в концентрированной серной кислоте с добавлением окислителей. После озоления, содержание калия, кальция и магния определяли с помощью атомно-абсорбционного спектрофотометра (novAA-300), содержание фосфора — спектрофотометрическим методом с молибденовой синью [37]. Содержание серы определяли по методу ЦИНАО (1999) [38].

Полученный материал был проанализирован с использованием пакета программ Microsoft Excel 2007 и метода статистического анализа в программе STATISTICA V. 10 (StatSoft, Inc.). Также применили однофакторный дисперсионный анализ (ANOVA) с последующим определением с помощью критерия Фишера (НЗР) различий между тремя группами и более. Зависимость содержания элементов в растениях от жизненного состояния дерева проверили с помощью параметрического корреляционного теста Пирсона. Результаты математических анализов оценивали по 5-процентному уровню значимости.

Результаты и обсуждение

Рассмотрим характеристики состояния березового древостоя на различном расстоянии от источника загрязнения АО «Карабашмедь» (табл. 1). Березовые древостои, которые находятся ближе к источнику загрязнения (С-1,5), характеризуются наибольшей поврежденностью. Наблюдается высокая степень дефолиации — 59,5 %, дехромации — 52 % и категория состояния — 3,2, что в 1,5–2 раза выше, чем в пределах более удаленных от источника загрязнения ВПП и достоверно отличается от этих показателей на остальных пробных площадях.

Проанализируем результаты корреляционного анализа содержания макроэлементов и состояния древостоя (табл. 2). С увеличением степени дехромации листьев содержание калия снижается ($r = -0,32$, $p < 0,05$), серы — увеличивается ($r = 0,30$, $p < 0,05$). При увеличении степени дефолиации и категории состояния наблюдается снижение содержания азота ($r = -0,50$ и $r = -0,48$

Т а б л и ц а 1

Характеристика березового древостоя Birch stands characteristics

Участок	Расстояние от источника загрязнения, км	Средняя дефолиация, %	Средняя дехромация, %	Категория состояния
С-1,5	1,5	59,5 ± 3,4	52 ± 4,5	3,2 ± 0,1
СВ-5	5	42,8 ± 6,1	16,7 ± 5,6	2,6 ± 0,2
СВ-15	15	25,6 ± 3,2	8,5 ± 2,6	2,1 ± 0,07
СВ-20	20	22 ± 2,5	16,1 ± 4,2	1,6 ± 0,07
СВ-24	24	39,5 ± 5,1	17,8 ± 2,8	2,4 ± 0,2

Т а б л и ц а 2

Связь (коэффициент корреляции Пирсона) содержания макроэлементов в листьях березы повислой и жизненного состояния дерева

Relationship (Pearson's correlation coefficient) between macronutrient content in Silver birch leaves and tree life condition

Параметры	Средняя дефолиация, %	Средняя дехромация, %	Категория состояния
Средняя дефолиация, %	1,00	0,61	0,85
Средняя дехромация, %	0,61	1,00	0,56
Категория состояния	0,85	0,56	1,00
Кальций	0,00	0,19	0,03
Калий	-0,18	-0,32	-0,25
Магний	-0,10	-0,27	-0,09
Азот	-0,50	-0,30	-0,48
Фосфор	-0,30	-0,18	-0,28
Сера	0,18	0,30	0,21
Азот + фосфор + калий	-0,46	-0,40	-0,46

Примечание. Выделены статистически значимые корреляции при $p < 0,05$

соответственно, $p < 0,05$) и фосфора ($r = -0,30$ и $r = -0,28$ соответственно, $p < 0,05$). Содержание кальция и магния не зависит от степени дефолиации, дехромации и категории состояния дерева ($p > 0,05$).

Таким образом, с увеличением дехромации листья содержание калия уменьшается, серы — увеличивается, с увеличением дефолиации содержание азота, фосфора и натрия снижается. Содержание кальция и магния не связано с дефолиацией, дехромацией и категорией состояния деревьев ($p > 0,05$).

Содержание общего азота в листьях варьирует между ВПП. Наименьшие значения в контрольных образцах составляют $21,2 \pm 0,9$ мг/г (СВ-24),

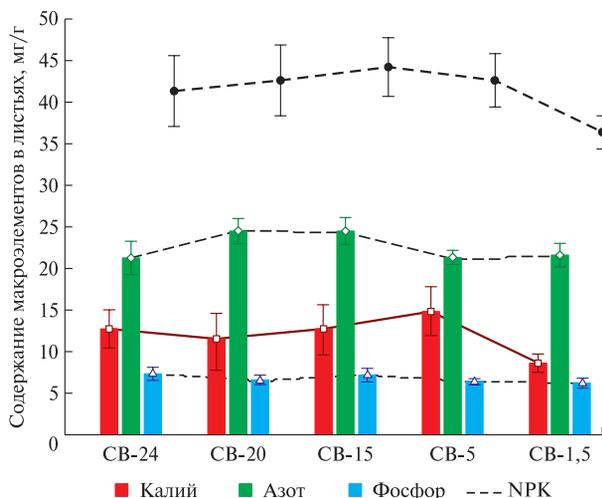


Рис. 1. Содержание азота, фосфора, калия, NPK в листьях березы повислой (*B. pendula*) на различном расстоянии от АО «Карабашмедь»; вертикальные линии обозначают стандартное отклонение (SD), индивидуальную изменчивость из 15 деревьев

Fig. 1. Nitrogen, phosphorus, potassium, NPK content in Silver birch leaves (*B. pendula*) at different distances from Karabashmed JSC; vertical lines denote standard deviation (SD), individual variability from 15 trees

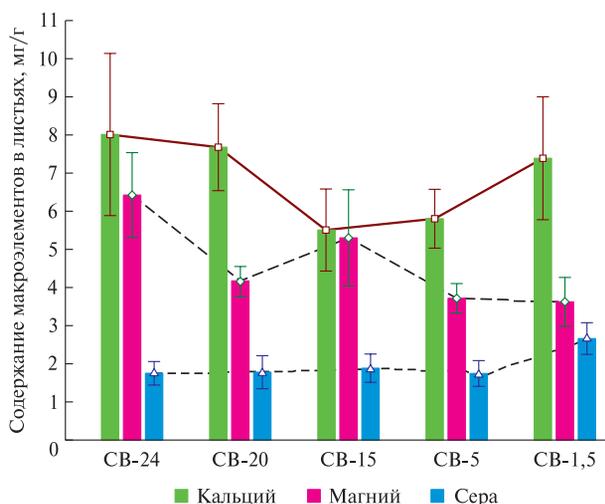


Рис. 2. Содержание кальция, магния и серы в листьях березы повислой (*B. pendula*) на различном расстоянии от АО «Карабашмедь»; вертикальные линии обозначают стандартное отклонение (SD), индивидуальную изменчивость из 15 деревьев

Fig. 2. Calcium, magnesium and sulphur content in Silver birch leaves (*B. pendula*) at different distances from Karabashmed JSC; vertical lines indicate standard deviation (SD), individual variability from 15 trees

в зонах приближенных к источнику выбросов — $21,4 \pm 0,6$ мг/г (СВ-1,5 и СВ-5) (рис. 1, 2). Содержание калия в листьях в зоне сильного загрязнения на участке СВ-1,5 снизилось на 35 % по сравнению с контрольными образцами и составило $8,7 \pm 0,5$ мг/г, достоверно отличаясь от участков

СВ-24, СВ-15 и СВ-5. Содержание фосфора в листьях снизилось на 15 % на ВПП, расположенных ближе к источнику загрязнения (участки СВ-5 и СВ-1,5) по сравнению с контрольными образцами (СВ-24) (см. рис. 1, 2), достоверно отличаясь от участков СВ-24 и СВ-15 ($p < 0,05$).

В ВПП, расположенной ближе к источнику загрязнения (СВ-1,5), в листьях березы повислой повышается содержание серы на 35 % ($p < 0,05$) по сравнению с другими ВПП, и составляет $2,65 \pm 0,18$ мг/г (см. рис. 1, 2). Также обнаружена положительная корреляция содержания серы с дехромацией листовой ($r = 0,30$, $p < 0,05$), т. е. содержание серы в листе увеличилось в поврежденных выбросами сернистого газа древостоях березы повислой, что также проявлялось визуально: листья пожелтели, следовательно, дехромация увеличилась.

Преобладающий элемент питания в листе — азот, на его долю приходится 22...24 мг/г, на втором месте — калий — 9...15, на долю фосфора — приходится 6,5...7, кальция — 5,5...8, магния — 3,6...6,4, серы — 1,7...2,7, натрия — 1,8...2,5 мг/г.

Параметр, отражающий жизненное состояние древостоя, — суммарное содержание биофильных элементов — NPK. На ВПП, наиболее поврежденной диоксидом серы (СВ-1,5), концентрация биофильных элементов на 16 % ниже и достоверно отличается от других ВПП. Кроме того, этот параметр зависит от жизненного состояния древостоя — обнаружена отрицательная взаимосвязь со степенью дефолиации (–46 %), дехромацией (–40 %) и категорией состояния (–46 %), содержание биофильных элементов уменьшается с увеличением дефолиации, дехромацией и ухудшением санитарного состояния (см. табл. 2).

Таким образом, изученные макроэлементы можно разделить на две группы: 1) не связанные с жизненным состоянием дерева, это кальций и магний, на содержание которых в листьях влияет только расстояние от произрастания до источника загрязнения; 2) связанные с жизненным состоянием дерева — калий, азот, фосфор, сера, NPK, на содержание которых в листьях влияют расстояние от произрастания до источника выбросов и жизненное состояние древостоя.

Выводы

Общее содержание макроэлементов в листьях березы повислой снизилось вследствие загрязнения атмосферного воздуха диоксидом серы, хотя общее содержание азота существенно не изменилось, содержание калия и фосфора также уменьшилось. Концентрация серы в листьях березы в зоне поражения АО «Карабашмедь» в 1,5 раза больше, чем на других ВПП, хуже жизненное

состояние древостоя — степень дефолиации и дехромации выше в 1,5–2 раза, а санитарное состояние — в 1,5 раза. Это указывает на сильное повреждение листьев березы повислой диоксидом серы. Загрязняющие факторы — выбросы автотранспорта, промышленные выбросы, световое загрязнение, по литературным данным [39] приводят к снижению содержания основных групп биологически активных веществ в листьях берез. Наличие диоксида серы в атмосферном воздухе ухудшает жизненное состояние древостоя березы повислой и отражается на химическом составе листьев — общее содержание биофильных элементов меньше необходимого.

Изученные макроэлементы разделены на две группы: 1) кальций и магний; 2) калий, азот, фосфор, сера и NPK. Достоверная связь между уровнем загрязнения и расстоянием от произрастания до источника эмиссии на территории импактной зоны отсутствует [40]. С помощью дисперсионного и корреляционного анализов установлено, что снижение содержания NPK может свидетельствовать о негативном воздействии техногенного загрязнения на березовый древостой. Ухудшение жизненного состояния древостоя березы повислой также может служить одним из диагностических признаков снижения содержания NPK в листьях берез.

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

Список литературы

- [1] Ильин В.Б. Тяжелые металлы в системе почва — растения. Новосибирск: Наука, 1991. 151 с.
- [2] Митрофанов Д.П. Химический состав лесных растений Сибири. Новосибирск: Наука, 1977. 120 с.
- [3] Прокушкин С.Г. Минеральное питание сосны (на холодных почвах). Новосибирск: Наука, 1982. 202 с.
- [4] Helmisaari H.-S. Temporal variation concentration of *Pinus sylvestris* needles // *Silva Fennica*, 1992, v. 26, pp. 145–153.
- [5] Huttunen S., Laine K., Torvela H. Seasonal Sulphur contents of pine needles as indices of air pollution // *Ann. Bot. Fennici*, 1985, v. 22, pp. 343–359.
- [6] Волова А.В., Наквасина Н.Е. Содержание макро- и микроэлементов в листьях березы (*Betula pendula* Roth.) различных форм // *Лесной вестник / Forestry Bulletin*, 2019. Т. 23. № 6. С. 5–12.
- [7] Менщиков С.Л. Методические аспекты оценки ущерба лесов, поврежденных промышленными выбросами на Среднем Урале // *Леса Урала и хозяйство в них*, 2001. Вып. 21. С. 243–251.
- [8] Kumar A., Tripti, Maleva M., Kiseleva I., Kumar S.M., Morozova M. Toxic metal(loid)s contamination and potential human health risk assessment in the vicinity of century-old copper smelter, Karabash, Russia // *Environ Geochem Health*, 2019. <https://doi.org/10.1007/s10653-019-00414-3>
- [9] Бачурина А.В., Залесов С.В. Оценка состояния окружающей среды по показателю флуктуирующей асимметрии // *Актуальные проблемы лесного комплекса*, 2020. № 56. С. 98–103.
- [10] Усольцев В.А., Цепордей И.С., Ковязин В.Ф., Уразова А.Ф., Борников А.В. Биомасса генеративных органов сосны обыкновенной и березы повислой в градиенте загрязнений от Карабашского медеплавильного завода на Урале // *Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии*, 2021. № 234. С. 23–52
- [11] Махнева С.Г., Менщиков С.Л. Качество пыльцы сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) в зоне действия выбросов АО «Карабашмедь» // *Лесной вестник / Forestry Bulletin*, 2021. Т. 25. № 1. С. 32–44. DOI: 10.18698/2542-1468-2021-1-32-44
- [12] Синявский И.В., Князева Т.Г. Тяжелые металлы в системе «почва — растение — человек» в промышленных городах горнолесной зоны Южного Урала // *Агропродовольственная политика России*, 2016. № 4(52). С. 59–62.
- [13] Кузьмина Н.А., Мохначев П.Е., Менщиков С.Л. Аккумуляция тяжелых металлов в снеговой воде, почве и состоянии березовых древостоев в условиях техногенного загрязнения // *Лесной вестник / Forestry Bulletin*, 2020. Т. 24. № 6. С. 73–82. DOI: 10.18698/2542-1468-2020-6-73-82
- [14] Minkina T.M., Nevidomskaya D.G., Bauer T.V., Mandzhieva S.S., Linnik V.G., Khoroshavin V.Y. Forms of Cu (II), Zn (II), and Pb (II) compounds in technogenically transformed soils adjacent to the Karabashmed Copper Smelter J. of Soils and Sediments, 2018, t. 18, no. 6, pp. 2217–2228.
- [15] Шабанов М.В., Стрекулев Г.Б. Геохимические процессы накопления тяжелых металлов в ландшафтах Южного Урала // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*, 2021. Т. 332. № 1. С. 184–192.
- [16] 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.
- [17] Петункина Л.О., Сарсацкая А.С. Береза повислая как индикатор качества городской среды // *Вестник Кемеровского государственного университета*, 2015. № 3(4). С. 68–71.
- [18] Протасова Н.А., Беляев А.Б. Химические элементы в жизни растений // *Соровский образовательный журнал*, 2001. № 3. С. 25–32.
- [19] Диярова Э.Р., Гиниятуллин Р.Х., Кулагин А.А. Содержание металлов в древесных растениях, произрастающих на отвалах Учалинского горно-обогатительного комбината Республики Башкортостан // *Вестник Оренбургского государственного университета*, 2009. № 6. С. 118–120.
- [20] Franiel I. Development of *Betula pendula* seedlings growing on the «Silesia Steelworks» dumping grounds in Katowice // *Acta Agrophys*, 2011, no. 51, pp. 51–57.
- [21] Dubois H., Verkasalo E., Claessens H. 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*, 2020, v. 11, p. 336 (2020). DOI:10.3390/f11030336

- [22] Волова А.В., Наквасина Е.Н. Содержание макро- и микроэлементов в листьях березы (*Betula pendula* Roth) различных форм // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2019. Т. 23. №6. С. 5-12.
DOI: 10.18698/2542-1468-2019-6-5-12.
- [23] Franiel I., Kompala-Baba A. Reproduction strategies of the silver birch (*Betula pendula* Roth) at post-industrial sites // Sci Rep, 2021, v. 11, p. 11969.
<https://doi.org/10.1038/s41598-021-91383-0>
- [24] Бачурина А.В., Залесов С.В. Использование метода биоиндикации для оценки качества среды промышленных городов Урала // Лесной вестник. Forestry Bulletin, 2020. Т. 24. № 3. С. 11-17.
- [25] Тагирова О.В., Кулагин А.Ю. Фенотипические реакции березы повислой (*Betula pendula* Roth) в условиях антропогенного воздействия // Известия Самарского научного центра Российской академии наук, 2019. Т. 21. № 2 (88). С. 45–50.
- [26] Lisotova E.V., Sunstova L.N., Inshakov E.M. Analysis of state of *Betula pendula*, *Padus maackii* and *Malus baccata* tree in the main plantings OF Krasnoyarsk city // Плодоводство, семеноводство, интродукция древесных растений, 2020. Т. 23. С. 58–60.
- [27] Зайцев Г.А., Логвинов К.В. Радиальный прирост березы повислой (*Betula pendula* Roth) в условиях Липецкого промышленного центра // Инновационные подходы к обеспечению устойчивого развития социо-эколого-экономических систем. Материалы V Междунар. конф. Институт экологии Волжского бассейна РАН; Самарский государственный экономический университет, 2018. С. 73–76.
- [28] Соколова Г.Г. Влияние техногенного загрязнения на пигментный состав листьев березы повислой (*Betula pendula* Roth) в условиях города Барнаула // Проблемы ботаники Южной Сибири и Монголии, 2020. № 19–1. С. 223–228.
- [29] Сумарокова И.Е. Листья березы повислой (*Betula pendula*) как биоиндикаторы окружающей среды // Тенденции развития науки и образования, 2022. № 85–2. С. 60–63.
- [30] Тюлькова Е.Г., Карпиченко А.А. Эколого-геохимическая оценка условий развития и адаптация древесных растений к техногенному воздействию (на примере г. Гомеля) // Природные ресурсы, 2020. № 2. С. 70–77.
- [31] Дзугаев М.Д. Карабаш — город «Экологического бедствия» // Вестник Челябинского государственного университета. Серия: Право, 2003. № 2(6). С. 92–97.
- [32] 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: Изд-во УГЛТУ, 2017. 277 с.
- [33] 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.
- [34] Udachin V.N., Williamson B.J., Purvis O.W., Spiro B., Dubbin W., Herrington R.J., Mikhailova I. Assessment of environmental impacts of active smelter operations and abandoned mines in Karabash, Ural Mountains of Russia // Sust. Devel, 2003, v. 11, pp. 1–10. DOI:10.1002/sd.211
- [35] Методика организации и проведения работ по мониторингу лесов европейской части России по программе ICP-Forests (методика ЕЭК ООН). Москва, 1995. 42 с.
- [36] Macdonald A.D., Mothersill D.H. Shoot development in *Betula papyrifera*. 1. Short-shoot organogenesis // Can J Bot., 1983, pp. 3049–3065.
- [37] Проведение биохимического анализа растительных образцов. Практические рекомендации / под ред. М.И. Касаткиной. Л.: ЛенНИИЛХ, 1979. 26 с.
- [38] Методические указания по определению серы в растениях и кормах растительного происхождения. М.: Росинформагротех, 2004. 8 с.
- [39] Ханина Л.Г., Бобровский М.В., Смирнов В.Э., Грозовская И.С., Романов М.С., Лукина Н.В., Исаева Л.Г. Функциональные группы видов и микрогруппировки лесного напочвенного покрова для моделирования его динамики // Математическая биология и биоинформатика, 2015. Т. 10. № 1. С. 15–33.
- [40] Коротеева Е.В., Вейберг Е.И. Закономерности экотопического распределения сосудистых растений в импактной зоне Медеплавильного комбината (Карабаш, Южный Урал) // Растительные ресурсы, 2019. Т. 55. № 1. С. 85–101.

Сведения об авторах

Горбунова Виктория Дмитриевна [✉] — канд. биол. наук, науч. сотр. лаборатории техногенных растительных сообществ, ФГБУН «Ботанический сад Уральского отделения Российской академии наук», botgarden.gor@yandex.ru

Меншиков Сергей Леонидович — д-р с.х. наук, вед. науч. сотр. лаборатории техногенных растительных сообществ, ФГБУН «Ботанический сад Уральского отделения Российской академии наук», mssl@botgard.uran.ru

Поступила в редакцию 07.11.2022.

Одобрено после рецензирования 20.04.2023.

Принята к публикации 18.07.2023.

SILVER BIRCH (*BETULA PENDULA* ROTH) LEAVES MACROELEMENT COMPOSITION IN AEROTECHNOGENIC POLLUTION BY «KARABASHMED» GRADIENT

V.D. Gorbunova✉, S.L. Menshchikov

botgarden.gor@yandex.ru

The dependence of the macroelements content in the Silver birch (*Betula pendula* Roth) leaves on the vital state of the stand in the gradient of aerotechnogenic emissions by the Karabash Copper Smelting Plant was established. The content of macro- and microelements (nitrogen, phosphorus, potassium, magnesium, calcium, sulfur) was studied, and NPK was calculated as the total content of nitrogen, phosphorus and potassium) in the leaves of a birch tree at different distances from the Karabashmed plant. The study showed that when air was polluted with sulfur dioxide, the total content of macronutrients in the leaves decreased. Severe damage to birch leaves by sulfur dioxide in the affected area of Karabashmed is indicated by an increased concentration of sulfur in the leaves — one and a half times more than on another sample area, as well as deterioration of the vital condition of the stand (the degree of defoliation and dechromation is 1,5–2 times higher, deterioration of the sanitary condition is 1,5 times more when in the others sites). With an increase in foliage dechromation, the potassium content decreases, the sulfur content increases; with a defoliation increase, the content of nitrogen, phosphorus and sodium decreases. The content of calcium and magnesium is not related either to defoliation, dechromation or the category of the tree condition.

Keywords: silver birch, macronutrients, aerotechnogenic emissions

Suggested citation: Gorbunova V.D., Menshchikov S.L. *Makroelementnyy sostav list'ev berezy povisloy (Betula pendula Roth) v gradiente aerotekhnogennogo zagryazneniya AO «Karabashmed'»* [Silver birch (*Betula pendula* Roth) leaves macroelement composition in aerotechnogenic pollution by «Karabashmed» gradient]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2023, vol. 27, no. 5, pp. 170–178. DOI: 10.18698/2542-1468-2023-5-170-178

References

- [1] Ilyin V.B. *Tyazhelye metally v sisteme pochva — rasteniya* [Heavy metals in the soil — plants system]. Novosibirsk: Nauka, 1991, 151 p.
- [2] Mitrofanov D.P. *Himicheskiy sostav lesnykh rasteniy Sibiri* [Chemical composition of Siberian forest plants]. Novosibirsk: Nauka, 1977, 120 p.
- [3] Prokushkin S.G. *Mineral'noe pitaniye sosny (na holodnykh pochvah)* [Mineral nutrition of pine (on cold soils)]. Novosibirsk: Nauka, 1982, 202 p.
- [4] Helmisaari H.-S. Temporal variation concentration of *Pinus sylvestris* needles. *Silva Fennica*, 1992, v. 26, pp. 145–153.
- [5] Huttunen S., Laine K., Torvela H. Seasonal Sulphur contents of pine needles as indices of air pollution. *Ann. Bot. Fennici*, 1985, v. 22, pp. 343–359.
- [6] Volova A.V., Nakvasina N.E. *Soderzhanie makro- i mikroelementov v list'yakh berezy (Betula pendula Roth.) razlichnykh form* [The content of macro- and microelements in birch leaves (*Betula pendula* Roth.) of various forms]. *Forest Bulletin / Forestry Bulletin*, 2019, vol. 23, no. 6, pp. 5–12.
- [7] Menshchikov S.L. *Metodicheskie aspekty ocenki ushcherba lesov, povrezhdennykh promyshlennymi vybrosami na Srednem Urale* [Methodological aspects of assessing damage to forests damaged industrial emissions in the Middle Urals]. *Lesnaya Urala i khozyaystvo v nikh [Ural forests and agriculture in them]*, 2001, iss. 21, pp. 243–251.
- [8] Kumar A., Tripti, Maleva M., Kiseleva I., Kumar S.M., Morozova M. Toxic metal(loid)s contamination and potential human health risk assessment in the vicinity of century-old copper smelter, Karabash, Russia. *Environ Geochem Health*, 2019. <https://doi.org/10.1007/s10653-019-00414-3>
- [9] Bachurina A.V., Zalesov S.V. *Oценка sostoyaniya okruzhayushchey sredy po pokazatelyu fluktuiruyushchey asimmetrii* [Assessment of the state of the environment by the indicator of fluctuating asymmetry]. *Aktual'nye problemy lesnogo kompleksa [Actual problems of the forest complex]*, 2020, no. 56, pp. 98–103.
- [10] Usoltsev V.A., Tsepordey I.S., Kovyazin V.F., Urazova A.F., Bornikov A.V. *Biomassa generativnykh organov sosny obyknovennoy i berezy povisloy v gradiente zagryazneniy ot Karabashskogo medeplavil'nogo zavoda na Urale* [Biomass of generative organs of scots pine and hanging birch in the pollution gradient from the Karabash copper smelter in the Urals]. *Izvestiya Sankt-Peterburgskoy lesotekhnicheskoy akademii [Izvestiya of the St. Petersburg Forestry Academy]*, 2021, no. 234, pp. 23–52
- [11] Makhniova S.G., Menshchikov S.L. *Kachestvo pyl'tsy sosny obyknovennoy (Pinus sylvestris L.) v zone deystviya vybrosov AO «Karabashmed'»* [Common pine (*Pinus sylvestris* L.) pollen quality in JSC «Karabashmed» emission zone]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2021, vol. 25, no. 1, pp. 32–44. DOI: 10.18698/2542-1468-2021-1-32-44
- [12] Sinyavsky I.V., Knyazeva T.G. *Tyazhelye metally v sisteme «pochva — rasteniye — chelovek» v promyshlennykh gorodakh gornolesnoy zony Yuzhnogo Urala* [Heavy metals in the «soil — plant — man» system in industrial cities of the mountain forest zone of the Southern Urals]. *Agroprodovol'stvennaya politika Rossii [Agro-food policy of Russia]*, 2016, no. 4(52), pp. 59–62.
- [13] Kuz'mina N.A., Mokhnachev P.E., Menshchikov S.L. *Akkumulyatsiya tyazhelykh metallov v snegovoy vode, pochve i sostoyaniye berezovykh drevostoev v usloviyakh tekhnogennogo zagryazneniya* [Accumulation of heavy metals in snow water, soil and the state of birch stands in conditions of technogenic pollution] *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2020, vol. 24, no. 6, pp. 73–82. DOI: 10.18698/2542-1468-2020-6-73-82

- [14] Minkina T.M., Nevidomskaya D.G., Bauer T.V., Mandzhieva S.S., Linnik V.G., Khoroshavin V.Y. Forms of Cu (II), Zn (II), and Pb (II) compounds in technogenically transformed soils adjacent to the Karabashmed Copper Smelter J. of Soils and Sediments, 2018, v. 18, no. 6, pp. 2217–2228.
- [15] Shabanov M.V., Strekulev G.B. *Geohimicheskie processy nakopleniya tyazhelyh metallov v landshaftah YUzhnogo Urala* [Geochemical processes of accumulation of heavy metals in the landscapes of the Southern Urals]. Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov [Proceedings of Tomsk Polytechnic University. Georesources Engineering], 2021, v. 332, no. 1, pp. 184–192.
- [16] Schneidmiller N.F., Mammadov G.R. *Osobennosti razvitiya malyh gorodov Rossii v usloviyah ekologicheskogo krizisa na primere goroda Karabash Chelyabinskoy oblasti* [Features of the development of small towns in Russia in the context of the ecological crisis on the example of the city of Karabash, Chelyabinsk region]. Vestnik Kemerovskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Politicheskoe, sotsiologicheskoe i ekonomicheskoe 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
- [17] Petunkina L.O., Sarsatskaya A.S. *Bereza povislaya kak indikator kachestva gorodskoy sredy* [Silver birch as an indicator of the quality of the urban environment]. Vestnik Kemerovskogo gosudarstvennogo universiteta [Bulletin of Kemerovo State University], 2015, no. 3(4), pp. 68–71.
- [18] Protasova N.A., Belyaev A.B. *Himicheskie elementy v zhizni rasteniy* [Chemical elements in plant life]. Sorovskiy obrazovatel'nyy zhurnal [Sorovsky Educational J.], 2001, no. 3, pp. 25–32.
- [19] Diyarova E.R., Giniyatullin R.H., Kulagin A.A. *Soderzhanie metallov v drevesnyh rasteniyah, proizrastayushchih na otvalah Uchalinskogo gorno-obogatitel'nogo kombinata Respubliki Bashkortostan* [The content of metals in woody plants growing on the dumps of the Uchalinsky mining and Processing Plant Republic of Bashkortostan]. Vestnik Orenburgskogo gosudarstvennogo universiteta [Bulletin of Orenburg State University], 2009, no. 6, pp. 118–120.
- [20] Franiel I. Development of *Betula pendula* seedlings growing on the «Silesia Steelworks» dumping grounds in Katowice. Acta Agrophys, 2011, no. 51, pp. 51–57.
- [21] Dubois H., Verkasalo, E., Claessens, H. 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, 2020, v. 11, p. 336. DOI:10.3390/f11030336
- [22] Volova A.V., Nakvasina E.N. *Soderzhanie makro- i mikroelementov v list'yakh berezy (Betula pendula Roth.) razlichnykh form* [Macro and micronutrients contents in birch leaves (*Betula pendula* Roth.) of different form]. Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin, 2019, vol. 23, no. 6, pp. 5–12. DOI: 10.18698/2542-1468-2019-6-5-12
- [23] Franiel I., Kompała-Bąba A. Reproduction strategies of the silver birch (*Betula pendula* Roth) at post-industrial sites // Sci Rep, 2021, v. 11, p. 11969. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-91383-0>
- [24] Bachurina A.V., Zalesov S.V. *Ispol'zovanie metoda bioindikatsii dlya otsenki kachestva sredy promyshlennykh gorodov Urala* [Bioindication method application to assess environment quality of industrial cities in the Urals]. Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin, 2020, vol. 24, no. 3, pp. 11–17. DOI: 10.18698/2542-1468-2020-3-11-17
- [25] Tagirova O.V., Kulagin A.Yu. *Fenotipicheskie reakcii berezy povisloy (Betula pendula Roth) v usloviyah antropogennogo vozdeystviya* [Phenotypic reactions of the hanging birch (*Betula pendula* Roth) under conditions of anthropogenic impact]. Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiyskoy akademii nauk [Izvestiya Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences], 2019, v. 21, no. 2 (88), pp. 45–50.
- [26] Lisotova E.V., Sunstova L.N., Inshakov E.M. Analysis of state of *Betula pendula*, *Padus maackii* and *Malus baccata* tree in the main plantations of Krasnodar city. Fruit growing, seed production, introduction of woody plants, 2020, v. 23, pp. 58–60.
- [27] Zaitsev G.A., Logvinov K.V. *Radial'nyy prirost berezy povisloy (Betula pendula Roth) v usloviyah Lipetskogo promyshlennogo centra* [Radial growth of the hanging birch (*Betula pendula* Roth) in the conditions of the Lipetsk industrial center]. Innovatsionnye podkhody k obespecheniyu ustoychivogo razvitiya sotsio-ekologo-ekonomicheskikh sistem. Materialy pyatoy Mezhdunarodnoy konferentsii. Institut ekologii Volzhskogo basseyna RAN; Samarskiy gosudarstvennyy ekonomicheskii universitet [Innovative approaches to ensuring sustainable development of socio-ecological and economic systems. Materials of the Fifth International Conference. Institute of Ecology of the Volga Basin of the Russian Academy of Sciences; Samara State University of Economics], 2018, pp. 73–76.
- [28] Sokolova G.G. *Vliyaniye tekhnogennogo zagryazneniya na pigmentnyy sostav list'ev berezy povisloy (Betula pendula Roth) v usloviyah goroda Barnaula* [The effect of technogenic pollution on the pigment composition of the leaves of the silver birch (*Betula pendula* Roth) in the conditions of the city of Barnaul]. [Problems of Botany of Southern Siberia and Mongolia], 2020, no. 19–1, pp. 223–228.
- [29] Sumarokova I.E. *List'ya berezy povisloy (Betula pendula) kak bioindikatory okruzhayushchey sredy* [Silver birch leaves (*Betula pendula*) as bioindicators of the environment]. Tendentsii razvitiya nauki i obrazovaniya [Trends in the development of science and education], 2022, no. 85–2, pp. 60–63.
- [30] Tyul'kova E.G., Karpichenko A.A. *Ekologo-geokhimicheskaya otsenka usloviy razvitiya i adaptatsiya drevesnykh rasteniy k tekhnogennomu vozdeystviyu (na primere g. Gomelya)* [Ecological and geochemical assessment of development conditions and adaptation of woody plants to technogenic effects (on the example of Gomele)]. Prirodnye resursy [Natural Resources], 2020, no. 2, pp. 70–77.
- [31] Dzugaev M.D. *Karabash — gorod «Ekologicheskogo bedstviya»* [Karabash — the city of «Ecological disaster»]. Vestnik Chelyabinskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Pravo [Bulletin of Chelyabinsk State University. Series: Law], 2003, no. 2(6), pp. 92–97.
- [32] Zalesov S.V., Bachurina A.V., Bachurina S.V. *Sostoyaniye lesnykh nasazhdeniy, podverzhennykh vliyaniyu promyshlennykh pollyutantov ZAO «Karabashmed», i reaktsiya ih komponentov na provedeniye rubok obnovleniya* [The state of forest plantations affected by industrial pollutants of CJSC «Karabashmed» and the reaction of their components to logging]. Yekaterinburg: UGLTU, 2017, 277 p.

- [33] 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 the copper smelting plant of CJSC «Karabashmed» and the dynamics of the state of the natural environment in the zone of its influence]. *Marksheyderiya i nedropol'zovanie* [Surveying and Subsoil Use], 2011, no. 3 (53), pp. 65–70.
- [34] Udachin V.N., Williamson B.J., Purvis O.W., Spiro B., Dubbin W., Herrington R.J., Mikhailova I. Assessment of environmental impacts of active smelter operations and abandoned mines in Karabash, Ural Mountains of Russia. *Sust. Devel.*, 2003, v. 11, pp. 1–10. DOI:10.1002/sd.211
- [35] *Metodika organizatsii i provedeniya rabot po monitoringu lesov evropeyskoy chasti Rossii po programme ICP-Forests (metodika EEK OON)* [Methodology for organizing and conducting forest monitoring activities in the European part of Russia under the ICP-Forests program (UNECE methodology)]. Moscow, 1995, 42 p.
- [36] Macdonald A.D., Mothersill D.H. Shoot development in *Betula papyrifera*. 1. Short-shoot organogenesis. *Can J Bot.*, 1983, pp. 3049–3065.
- [37] *Provedenie biohimicheskogo analiza rastitel'nykh obrazcov. Prakticheskie rekomendatsii* [Conducting biochemical analysis of plant samples. Practical recommendations]. Ed. M.I. Kasatkina. Leningrad: LenNIILKh, 1979, 26 p.
- [38] *Metodicheskie ukazanii po opredeleniyu sery v rasteniyah i kormah rastitel'nogo proiskhozhdenii* [Methodological guidelines for the determination of sulfur in plants and feeds of plant origin]. Moscow: Rosinformagrotekh, 1999, 8 p.
- [39] Khanina L.G., Bobrovsky M.V., Smirnov V.E., Grozovskaya I.S., Romanov M.S., Lukina N.V., Isaeva L.G. *Funktsional'nye gruppy vidov i mikrogruppirovki lesnogo napochvennogo pokrova dlya modelirovaniya ego dinamiki* [Functional groups of species and microgroups of forest ground cover for modeling its dynamics]. *Matematicheskaya biologiya i bioinformatika* [Mathematical Biology and Bioinformatics], 2015, v. 10, no. 1, pp. 15–33.
- [40] Koroteeva E.V., Veyberg E.I. *Zakonomernosti ekotopicheskogo raspredeleniya sosudistykh rasteniy v impaktnoy zone Medeplavil'nogo kombinata (Karabash, Yuzhnyy Ural)* [Regularities of ecotopic distribution of vascular plants in the impact zone of the Copper smelting plant (Karabash, Southern Urals)]. *Rastitel'nye resursy* [Plant resources], 2019, v. 55, no. 1, pp. 85–101.

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 07.11.2022.

Approved after review 20.04.2023.

Accepted for publication 18.07.2023.

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