

УДК 504.064.2: 574.2

СВЯЗЬ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА ЛИСТЬЕВ БЕРЕЗЫ ПОВИСЛОЙ С ЖИЗНЕННЫМ СОСТОЯНИЕМ ДРЕВОСТОЯ В ГРАДИЕНТЕ ЗАГРЯЗНЕНИЯ КОМБИНАТА «КАРАБАШМЕДЬ»

© 2024 г. В.Д. Горбунова^{1,*}, С.Л. Менщиков¹¹ Botanical Garden, Ural Branch of the RAS, 8-Marta st. 202a, Yekaterinburg, 620144, Russian Federation

* E-mail: botgarden.gor@yandex.ru

Поступила в редакцию 11.10.2023

После доработки 13.03.2024

Принята к публикации 12.04.2024

Город Карабаш (Челябинская обл.) является примером экологических катастроф, связанных с промышленным производством. До сих пор есть недостаток информации о механизмах, обеспечивающих устойчивость различных пород к повышенным концентрациям тяжелых металлов. Целью данной работы стало выявление связи химического состава листьев березы повислой (*Betula pendula* Roth) с жизненным состоянием древостоя в градиенте загрязнения АО «Карабашмедь». Для исследования выбрали естественные древостои березы повислой на разном удалении от АО «Карабашмедь» в северном и северо-восточном направлениях. В листьях березы повислой определили содержание макроэлементов (азот, фосфор, калий, магний, кальций, натрий, сера; рассчитали NPK как суммарное содержание азота, фосфора и калия) и микроэлементов (кадмий, кобальт, хром, медь, железо, никель, свинец и цинк). Была установлена зависимость содержания макро- и микроэлементов в листьях березы повислой от жизненного состояния древостоя в градиенте аэротехногенных выбросов АО «Карабашмедь». Зафиксировано повышение концентрации серы и микроэлементов: кадмия, свинца, цинка, меди, железа и хрома — и снижение общего содержания азота, фосфора и калия в листьях берез на пробных площадях, ближайших к источнику загрязнения. Корреляционный анализ выявил увеличение содержания кадмия, свинца, меди, цинка и серы (коэффициенты корреляции более 0.3—0.6) и снижение общего содержания азота, фосфора и калия с увеличением дефолиации, дехромации и ухудшением категории состояния.

Ключевые слова: макроэлементы, микроэлементы, береза повислая, техногенное загрязнение, категория состояния древостоя

DOI: 10.31857/S0024114824030066, EDN: PECKIC

Промышленное воздействие является одной из основных причин изменения природных сообществ, создаваемых человеком. Примером экологической катастрофы, связанной с промышленным производством, является г. Карабаш в Челябинской обл. Зона воздействия АО «Карабашмедь» охватывает площадь свыше 35 км² (Коротеева, Вейсберг, 2019). Значительное загрязнение природных сообществ этой территории происходит в основном из-за выбросов газов и пыли. Сернистый газ составляет около 98 % всех выбросов и является источником кислотного загрязнения, а пыль содержит различные тяжелые металлы. Основными загрязнителями комбината, наряду с диоксидом серы, являются тяжелые металлы. Особенность токсического эффекта данных загрязнителей заключается в совместном действии, оказываемом ими на лесные экосистемы (Менщиков, Ившин, 2006).

На территории воздействия Карабашского медеплавильного комбината изучалась как древесная (Суховольский, Иванова, 2018; Тагирова, Ольберг,

2021; Махнева, Менщиков, 2021; Усольцев и др., 2021), так и травянистая растительность (Малева и др., 2018; Коротеева, Вейсберг, 2019; Ночевный, Тептина, 2020), было проанализировано содержание тяжелых металлов в разных органах березы повислой в южном направлении (Коротеева и др., 2015). Наиболее общими проявлениями действия тяжелых металлов на растения являются: ингибирование фотосинтеза, нарушение транспорта ассимилятов и минерального питания, изменение водного и гормонального обмена, торможение роста (Кузнецов, 2006; Титов, 2007). Концентрация питательных элементов в ассимиляционных органах является одним из критериев оценки состояния лесных экосистем, определения влияния аэротехногенного загрязнения и оценки обеспечения элементами питания древесных растений. При нехватке или избытке определенных питательных элементов в почве анализ химического состава ассимилирующих органов позволяет выявить дисбаланс питания в растениях. Состояние питания деревьев часто свидетельствует о процессах, происходящих

на уровне экосистемы (в границах биогеоценоза). Недостаточное поступление питательных веществ может быть прямой причиной низкой жизнеспособности деревьев или фактором, усиливающим неблагоприятное воздействие загрязнения воздуха. Высокие концентрации определенных элементов в тканях листьев могут быть причиной последствия интоксикации или высокого уровня загрязнения воздуха. Химическое загрязнение почвы может привести к дисбалансу в поступлении питательных веществ и, как следствие, к несбалансированному питанию деревьев.

На березу приходится 124.8 тыс. га площади в Челябинской обл., занятой лесом, что составляет 52.8 % среди всех древесных видов (Доклад ... 2015). Береза является подходящим видом для долгосрочного мониторинга изменений в развитии ситуации с загрязнением воздуха из-за ее устойчивости и толерантности к атмосферному загрязнению (Hrdlička, Kula, 2004). Березовые насаждения широко распространены в различных климатических условиях и средах. Береза повислая приспособлена к неблагоприятным условиям среды, особенно к загрязнению (Петункина, Сарсацкая, 2015), ей свойственны особенности в потреблении химических элементов. Береза имеет на листьях толстую кутикулу, в связи с чем этот вид характеризуется повышенной стойкостью к загрязняющим веществам, выбрасываемым в атмосферу промышленными предприятиями, включая сернистый газ (Бухарина, Двоеглазова, 2010). В дополнение к углероду, водороду и кислороду основные макроэлементы (N, P и K), вторичные макроэлементы (Ca, Mg и S) и микроэлементы (B, Cl, Cu, Fe, Mn, Mo и Zn) необходимы для здорового роста высших растений. Листья березы аккумулируют медь, никель и марганец более интенсивно, чем хвоя ели или сосны (Протасова, Беляев, 2001; Диярова и др., 2009). Сравнение содержания макро- и микроэлементов в листьях разных форм березы повислой, по мнению некоторых авторов, показало, что соотношение потребления и закрепления в листе макроэлементов устойчиво и не зависит от загрязненности почв (Волова, Наквасина, 2019).

Если учитывать текущее и накопленное аэротехногенное воздействие (загрязнение почвы) в зоне действия АО «Карабашмедь», то существует потребность в дальнейшем изучении состояния лесных насаждений в данном районе. Кроме того, проведение мониторинга лесов и сбор данных играют важную роль в поддержании устойчивого лесопользования и защите лесов, так как загрязнение атмосферы значительно влияет на жизненное состояние и продуктивность древостоев.

Несмотря на многолетние исследования в данном очаге поражения лесов, анализ полученных результатов показал, что связь содержания макро- и микроэлементов с жизненным состоянием древостоя березы повислой не была изучена. В связи с этим

целью данной работы стало выявление связи химического состава листьев березы повислой с жизненным состоянием древостоя в градиенте загрязнения АО «Карабашмедь».

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДИКА

Для исследования были выбраны естественные древостой березы повислой, находящиеся под влиянием выбросов от АО «Карабашмедь», расположенного в естественной депрессии Саймоновской долины. В данном районе преобладают юго-западные и западные ветры. Число осадков здесь составляет 400 мм в год, из них 90 мм выпадает в морозный период (XI—XII), а 300 мм — в безморозный (IV—X) (Дзугаев, 2003). Почвенный профиль характеризуется каменистостью и незначительной мощностью (Залесов и др., 2017). Загрязнение водоемов на территории произошло в результате сброса отходов в реку Сак-Элга (Калабин и др., 2011).

В зависимости от ведущих ветров и рельефа выбрали пять пробных площадей (ВПП) с березовым насаждением различной степени загрязнения: С-1.5, СВ-5, СВ-15, СВ-20 и СВ-24, где буквенные обозначения указывают на направление севера и северо-востока, а цифры представляют расстояние от источника загрязнений в километрах. В качестве фоновых были выбраны березовые насаждения на расстоянии 20 км, так как данные древостой характеризуются наилучшим жизненным состоянием. Пробная площадь включала 100 учетных деревьев на участке в среднем 1 га. Оценка состояния березовых насаждений проводилась методом биоиндикации с использованием показателей дефолиации (потеря хвои и листвы) и дехромации (изменение окраски) крон деревьев в качестве индикаторов (Методика организации и проведения работ... 1995). Категория жизненного состояния насаждений определялась на основе значения средней категории состояния в соответствии с рекомендациями В.А. Алексеева (Алексеев, 1989). Древостой характеризуется как здоровый при $K_c = 1.0—1.5$, как 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 умерший — при $K_c = 4.6$ и более.

Для изучения вариативности химического состава листьев и индивидуальной изменчивости отобрали по 10 модельных деревьев разных категорий состояния с каждого пробного участка, с одного дерева был взят один образец листьев весом около 20 г (всего 50 образцов листьев). В эту работу включены листья только с укороченных побегов, которые образуют основную часть полога у взрослых деревьев и имеют одинаковый возраст из-за синхронного распускания листьев весной (Macdonald, Mothersill, 1983).

В листьях березы повислой было определено содержание макроэлементов: азота, фосфора, калия, кальция, натрия, серы — и микроэлементов: кадмия, кобальта, хрома, меди, железа, никеля,

свинца и цинка. Общее содержание азота определяли по методу Кьельдаля с помощью автоматического анализатора азота UDK 152 (VELP Scientifica, Italy). Содержание калия, кальция, магния, натрия и фосфора — из одной навески мокрым озолением в концентрированной серной кислоте с добавлением окислителей. После озоления содержание калия, кальция, магния было определено с помощью атомно-абсорбционного спектрофотометра (спектрофотометр novAA-300), содержание фосфора — спектрофотометрическим методом с молибденовой синью (Проведение биохимического анализа растительных образцов, 1979). Содержание серы определяли по методу ЦИНАО (Методические указания по определению серы... 1999). Содержание микроэлементов — кадмия, кобальта, хрома, меди, железа, никеля, свинца и цинка — было определено методом атомно-абсорбционной спектрофотометрии с помощью атомно-абсорбционного спектрофотометра novAA-300 (Analytic Jena, Германия).

Для интерпретации полученных результатов нами использовалась шкала, приводимая А. Кабата-Пендиас (1989), в которой указаны 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 проанализировали с использованием пакета программ Microsoft Excel 2007 и метода статистического анализа в программе ПО STATISTICA V. 10 (StatSoft, Inc.). Для определения различий между пятью группами использовали однофакторный дисперсионный анализ (ANOVA) и критерий Фишера. Зависимость содержания элементов в растениях от жизненного состояния деревьев проверялась с помощью параметрического корреляционного теста Пирсона. Результаты статистического анализа были оценены по уровню значимости 5 %.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Содержание макро- и микроэлементов в градиенте загрязнения АО «Карабашмедь».

В районе исследования была проведена оценка жизненного состояния березовых древостоев. В табл. 1 представлена информация о состоянии древостоев на разном расстоянии от источника загрязнения АО «Карабашмедь». Березовые леса, находящиеся ближе к источнику загрязнения (С-1.5), имеют наибольшую степень повреждения. Уровень дефолиации составляет 59.5 %, дехромации — 52 %, индекс повреждения — 3.3, что в 1.5 и 2 раза больше, чем на более удаленных пробных площадях.

Пробные площади, находящиеся на расстоянии от 15 до 24 км, характеризуются наилучшим состоянием по сравнению с другими. На СВ-20, СВ-24, СВ-15 древостои являются ослабленными ($K_c = 1.6$, $K_c = 2.4$ и $K_c = 2.1$ соответственно), на СВ-5 и С-1.5 — сильно ослабленными ($K_c = 2.6$ и $K_c = 3.2$ соответственно). На основе данных результатов можно сделать вывод о негативном воздействии КМК на жизненное состояние березовых древостоев, что проявляется в увеличении дефолиации, дехромации и ухудшении категории состояния.

Содержание общего азота в листьях варьирует между пробными площадями (табл. 2). Наименьшие значения в контроле — 21.3 ± 0.9 мг/г (СВ-24) и в зонах, приближенных к источнику выбросов — 21.4 ± 0.4 мг/г и 21.5 ± 0.6 мг/г (С-1.5 и СВ-5). В работе И. Л. Бухариной и А. А. Двоглазовой (2010) также не были обнаружены достоверные отличия по этому показателю в листьях растений, произрастающих в разных функциональных типах насаждений.

Выявлено снижение содержания калия и фосфора в листьях в зоне сильного загрязнения. Содержание калия в листьях в зоне сильного загрязнения на С-1.5 снижалось на 35 % по сравнению с контролем, составляло 8.7 ± 0.5 мг/г и достоверно отличалось от СВ-24, СВ-15 и СВ-5. Содержание фосфора в листьях снизилось на 15 % на пробных площадях, ближайших к источнику загрязнения (СВ-5 и С-1.5), по сравнению с более удаленными ПП, и составило 6.41 ± 0.6 мг/г и 6.31 ± 0.6 мг/г соответственно, что противоречит исследованиям на листьях дуба черешчатого (*Quercus robur* L.), где концентрация калия и фосфора увеличилась в ответ на увеличение концентрации в них поллютантов, что рассматривается как один из механизмов защиты ассимиляционного аппарата от воздействия автотранспорта

Таблица 1. Характеристика березового древостоя

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	$42.8 \pm 6.1^*$	$16.7 \pm 5.6^*$	$2.6 \pm 0.2^*$
СВ-15	15	$25.6 \pm 3.2^*$	$8.5 \pm 2.6^*$	$2.1 \pm 0.07^*$
СВ-20	20	$22 \pm 2.5^*$	$16.1 \pm 4.2^*$	$1.6 \pm 0.07^*$
СВ-24	24	$39.5 \pm 5.1^*$	$17.8 \pm 2.8^*$	$2.4 \pm 0.2^*$

Примечание. * Различия с С-1.5 достоверны при $p < 0.05$.

Таблица 2. Содержание макроэлементов в листьях березы повислой на разном удалении от АО «Карабашмедь», мг/г

ПП	Ст. п.	N	P	S	K	Ca	Mg	Na
СВ-24	SA	21.3 ^A	7.37 ^A	1.74 ^A	12.7 ^A	7.99 ^A	6.41 ^B	1.78 ^A
	Sx	0.9	0.35	0.14	1.0	0.95	0.49	0.17
СВ-20	SA	24.6 ^B	6.64 ^{AB}	1.76 ^A	11.5 ^{AB}	7.67 ^A	4.12 ^A	2.12 ^A
	Sx	0.7	0.25	0.19	1.6	0.50	0.19	0.40
СВ-15	SA	24.4 ^B	7.22 ^{AC}	1.88 ^A	12.6 ^A	5.50 ^B	5.27 ^C	2.54 ^A
	Sx	0.7	0.36	0.16	1.3	0.48	0.57	0.44
СВ-5	SA	21.4 ^A	6.41 ^{BC}	1.73 ^A	14.9 ^A	5.79 ^{BC}	3.69 ^A	1.74 ^A
	Sx	0.4	0.17	0.15	1.3	0.34	0.18	0.16
С-1.5	SA	21.5 ^A	6.31 ^B	2.65 ^B	8.7 ^B	7.38 ^{AC}	3.61 ^A	1.85 ^A
	Sx	0.6	0.29	0.18	0.5	0.72	0.28	0.18

Примечание. SA — среднее арифметическое, Sx — ошибка среднего, разные надстрочные буквы обозначают достоверные различия по вертикали при $p < 0.05$, ПП — пробные площади; Ст. п. — статистические параметры.

(Кулакова и др., 2021). При этом в зоне воздействия комбината «Печенганикель» также было выявлено существенное снижение элементов питания: Ca, K, Mn, Zn — в листьях березы, а в неповрежденных экосистемах в значительных концентрациях в листьях аккумулировались магний, сера и цинк (Исаева, Сухарева, 2021). Исследования хвойного опада в лесах, подверженных влиянию воздушного загрязнения выбросами медно-никелевого комбината «Североникель», выявили снижение кальция, магния, марганца и цинка и увеличение содержания тяжелых металлов (Ni, Cu) (Иванова и др., 2022).

Содержание магния снизилось на 44 % на ПП, ближайших к АО «Карабашмедь», по сравнению с более удаленными ПП, и достигло 3.69 ± 0.18 мг/г на СВ-5 и 3.61 ± 0.28 мг/г на С-1.5. Содержание натрия варьировало от 1.74 ± 0.16 мг/г до 2.54 ± 0.54 мг/г и достоверно не отличалось среди всех ПП ($p > 0.05$). Содержание серы увеличилось на 35 % ($p < 0.05$) на ПП, ближайшей к источнику загрязнения, по сравнению с другими ПП, и достигло 2.65 ± 0.18 мг/г (табл. 2). Пробные площади на расстоянии от 5 до 24 км от АО «Карабашмедь» достоверно не отличаются по содержанию серы в листьях, значения варьируют от 1.73 ± 0.15 мг/г до 1.88 ± 0.16 мг/г. Также по градиенту атмосферного загрязнения от комбината «Североникель» в ненарушенных лесных биогеоценозах в фотосинтезирующих органах березы было выявлено достаточно высокое содержание серы, которое варьирует от 900 до 1700 мг/кг (Сухарева, 2017). Поступление серы в ассимиляционный аппарат возможно как через атмосферу, так и из почвы, так как вблизи металлургического производства валовое содержание серы в почвах превышает ПДК в среднем в 2—8 раз (Шабанов, 2021.). Сернистый ангидрид, подкисляя среду, повышает подвижность и биологическую активность ионов металлов, что резко увеличивает их токсическое воздействие на биоту (Воробейчик, Хантемирова, 1994).

Преобладающий элемент питания в листе — азот, на его долю приходится 22—24 мг/г, на долю калия — 9—15 мг/г, фосфора — 6.5—7 мг/г, кальция — 5.5—8 мг/г, магния — 3.6—6.4 мг/г, серы — 1.7—2.7 мг/г, натрия — 1.8—2.5 мг/г.

В табл. 3 показаны результаты анализа содержания микроэлементов в листьях берез на разном удалении от АО «Карабашмедь». По мере приближения к источнику загрязнения в листьях березы повислой увеличивается концентрация микроэлементов, входящих в состав выбросов комбината. Выявлено повышение концентрации кадмия, свинца, цинка, меди и железа на ПП, ближайших к источнику загрязнения.

Содержание цинка на пробных площадях, приближенных к источнику загрязнения, выше в 2.7—2.8 раза контрольных значений. На расстоянии от 15 до 24 км содержание цинка достоверно не изменяется между участками и варьирует от 240 до 322 мг/кг. Виды *Betula* выделяют как концентраторы цинка (Уразгильдин и др., 2022), а также используют как биоиндикаторы содержания цинка (Zakrzewska, Klimek, 2017), высокое накопление которого зафиксировано при аэротехногенном загрязнении (Kosiorek et al., 2016).

Содержание кадмия на ПП С-1.5, ближайшей к АО «Карабашмедь», составляет 2.3 ± 0.5 мг/кг и превышает в 11.6 раз контрольные ПП. Содержание свинца на более удаленных ПП достоверно не отличается и варьирует от 1.48 ± 0.33 мг/кг до 2.99 ± 0.32 мг/кг, на ПП СВ-5 достигает значений 5.9 ± 0.4 мг/кг, а на С-1.5 превышает в 8 раз контрольные значения и составляет 11.96 ± 1.33 мг/кг. Содержание меди в листьях увеличивается по мере приближения к АО «Карабашмедь» и на ПП С-1.5 достигает максимальных значений 15.87 ± 0.59 мг/кг, что превышает в 2.5 раза контрольные концентрации. На более удаленных ПП содержание меди колеблется от 6.31 ± 0.19 мг/кг до 6.97 ± 0.22 мг/кг и не превышает нормальных концентраций (5—30 мг/кг). По данным Н. А. Кузьминой с соавторами (2020), в лесной

Таблица 3. Содержание микроэлементов в листьях березы повислой на разном удалении от АО «Карабашмедь», мг/кг

ПП	Ст. п.	Cd	Co	Cr	Cu	Fe	Mn	Ni	Pb	Zn
CB-24	SA	0.32 ^A	1.44 ^A	0.66 ^A	6.31 ^A	165 ^A	1231 ^A	22.5 ^A	1.91 ^A	278 ^A
	Sx	0.03	0.22	0.06	0.19	10	208	1.3	0.41	28
CB-20	SA	0.20 ^A	0.83 ^B	0.56 ^A	6.38 ^A	125 ^A	648 ^B	10.3 ^B	1.48 ^A	240 ^A
	Sx	0.02	0.13	0.08	0.18	15	83	0.7	0.33	33
CB-15	SA	0.20 ^A	0.73 ^B	0.98 ^A	6.97 ^A	122 ^A	650 ^B	24.5 ^A	2.99 ^A	322 ^A
	Sx	0.04	0.09	0.16	0.22	9	69	2.8	0.32	32
CB-5	SA	1.13 ^B	1.44 ^A	2.00 ^B	13.36 ^B	287 ^B	1294 ^A	27.8 ^A	5.90 ^B	650 ^B
	Sx	0.14	0.26	0.20	0.81	24	152	3.2	0.40	53
C-1.5	SA	2.32 ^C	1.10 ^{AB}	0.98 ^A	15.87 ^C	211 ^C	1155 ^A	26.7 ^A	11.96 ^C	675 ^B
	Sx	0.49	0.18	0.15	0.59	12	252	4.5	1.33	66

Примечание. SA — среднее арифметическое, Sx — ошибка среднего, разные надстрочные буквы обозначают достоверные различия по вертикали при $p < 0.05$, ПП — пробные площади; Ст.п. — статистические параметры.

подстилке и верхних слоях почвы в зоне сильного загрязнения АО «Карабашмедь» обнаружены высокие концентрации меди, цинка, свинца, железа и кадмия. Таким образом, повышение концентрации данных металлов в листьях берез идет за счет поглощения металлов из почвы.

Содержание кобальта, хрома, марганца и никеля варьирует между ПП, при этом содержание этих микроэлементов в листьях не отличается достоверно между поврежденными и слабоповрежденными березовыми древостоями. По мере убывания микроэлементов можно расположить в следующем порядке: $Mn > Zn > Fe > Ni > Cu > Pb > Co > Cr > Cd$. Кадмий,

никель, хром и кобальт, как правило, являются для березы повислой элементами слабого поглощения и среднего захвата (Бухарина, Двоеглазова, 2010).

Связь содержания макро- и микроэлементов с жизненным состоянием деревьев березы повислой

В табл. 4 отображены результаты корреляционного анализа между содержанием макро- и микроэлементов и состоянием древостоя. С увеличением степени дехромации листьев содержание калия снижается ($r = -0.32$, $p < 0.05$), а серы увеличивается ($r = 0.30$, $p < 0.05$). Также обнаружена положительная корреляция содержания серы с дехромацией листы ($r = 0.30$, $p < 0.05$) (табл. 4), т. е. содержание серы

Таблица 4. Теснота связи (коэффициенты корреляции Пирсона) между содержанием макро- и микроэлементов в листьях березы повислой и жизненным состоянием дерева

Параметр	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
Ca	0.00	0.19	0.03
K	-0.18	-0.32	-0.25
Mg	-0.10	-0.27	-0.09
N	-0.50	-0.30	-0.48
P	-0.30	-0.18	-0.28
S	0.18	0.30	0.21
N+P+K	-0.46	-0.40	-0.46
Cd	0.59	0.46	0.58
Cu	0.62	0.59	0.59
Pb	0.48	0.53	0.56
Zn	0.54	0.41	0.49
Fe	0.44	0.23	0.34
Ni	0.40	0.04	0.38
Co	0.019	0.00	0.05
Cr	0.22	-0.04	0.22

Примечание. Жирным шрифтом обозначены статистически значимые корреляции ($p < 0.05$).

в листе увеличивалось в поврежденных выбросах сернистого газа древостоях березы, что также визуально проявлялось в пожелтении листьев и, следовательно, увеличении дехромации. При увеличении степени дефолиации наблюдается снижение содержания азота ($r = -0.50$ и $r = -0.48$ соответственно, $p < 0.05$) и фосфора ($r = -0.30$, $p < 0.05$). Содержание кальция и магния не зависит от степени дефолиации, дехромации и категории состояния дерева ($p > 0.05$). Таким образом, с увеличением дехромации листы содержат меньше калия, а серы увеличивается, с увеличением дефолиации снижается содержание азота, фосфора и натрия.

Параметр, отражающий жизненное состояние древостоя, — суммарное содержание биофильных элементов NPK. На ПП, наиболее поврежденной диоксидом серы (С-1.5), концентрация биофильных элементов на 16 % ниже и достоверно отличается от других пробных площадей. Кроме того, данный параметр зависит от жизненного состояния древостоя — обнаружена отрицательная взаимосвязь со степенью дефолиации (–46 %), дехромации (–40 %) и категорией состояния (–46 %), то есть содержание биофильных элементов уменьшается с увеличением дефолиации, дехромации и ухудшением санитарного состояния (табл. 4). Дефолиацию так же, как неспецифический показатель жизнеспособности деревьев, связывают с состоянием питания деревьев (Ferretti et al., 2015).

Анализ связи содержания микроэлементов с жизненным состоянием деревьев выявил положительную корреляционную связь параметров жизненного состояния с содержанием микроэлементов (коэффициенты корреляции на уровне 0.4–0.6). С ухудшением состояния березового древостоя содержание микроэлементов в листьях увеличивается. Результаты корреляционного анализа показали наличие достоверных положительных связей между параметрами жизненного состояния и накоплением в листе кадмия ($r = 0.58$, $r = 0.46$, $r = 0.57$), меди ($r = 0.61$, $r = 0.59$, $r = 0.59$), свинца ($r = 0.48$, $r = 0.53$, $r = 0.56$), цинка ($r = 0.54$, $r = 0.41$, $r = 0.49$). Отмечается положительная корреляция дефолиации и санитарного состояния с содержанием железа ($r = 0.44$ и $r = 0.34$) и никеля ($r = 0.40$ и $r = 0.37$). Содержание кобальта и хрома в листе не коррелирует с дефолиацией, дехромацией и с санитарным состоянием древостоя.

ВЫВОДЫ

Наблюдается негативное влияние на березовый древостой к северо-востоку от комбината на расстоянии до 5 км. В этой области концентрация микроэлементов увеличивается в несколько раз по сравнению с более удаленными пробными точками. В целом наиболее благоприятными по экологическим условиям являются пробные площади СВ-20 и СВ-24, так как содержание почти всех изученных микроэлементов

наименьшее, по сравнению с другими участками, и не превышает нормальных концентраций. Общее содержание макроэлементов (азот, фосфор и калий) в листьях снизилось на пробных площадях, ближайших к источнику загрязнения. Содержание биофильных элементов уменьшается с увеличением дефолиации, дехромации и ухудшением санитарного состояния. С ухудшением состояния березового древостоя (дефолиация, дехромация и категория состояния) содержание микроэлементов увеличилось (коэффициенты корреляции более 0.4–0.6). Увеличенная концентрация серы в листьях березы в зоне поражения АО «Карабашмедь» (в 1.5 раза больше, чем на других ПП) и ухудшение жизненного состояния древостоя (степень дефолиации и дехромации выше в 1.5–2 раза, а санитарное состояние — в 1.5 раза) указывают на сильное повреждение листьев березы диоксидом серы. Из изученных микроэлементов наибольшее влияние на растительность в зоне действия АО «Карабашмедь» оказывают кадмий, свинец, медь и цинк.

Таким образом, березовые древостои подвергаются комплексному воздействию на фотосинтетический аппарат, что проявляется в снижении содержания макроэлементов и повышении содержания серы и микроэлементов, таких как кадмий, медь, железо, свинец и цинк. В связи с обнаруженной связью содержания макро- и микроэлементов с жизненным состоянием березового древостоя данный параметр можно использовать для диагностики состояния и степени повреждения древостоя.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Алексеев В. А. Диагностика жизненного состояния деревьев и древостоев // Лесоведение. 1989. № 4. С. 51–57.
- Бухарина И. Л., Двоеглазова А. А. Биоэкологические особенности травянистых и древесных растений в городских насаждениях. Ижевск: Удмуртский университет, 2010. 184 с.
- Волова А. В., Наквасина Е. Н. Содержание макро- и микроэлементов в листьях березы (*Betula pendula* Roth) различных форм // Лесной вестник. 2019. Т. 23. № 6. С. 5–12.
- Воробейчик Е. Л., Хантемирова Е. В. Реакция лесных фитоценозов на техногенное загрязнение: зависимости доза-эффект // Экология. № 3. 1994. С. 31–43.
- Дзугаев М. Д. Карабаш — город «экологического бедствия» // Вестник Челябинского государственного университета. Серия: Право. 2003. № 2 (6). С. 92–97.
- Доклад об экологической ситуации в Челябинской области в 2014 году. Министерство экологии Челябинской области. Челябинск, 2015. 204 с.
- Диярова Э. Р., Гиниятуллин Р. Х., Кулагин А. А. Содержание металлов в древесных растениях, произрастающих на отвалах Учалинского горно-обогатительного

- комбината Республики Башкортостан // Вестник ОГУ. 2009. № 6. С. 118—120.
- 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.
- Иванова Е. А., Лукина Н. В., Смирнов В. Э., Исаева Л. Г. Влияние воздушного промышленного загрязнения на химический состав опада хвои сосны в сосновых лесах на северном пределе распространения // Лесоведение. 2022. № 2. С. 157—171.
- Исаева Л. Г., Сухарева Т. А. Оценка состояния зеленых насаждений в зоне воздействия комбината «Печенганикель» (Мурманская область) // Вестник МГТУ. 2021. Т. 24. № 1. С. 97—106.
- Кабата-Пендиас А., Пендиас Х. Микроэлементы в почвах и растениях. М.: Мир, 1989. 439 с.
- 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.
- Коротеева Е. В., Вейсберг Е. И. Закономерности экологического распределения сосудистых растений в импактной зоне медеплавильного комбината (Карабаш, Южный Урал) // Растительные ресурсы. 2019. Т. 55. № 1. С. 85—101.
- Коротеева Е. В., Веселкин Д. В., Куянцева Н. Б., Мумбер А. Г., Чащина О. Е. Накопление тяжелых металлов в разных органах березы повислой возле Карабашского медеплавильного комбината // Агрохимия. 2015. № 3. С. 88—96.
- Кузнецов В. В. Физиология растений. М.: Высшая школа, 2006. 742 с.
- Кузьмина Н. А., Мохначев П. Е., Менищikov С. Л. Аккумуляция тяжелых металлов в снеговой воде, почве и состоянии березовых древостоев в условиях техногенного загрязнения // Лесной вестник. 2020. Т. 24. № 6. С. 73—82.
- Кулакова Н. Ю., Колесников А. В., Курганова И. Н., Шуйская Е. В., Миронова А. В., Скоробогатова Д. М. Влияние автотранспортного загрязнения на биохимические и морфологические показатели состояния деревьев дуба черешчатого // Лесоведение. 2021. № 4. С. 393—405.
- Малева М. Г., Чукина Н. В., Борисова Г. Г., Синенко О. С., Ширяев Г. И. Структурно-функциональные изменения фотосинтетического аппарата *Turpha latifolia* L. в условиях техногенного загрязнения // Проблемы региональной экологии. 2018. № 6. С. 24—26.
- Махнева С. Г., Менищikov С. Л. Качество пыльцы сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) в зоне действия выбросов АО «Карабашмедь» // Лесной вестник. 2021. Т. 25. № 1. С. 32—44.
- Менищikov С. Л., Ившин А. П. Закономерности трансформации предтундровых и таежных лесов в условиях аэротехногенного загрязнения. Екатеринбург: УрО РАН, 2006. 294 с.
- Методика организации и проведения работ по наблюдению за лесами в европейской части России в рамках программы ИКП-Леса (методика ЕКО ООН). Москва, 1995. 42 с.
- Методические указания по определению серы в растениях и кормах растительного происхождения. Москва: ЦИНАО, 1999. 8 с.
- Ночевный А. Д., Телтина 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.
- Петункина Л. О., Сарсацкая А. С. Береза повислая как индикатор качества городской среды // Вестник Кемеровского государственного университета. 2015. № 3 (4). С. 68—71.
- Проведение биохимического анализа растительных образцов / под. ред. М. И. Касаткиной. Л.: ЛенНИИЛХ, 1979. 12 с.
- Протасова Н. А., Беляев А. Б. Химические элементы в жизни растений // Соровский образовательный журнал. 2001. № 3. С. 25—32.
- Сухарева Т. А. Особенности накопления химических элементов древесными растениями северотаежных лесов на фоновых и техногенно нарушенных территориях // Труды Ферсмановской научной сессии ГИ КНЦ РАН. 2017. № 14. С. 438—441.
- Суховольский В. Г., Иванова Ю. Д. Моделирование повреждений и гибели лесных ценозов под воздействием точечных источников загрязнений // Журнал общей биологии. 2018. Т. 79. № 2. С. 148—158.
- 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: мат-лы II Международной научно-практической конференции. Сибай, 2021. С. 245—247.
- Титов А. Ф. Устойчивость растений к тяжелым металлам // Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2007. 172 с.
- Уразгильдин Р. В., Сулейманов Р. Р., Гиниятуллин Р. Х., Тагирова О. В., Кулагин А. Ю. Техногенное загрязнение почв тяжелыми металлами и их накопление в листьях и хвое лесообразователей Предуралья // Экология и промышленность России. 2022. Т. 26. № 6. С. 60—66.
- 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.
- Шабанов М. В. Сера в геохимически сопряженных ландшафтах Соймоновской долины Челябинской области // Известия УГГУ. 2021. Вып. 1(61). С. 118—126.

- Ferretti M., Calderisi M., Marchetto A., Waldner P., Thimonier A., Jonard M., Cools N., Rautio P., Clarke N., Hansen K. Variables related to nitrogen deposition improve defoliation models for European forests // *Annals of Forest Science*. 2015. V. 72. № 7. P. 897–906.
- Hrdlička P., Kula E. Changes in the chemical content of birch (*Betula pendula* Roth) leaves in the air polluted Krušné hory mountains // *Trees*. 2004. V. 18(2). P. 237–244.
- 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 // *Environmental Monitoring and Assessment*. 2016. № 188(10). P. 598.
- Macdonald A. D., Mothersill D. H. Shoot development in *Betula papyrifera*. 1. Short-shoot organogenesis // *Canadian Journal of Botany*. 1983. 3049–3065 p.
- Zakrzewska M., Klimek B. Trace element concentrations in tree leaves and lichen collected along a metal pollution gradient near Olkusz (Southern Poland) // *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*. 201. № 100(2). 245–249 p.

The Relationship Between Chemical Composition of a Silver Birch Leaves and the Forest Stand's Vital State on the Pollution Gradient of the Karabashmed Jsc

V. D. Gorbunova^{1,*}, S. L. Menshchikov¹

¹ Ботанический сад УрО РАН, ул. 8 Марта, д. 202а, Екатеринбург, 620144, Россия

* E-mail: botgarden.gor@yandex.ru

The city of Karabash (Chelyabinsk region) is an example of industrial environmental disasters. There is still a lack of information about the mechanisms behind the resistance of various tree species to elevated concentrations of heavy metals. The purpose of this work was to identify the relationship between the chemical composition of silver birch leaves (*Betula pendula* Roth) and the vital state of the tree stand in the pollution gradient caused by the Karabashmed JSC. For the study, natural stands of silver birch were chosen, located at different distances from the JSC Karabashmed in the northern and north-eastern directions. The content of macroelements (nitrogen, phosphorus, potassium, magnesium, calcium, sodium, sulphur; NPK was calculated as the total content of nitrogen, phosphorus and potassium) and microelements (cadmium, cobalt, chromium, copper, iron, nickel, lead and zinc). The dependence of the content of macro- and microelements in the leaves of silver birch on the vital state of the tree stand on the gradient of aerotechnogenic emissions from Karabashmed JSC was established. An increase in the concentration of sulphur and microelements (namely cadmium, lead, zinc, copper, iron and chromium) was recorded, as well as a decrease in the total content of nitrogen, phosphorus and potassium in birch leaves in the sample plots closest to the source of pollution. Correlation analysis revealed an increase in the content of cadmium, lead, copper, zinc and sulfur (correlation coefficients exceeding 0.3–0.6) and a decrease in the total content of nitrogen, phosphorus and potassium with an increase in defoliation, dechromation and deterioration of the vital state category.

Keywords: macroelements, microelements, silver birch, technogenic pollution, forest stand vital state category

REFERENCES

- Alekseev V. A., Diagnostika zhiznennogo sostoyaniya derev'ev i drevostoev (Diagnostics of vitality of trees and stands), *Lesovedenie*, 1989, no. 4, pp. 51–57.
- Bukharina I. L., Dvoeglazova A. A., *Bioekologicheskie osobennosti travyanistyykh i drevesnykh rastenii v gorodskikh nasazhdeniyakh* (Bioecological features of herbaceous and woody plants in urban landscaped areas), Izhevsk: Udmurtskii universitet, 2010, 184 p.
- Diyarova E. R., Giniyatullin R. K., Kulagin A. A., Soderzhanie metallov v drevesnykh rasteniyakh, proizrastayushchikh na otvalakh Uchalinskogo gorno-obogatitel'nogo kombinata Respubliki Bashkortostan (Content of metals in woody plants growing on the dumps of the Uchalinsky mining and processing plant of the Republic of Bashkortostan), *Vestnik OGU*, 2009, no. 6, pp. 118–120.
- Doklad ob ekologicheskoi situatsii v Chelyabinskoi oblasti v 2014 godu*, (Report on the environmental situation in the Chelyabinsk region in 2014), Chelyabinsk: Ministerstvo ekologii Chelyabinskoi oblasti, 2015, 204 p.
- Dzugaev M. D., Karabash — gorod “ekologicheskogo bedstviya” (Karabash — the city of “ecological disaster”), *Vestnik Chelyabinskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Pravo*, 2003, no. 2 (6), pp. 92–97.

- Ferretti M., Calderisi M., Marchetto A., Waldner P., Thimonier A., Jonard M., Cools N., Rautio P., Clarke N., Hansen K., Variables related to nitrogen deposition improve defoliation models for European forests, *Annals of Forest Science*, 2015, vol. 72, no. 7, pp. 897–906.
- Hrdlička P., Kula E., Changes in the chemical content of birch (*Betula pendula* Roth) leaves in the air polluted Krusne hory mountains, *Trees*, 2004, vol. 18 (2), pp. 237–244.
- Isaeva L. G., Sukhareva T. A., Otsenka sostoyaniya zelenykh nasazhdenii v zone vozdeystviya kombinata “Pechenganikel” (Murmanskaya oblast’) (Assessment of the green spaces’ state in the impact zone of the Pechenganikel smelter, the Murmansk region), *Vestnik MGTU*, 2021, vol. 24, no. 1, pp. 97–106.
- Ivanova E. A., Lukina N. V., Smirnov V. E., Isaeva L. G., Vliyanie vozdušnogo promyshlennogo zagryazneniya na khimicheskii sostav opada khvoi sosny v osnovnykh lesakh na severnom predele rasprostraneniya (Industrial airborne pollution’s impact on the chemical composition of pine’s needles in forests on the northern boundaries of its areal), *Lesovedenie*, 2022, no. 2, pp. 157–171.
- Kabata-Pendias A., Pendias H., *Trace elements in soil & plants*, Moscow: Mir, 1989, 440 p.
- Kalabin G. V., Titova A. V., Sharov A. V., Modernizatsiya medeplavil’nogo proizvodstva kombinata ZAO “Karabashmed” i dinamika sostoyaniya prirodnoi 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), *Marksheideriya i nedropol’zovanie*, 2011, vol. 3(53), pp. 65–70.
- Koroteeva E. V., Veisberg E. I., Zakonomernosti ekotopicheskogo raspredeleniya sosudistyykh rastenii v impactnoi zone medeplavil’nogo kombinata (Karabash, Yuzhnyi Ural) [Spatial distribution patterns of vascular plants in the impact zone of copper smelter (Karabash, the Southern Urals)], *Rastitel’nye resursy*, 2019, vol. 55, no. 1, pp. 85–101.
- Koroteeva E. V., Veselkin D. V., Kuyantseva N. B., Mumber A. G., Chashchina O. E., Nakoplenie tyazhelykh metallov v raznykh organakh berezy povisloi vogle Karabashskogo medeplavil’nogo kombinata (Accumulation of heavy metals in the different *Betula pendula* Roth organs near the Karabash copper smelter), *Agrokimiya*, 2015, no. 3, pp. 88–96.
- Kosiorok 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, *Environmental Monitoring and Assessment*, 2016, no. 188(10), p. 598.
- Kulakova N. Y., Kolesnikov A. V., Kurganova I. N., Shuiskaya E. V., Mironova A. V., Skorobogatova D. M., Vliyanie avtotransportnogo zagryazneniya na biokhimicheskie i morfologicheskie pokazateli sostoyaniya drev’ev duba chereshchatogo (Pollution from the automobile transport Influencing biochemical and morphological condition indicators of Oak trees), *Lesovedenie*, 2021, no. 4, pp. 393–405.
- Kuz’mina N. A., Mokhnachev P. E., Menshchikov S. L., Akkumulyatsiya tyazhelykh metallov v snegovoi vode, pochve i sostoyanie berezovykh drevostoev v usloviyakh tekhnogennoho zagryazneniya (Accumulation of heavy metals in snow water, soil and the state of birch stands in conditions of technogenic pollution), *Lesnoi vestnik*, 2020, vol. 24, no. 6, pp. 73–82.
- Kuznetsov V. V., Dmitrieva G. N., *Fiziologiya rastenii* (Plant physiology), Moscow: Vyssh. shk., 2006, 742 p.
- Macdonald A. D., Mothersill D. H., Shoot development in *Betula papyrifera*. 1. Short-shoot organogenesis, *Canadian Journal of Botany*, 1983, pp. 3049–3065.
- Makhneva S. G., Menshchikov S. L., Kachestvo pyl’tsy sosny obyknovnoy (*Pinus sylvestris* L.) v zone deystviya vybrosov AO “Karabashmed” (Common pine (*Pinus sylvestris* L.) pollen quality in JSC “Karabashmed” emission zone), *Lesnoi vestnik*, 2021, vol. 25, no. 1, pp. 32–44.
- Maleva M. G., Chukina N. V., Borisova G. G., Sinenko O. S., Shiryayev G. I., Strukturno-funktsional’nye izmeneniya fotosinteticheskogo apparata *Typha latifolia* L. v usloviyakh tekhnogennoho zagryazneniya (Structural and functional changes of *Typha latifolia* L. photosynthetic apparatus under technogenic pollution), *Problemy regional’noi ekologii*, 2018, no. 6, pp. 24–26.
- Menshchikov S. L., Ivshin A. P., *Zakonomernosti transformatsii predtundrovyykh i taezhnykh lesov v usloviyakh aerotekhnogennoho zagryazneniya* (Patterns of transformation of tundra and taiga woodlands under technogenic air pollution), Yekaterinburg: Izdatel’stvo UrO RAN, 2006, 294 p.
- Metodicheskie ukazaniya po opredeleniyu sery v rasteniyakh i kormakh rastitel’nogo proiskhozhdenii* (Guidelines for the determination of sulfur in plants and feed of plant origin), Moscow: TsINAO, 1999, 8 p.
- Metodika organizatsii i provedeniya rabot po nablyudeniya za lesami v evropeiskoi chasti Rossii v ramkakh programmy IKP-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, 1995, 42 p.
- Nochevnyi A. D., Teptina A. Y., Analiz fertil’nosti pyl’tsy v tsenopopulyatsiyakh vidov roda *Alyssum* L. na Yuzhnom Urale (Analysis of pollen fertility of coenopopulations of the genus *Alyssum* L. in the Southern Urals), *Problemy botaniki Yuzhnoi Sibiri i Mongolii*, 2020, no. 19–2, pp. 325–330.
- Petunkina L. O., Sarsatskaya A. S., Bereza povislaya kak indikator kachestva gorodskoi sredy (Phytoindication state of *Betula pendula* in the urban environment of Kemerovo), *Vestnik Kemerovskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2015, no. 3(4), pp. 68–71.
- Protasova N. A., Belyaev A. B., Khimicheskie elementy v zhizni rastenii (Chemical elements in plant life), *Sorovskii obrazovatel’nyi zhurnal*, 2001, no. 3, pp. 25–32.

- Provedenie biokhimicheskogo analiza rastitel'nykh obraztsov*, (Carrying-out biochemical analysis of plant samples), Leningrad: LenNIILKh, 1979, 12 p.
- Shabanov M. V., Sera v geokhimicheski sopryazhennykh landshaftakh Coimonovskoi doliny Chelyabinskoi oblasti (Sulphur in the geochemically conjugated landscapes of the Soimonovsky valley, Chelyabinsk region (Russia)), *Izvestiya UGGU*, 2021, no. 1(61), pp. 118—126.
- Sukhareva T. A., Osobennosti nakopleniya khimicheskikh elementov drevesnymi rasteniyami severotaezhnykh lesov na fonovykh i tekhnogenno narushennykh territoriyakh (Peculiarities of accumulation of chemical elements by woody plants of northern taiga forests in background and technogenically disturbed areas), *Trudy Fersmanovskoi nauchnoi sessii GI KNTs RAN*, 2017, no. 14, pp. 438—441.
- Sukhovol'skii V. G., Ivanova Y. D., Modelirovanie povrezhdenii i gibeli lesnykh tsenozov pod vozdeystviem tochechnykh istochnikov zagryaznenii (Modeling the damage to and destruction of forest coenoses under the impact of point contamination sources), *Zhurnal obshchei biologii*, 2018, vol. 79, no. 2, pp. 148—158.
- Tagirova O. V., Ol'berg O. V., Otsenka sostoyaniya berezy povisloi (*Betula pendula* Roth) v usloviyakh zagryazneniya okruzhayushchei sredy vybrosami medeplavil'nogo kombinata g. Karabash, Chelyabinskaya oblast') (Assessment of the condition of the birch (*Betula pendula* Roth) in conditions of environmental pollution by emissions from a copper factory (Karabash city, Chelyabinsk region)), *Sustainable development of territories: theory and practice*, Sibay, Proc. of Sci.-Pract. Conf., Sibay, 2021, pp. 245—247.
- Titov A. F., Talanova V. V., Kaznina N. M., Laidinen G. F., *Ustoichivost' rastenii k tyazhelym metallam* (Plant resistance to heavy metals), Petrozavodsk: Karel'skii NTs RAN, 2007, 172 p.
- Urazgil'din R. V., Suleimanov R. R., Giniyatullin R. K., Tagirova O. V., Kulagin A. Y., Tekhnogennoe zagryaznenie pochv tyazhelymi metallami i ikh nakoplenie v list'yakh i khvoe lesoobrazovatelei Predural'ya (Technogenic pollution of soils with heavy metals and their accumulation in leaves and needles of forest-forming species of the Cis-Urals), *Ekologiya i promyshlennost' Rossii*, 2022, vol. 26, no. 6, pp. 60—66.
- Usol'tsev V. A., Tsepordei I. S., Kovyazin V. F., Urazova A. F., Bornikov A. V., Biomassa generativnykh organov sosny obyknovЕННОй i berezy povisloi v gradiente zagryaznenii ot Karabashskogo medeplavil'nogo zavoda na Urale (Biomass of generative sphere of scots pine and drooping birch in the pollution gradient from the Karabash copper smelter on the Ural), *Izvestiya Sankt-Peterburgskoi lesotekhnicheskoi akademii*, 2021, no. 234, pp. 23—52.
- 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), *Lesnoi vestnik*, 2019, vol. 23, no. 6, pp. 5—12.
- Vorobeichik E. L., Khantemirova E. V., Reaktsiya lesnykh fitotsenozov na tekhnogennoe zagryaznenie: zavisimosti doza-effekt (Reaction of forest phytocenoses to technogenic pollution: Dose-effect dependencies), *Ekologiya*, 1994, no. 3, pp. 31—43.
- Zakrzewska M., Klimek B., Trace element concentrations in tree leaves and lichen collected along a metal pollution gradient near Olkusz (Southern Poland), *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 201, no. 100(2), pp. 245—249.
- Zalesov S. V., Bachurina A. V., Bachurina S. V., *Sostoyanie lesnykh nasazhdenii, podverzhennykh vliyaniyu promyshlennykh pollyutantov ZAO "Karabashmed", i reaktsiya ikh komponentov na provedenie rubok obnovleniya* (Condition of forest stands undergone the impact of ZAO "Karabashmed" industrial pollutants and their components reaction on renewal cutting carrying on), Ekaterinburg: UG-LTU, 2017, 277 p.