

На правах рукописи

ГОРБУНОВА ВИКТОРИЯ ДМИТРИЕВНА

**МАКРОЭЛЕМЕНТНЫЙ СОСТАВ ЛИСТЬЕВ БЕЛЫХ БЕРЕЗ ПРИ
ВОЗДЕЙСТВИИ КЛИМАТИЧЕСКИХ И АНТРОПОГЕННЫХ
ФАКТОРОВ СРЕДЫ НА УРАЛЕ**

06.03.02 – Лесоведение, лесоводство, лесоустройство и лесная таксация

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени

кандидата биологических наук

Екатеринбург – 2022

Работа выполнена в ФГБУН Ботанический сад УрО РАН

Научный
руководитель: доктор сельскохозяйственных наук
Менщиков Сергей Леонидович

Официальные
оппоненты: Зайцев Глеб Анатольевич, доктор биологических наук,
профессор, Уфимский Институт биологии –
обособленное структурное подразделение ФГБНУ
Уфимский федеральный исследовательский центр
Российской академии наук, лаборатория лесоведения,
ведущий научный сотрудник;

Бухарина Ирина Леонидовна, доктор биологических
наук, профессор, ФГБОУ ВО «Удмуртский
государственный университет», Институт гражданской
защиты, директор; кафедра инженерной защиты
окружающей среды, заведующая кафедрой.

Ведущая
организация ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет
имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»

Защита состоится 29 сентября 2022 г. в 13⁰⁰ часов на заседании
диссертационного совета Д 212.281.01 при ФГБОУ ВО «Уральский
государственный лесотехнический университет» по адресу: 620100, г.
Екатеринбург, Сибирский тракт, 37, ауд. 401.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГБОУ ВО
«Уральский государственный лесотехнический университет» (www.usfeu.ru)

Автореферат разослан «___» июля 2022 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
канд. с.-х. наук, доцент

Магасумова
Альфия Гаптрауфовна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. *Betula pendula* Roth и *Betula pubescens* Ehrh. являются наиболее распространенными на Урале. Благодаря обширному ареалу род *Betula* является хорошим объектом для изучения внутривидовой изменчивости и механизмов адаптации к условиям среды, а значительная устойчивость берез к воздушным загрязнителям является важным условием для использования при лесовосстановлении, в промышленных регионах. Широкая экологическая амплитуда берез позволяет использовать их для биологической рекультивации в различных климатических и техногенных условиях. Это дает возможность оценить ответную реакцию природных популяций двух видов берез на длительное воздействие техногенного фактора. Изменчивость берез изучалась в разных частях ее ареала. В основном, внимание ученых было направлено на исследовании изменчивости популяций по морфологическим показателям (Мамаев, 1973; Махнев, 1975, 1987; Ветчинникова, 2004, и др.). Тем не менее, исследование внутривидовой изменчивости берез по физиологическим и биохимическим параметрам проводилось значительно меньше. Количественная оценка запасов макроэлементов в лесных биогеоценозах, остается важной задачей в изучении цикла макроэлементов в системе почва-растение, так как недостаточно известно об биохимических процессах, вызывающих сложные закономерности накопления макроэлементов в растениях в экстремальных условиях среды.

Цель работы: исследование макроэлементного состава ассимиляционного аппарата двух широко распространенных на Урале видов берез в экстремальных природных и техногенных условиях среды.

Задачи исследований:

1. Исследование содержания макроэлементов в листьях березы повислой в градиенте загрязнения АО «Карабашмедь».
2. Оценка зависимости химического состава от жизненного состояния деревьев.
3. Изучение влияния высотного и широтного факторов на накопление макроэлементов в листьях *Betula pendula* Roth и *Betula pubescens* Ehrh.
3. Провести анализ связи содержания элементов в листьях берез и содержания элементов в почве на Южном Урале.

Научная новизна данной работы состоит в том, что впервые были изучены особенности макроэлементного состава листьев березы повислой и березы пушистой в естественных популяциях в условиях техногенного загрязнения (в градиенте загрязнения АО «Карабашмедь») и в горных территориях трех климатических зон: вдоль высотного градиента Южного (г. Б.Иремель), Северного (г. Конжаковский Камень) и Приполярного (г. Неройка) Урала.

Методология и методы исследований. В основу исследований положены методы, которые широко применяются в биохимии растений, почвоведении, лесоведении, позволяющие выполнить поставленные задачи, а также современные статистические процедуры.

Теоретическая и практическая значимость. Полученные данные можно использовать для диагностики и оценки устойчивости белых берез к экстремальным природным и техногенным факторам и для разработки научных основ реабилитации техногенно нарушенных земель, а также при интродукции древесных видов.

На защиту выносятся следующие положения:

1. С увеличением дефолиации, дехромации и в целом с ухудшением жизненного состояния древостоя, уменьшается общее содержание макроэлементов в листьях *Betula pendula*. Общее содержание серы в листьях повышается в древостое в очагах аэротехногенного загрязнения выбросами медеплавильного комбината и положительно коррелирует с дехромацией листвы.

2. Содержание общего азота в листьях *Betula pubescens* повышается в высотном градиенте на Южном, Северном и Приполярном Урале к верхнему пределу произрастания вида – тундровому поясу.

3. Почвы горно-тундрового пояса Южного Урала характеризуются очень сильной кислотностью, высокой обеспеченностью легкогидролизуемым азотом и калием, средней обеспеченность подвижными формами фосфора и низким содержанием кальция и магния.

4. Содержание общего азота, фосфора, магния и калия в листьях *Betula pubescens* не зависит от содержания подвижных форм этих элементов в почве. Содержание магния и кальция в почве снижается с увеличением горного пояса (в несколько раз), при этом, содержание этих элементов в листьях берез снижается в гораздо меньшей степени.

Степень достоверности и апробация работы. Достоверность результатов была подтверждена широким спектром многолетних экспериментальных данных, использованием научно обоснованных методов, использованием необходимых статистических методов, прикладных компьютерных программ при обработке и оценке материалов исследований.

Итоги исследования опубликованы на международных, всероссийских и национальных научно-практических конференциях: I(X) Международной конференции молодых ботаников (Санкт-Петербург, 2006); IX всероссийском популяционном семинаре «Особь и популяция – стратегия жизни» (Уфа, 2006); всероссийской конференции молодых ученых «Экология: от Арктики до Антарктики» (Екатеринбург, 2007); молодежной конференции «Эволюционная и популяционная экология (назад в будущее)» (Екатеринбург, 2009); V молодежном научном семинаре "Биоразнообразие растительного мира" (Екатеринбург, 2009); IV международной молодежной научной конференции «ЭКОЛОГИЯ – 2011» (Архангельск, 2011); VI всероссийском с международным участием конгрессе молодых ученых-биологов «Симбиоз–Россия 2013» (Иркутск, 2013); международной научно-практической конференции молодых ученых «Проблемы и перспективы исследований растительного мира» (Ялта, 2014); всероссийской научно-практической конференции молодых ученых «Ботанические сады: от фундаментальных

проблем до практических задач» (Екатеринбург, 2014); межрегиональной научно-практической конференции с международным участием «Интродукция, сохранение биоразнообразия и зеленое строительство в горных территориях» (Камлак, 2014); International Forestry & Environment Symposium «Climat change & Tree migration» (Trabzon, Turkey, 2017).

Личный вклад. Автор лично участвовал в формулировании задач и целей, в анализе и обобщении научной литературы, в подготовке публикаций и оформлении диссертации. Автор лично выполнил лабораторные исследования (химический анализ листьев и почвы), статистический анализ данных и обобщение полученных результатов.

Публикации. По теме диссертационной работы было опубликовано 15 научных статей, в том числе 3 в рецензируемых журналах из перечня ВАК, 1 статья Scopus.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, 6 глав, заключения, приложений, библиографического списка из 152 наименований, из них 39 зарубежных источников. Работа изложена на 139 страницах, содержит 28 таблиц, 44 рисунка.

1. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ИССЛЕДУЕМОЙ ПРОБЛЕМЫ

В качестве объекта исследования были выбраны береза повислая *Betula pendula* Roth и береза пушистая *Betula pubescens* Ehrh. Представители рода Береза (*Betula* L.), относятся к семейству Березовые (*Betulaceae*), порядку Буковые (*Fagales*). Род *Betula* отличается сильным полиморфизмом, что связано с полиплоидией, особенности филогении, большим разнообразием экологических условий, в которых произрастают его представители. Известно, что береза повислая лучше приспосабливается к неблагоприятным условиям урбосреды и особенно к техногенному загрязнению, по сравнению с другими древесными породами (Петункина, Сарсацкая, 2015). В частности, листья березы интенсивнее хвои ели и сосны аккумулируют медь, никель и марганец (Протасова, Беляев, 2001; Диярова и др., 2009). Береза повислая — пионер в восстановлении растительности, в том числе на загрязненных участках (Franiel, 2011). На протяжении нескольких десятилетий объектом исследовательской работы были лесные экосистемы вблизи «Карабашского медеплавильного комбината» (Менщиков, 2001; Коротеева и др., 2011; Усольцев и др., 2011; Удачин, 2012; Kumar и др., 2019; Бачурина, Залесов, 2020; Махнева, Менщиков, 2021) и почвы (Макунина, 2002; Линник и др., 2013; Синявский, Князева, 2016; Кузьмина и др., 2020). Тем не менее, недостаточно изучен макроэлементный состав листьев белых берез, обеспечивающих основные метаболические процессы и формирующих жизнедеятельность вида. Минеральное питание имеет большое значение для физиологии дерева, поскольку для нормального роста необходимо достаточное снабжение определенными минеральными элементами. Особенности химического состава листьев растений, произрастающих в разных климатических районах, позволяют объяснить некоторые механизмы их адаптации к условиям среды и могут быть

использованы для прогнозирования реакции растительности на изменение климатических и антропогенных факторов (Белоусов, 2003). Полученные данные о накоплении макроэлементов в листьях берез дают информацию не только об обеспеченности берез макроэлементами, но и о круговороте зольных элементов в горных экосистемах и техногенно нарушенных территориях.

2. ПРИРОДНЫЕ УСЛОВИЯ И ОБЪЕКТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Исследования проводились в естественных популяциях березы повислой (*Betula pendula* Roth) и березы пушистой (*Betula pubescens* Ehrh.) во всех горных поясах гор Южного, Северного и Приполярного Урала и в контроле (наиболее типичные для областей исследования типы леса), а также в естественных популяциях *Betula pendula* Roth на разном удалении от АО «Карабашмедь».

2.1 Природные условия и объекты исследований района АО «Карабашмедь»

Объектами исследования служили естественные древостои березы повислой (*Betula pendula* Roth), произрастающие в условиях влияния выбросов АО «Карабашмедь».

Всего было заложено 5 временных пробных площадей (ВПП) на расстоянии от 1,5 до 24 км в северном и северо-восточном направлениях от комбината. Модельные деревья были взяты из верхнего яруса древостоя.

В таблице 1 дана характеристика березового древостоя на удалении от АО «Карабашмедь». Березовые древостои, приближенные к источнику загрязнения (С-1,5), характеризуются наибольшей поврежденностью. Повышены степень дефолиации – 59,5%, дехромации – 52% и индекс повреждения - 3,3, что в полтора и два раза больше чем в более отдаленных от источника загрязнения пробных площадях и достоверно отличается от остальных пробных площадей.

Таблица 1. Характеристика состояния березового древостоя в районе АО «Карабашмедь»

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 (фон)	24	39,5±5,1	17,8±2,8	2,4±0,2

*различия с СВ-24 достоверны при $p < 0,05$

2.2 Природные условия и объекты исследований горных систем

Классическая схема деления горных хребтов Уральских гор (Горчаковский, 1966) выглядит так: 1. Горно-лесной; 2. Подгольцовый; 3.

Холодный гольцовый пустынный; 4. Гряды холодных гольцовых пустынь. В таблице 2 даны высоты, в которых были взяты образцы листьев берез и почвы.

Таблица 2. Высота (м, над уровнем моря) взятия образцов в горных поясах

Пояс	Южный Урал (г.Б.Иремель)	Северный Урал (г.К. Камень)	Приполярный Урал (г. Неройка)
Контроль	483	207	202
Нижняя граница горно-лесного пояса	556	423	563
Верхняя граница горно-лесного пояса	887	555	
Подгольцовый	1136	830	713
Горно-тундровый	1310	1117	720

В таблице 3 дана климатическая характеристика районов исследования. Вторая по высоте гора Южного Урала – Иремель (1582 м над ур.м.) находится на северо-востоке Белорецкого и Катав-Ивановского районов Челябинской области. Конжаковский Камень – одна из высочайших вершин Уральских горных массивов (1569 м). Тылайско-Конжаковско-Серебрянский массив (59°30'–59°40' с.ш., 59°00'–59°20' в.д.) расположен в южной части Северного Урала. Неройка – гора в Приполярном Урале, расположенная на границе Республики Коми и Ханты-Мансийского автономного округа, высота 1646 м.

Таблица 3. Характеристика горных районов исследования

Горная система	Приполярный Урал	Северный Урал	Южный Урал
Субъекты РФ	Граница Республики Коми и Ханты Мансийского АО	Свердловская область	Граница Башкортостана и Челябинской области
Зональное подразделение растительного покрова (по Горчаковскому, 1966)	Подзона редкостойных предлесотундровых лесов	Подзона средней тайги	Подзона широколиственных лесов
Горная вершина	Г.Неройка	Г. Конжаковский Камень	Г. Большой Иремель
Координаты	64° 33' 36" с. ш. 59° 33' 25" в. д.	59°37'56" с. ш. 59°8'05" в. д.	54°32'00" с. ш. 58°50'20" в. д.
Высота над ур.м.	1642 м	1569 м	1582 м
Общее среднее количество осадков за год, мм	585,13	497,34	367,78
Среднегодовая температура воздуха	-3,2°С	-0,9°С	+1,2°С
Гидротермический коэффициент (за вегетационный период)	2 - 2,5	1,6 - 1,8	1,0 - 1,3.
Сумма активных температур воздуха	1200-1500	1800-2000	2000-2500

3. МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Пробные площади были заложены в четырех горных поясах и в контроле (в соответствующей лесорастительной зоне, на расстоянии в 15-20 км от подножья горы). Растительные образцы были взяты в 2006 и 2008 годах на Северном Урале (г. Конжаковский Камень), в 2007 и 2009 годах – на Южном Урале (г. Большой Ирмель), в 2006 году – на Приполярном Урале (г. Неройка), а также в 2019 г. в градиенте загрязнения АО «Карабашмедь». Образцы почвы были отобраны в 2009 году в горных поясах г. Б. Ирмель на участках сбора образцов листьев. Растительные и почвенные образцы были взяты во второй половине июля. Были отобраны полностью сформированные листья с брахибластов с нижней трети кроны южной экспозиции. Для изучения индивидуальной изменчивости, один образец листьев брался с одного дерева, всего было отобрано по 15 модельных деревьев каждого вида со всех горных поясов и с пробных площадей в районе «Карабашмедь».

Было определено состояние березовых древостоев с помощью метода биоиндикации, основанном на учете повреждения деревьев по таким показателям, как дефолиация (потеря хвои и листьев) и дехромация (изменение окраски) крон деревьев (Методика организации и проведения работ по мониторингу лесов европейской части России по программе ICP-Forests, 1995).

В листьях было определено содержание общего азота, фосфора, калия, кальция, магния, натрия и серы. Содержания общего азота в листьях определено с помощью автоматического анализатора азота по Кьельдалю UDK 152 (Velp scientifica). Калий (K), кальций (Ca), магний (Mg), фосфор (P) и натрий (Na) были определены из одной навески после мокрого озоления в концентрированной серной кислоте с добавлением окислителей. Измерение содержания калия, кальция и магния проводили с помощью атомно-абсорбционного спектрофотометра (спектофотометр NovAA-300), содержание фосфора – спектрофотометрическим методом с молибденовой синью (Проведение биохимического анализа растительных образцов, 1979). Для определения серы использовали «Методические указания по определению серы в растениях и кормах растительного происхождения, ЦИНАО, 1999». Почвы отбирались по общепринятым методикам (ГОСТ 17.4.3.01-83, ГОСТ 17.4.4.02-84). Количество точечных проб соответствовало ГОСТ 17.4.3.01-83. Содержание легкогидролизуемого азота в почве определяли по методу Корнфилда (Шконде, 1972). Содержание обменных форм магния, натрия и кальция определяли после экстракции 1N азотной кислотой (Воробьева, 1998) с помощью атомно-абсорбционного спектрофотометра (спектофотометр novAA-300). Обменная кислотность почвы была определена с помощью рН-метра. Подвижные соединения фосфора и калия определялись помощью метода Кирсанова в модификации ЦИНАО (ГОСТ Р 54650-2011). Степень кислотности почв и степень обеспеченности почв элементами питания определяли по Наставление по выращиванию посадочного материала ..., 1998.

С помощью пакета программ Microsoft Excel 2007 и методики статистического анализа в программе ПО STATISTICA 10, была произведена

обработка полученного экспериментального материала (StatSoft, Inc). Использовался критерий Стьюдента для определения достоверных различий между двумя группами; двухфакторный и трехфакторный дисперсионный анализ (ANOVA) с последующим определением с помощью критерия Фишера (НЗР). Зависимость содержания элементов в растениях от содержания элементов в почве была проверена с помощью параметрического корреляционного теста r -Пирсона. Результаты математических анализов оценивали по 5-процентному уровню значимости.

За время проведения исследований было отобрано 360 образцов листьев березы пушистой, 195 образцов листьев березы повислой, 125 почвенных образцов. Было проведено более 3300 химических анализов для определений элементов в образцах листьев и более 1000 - в образцах почвы.

4. СОДЕРЖАНИЕ МАКРОЭЛЕМЕНТОВ В ЛИСТЬЯХ БЕРЕЗЫ ПОВИСЛОЙ В ГРАДИЕНТЕ АЭРОТЕХНОГЕННЫХ ВЫБРОСОВ КАРАБАШСКОГО МЕДЕПЛАВИЛЬНОГО КОМБИНАТА

Результаты корреляционного анализа связи содержания макро- и микроэлементов от жизненного состояния дерева приведены в таблице 4. Найдена отрицательная корреляция содержания азота от степени дефолиации и категории состояния ($r = -0,50$ и $r = -0,48$ соответственно, $p < 0,05$), содержание калия отрицательно коррелирует с дехромацией листы ($r = -0,32$, $p < 0,05$). Также была обнаружена связь содержания фосфора и дефолиации ($r = -0,30$, $p < 0,05$) и положительная корреляция содержания серы с дехромацией листы ($r = 0,30$, $p < 0,05$). Таким образом, с увеличением дехромации листы, содержание калия уменьшается, а серы увеличивается, с увеличением дефолиации снижается содержание азота, фосфора и натрия. Содержание кальция и магния не связано с дефолиацией, дехромацией и категорией состояния дерева ($p > 0,05$).

Содержание серы увеличивалось на 35% ($p < 0,05$) на ПП, ближайшем к источнику загрязнения (С-1,5) по сравнению с другими ПП и достигло $2,65 \pm 0,18$ мг/г (рис. 1), что достоверно отличается от остальных пробных площадей. Параметр, отражающий жизненное состояние березового древостоя – суммарное содержание биофильных элементов – азота, фосфора и калия (НРК). На ПП, наиболее поврежденном диоксидом серы (С-1,5), концентрация биофильных элементов на 16% ниже и достоверно отличается от других ПП (рис. 1). Также данный параметр зависит от жизненного состояния древостоя – обнаружена отрицательная корреляция со степенью дефолиации (-46%), дехромации (-40%) и категорией состояния (-46%), т.е. содержание биофильных элементов уменьшается с увеличением дефолиации, дехромации и ухудшением санитарного состояния (табл. 4).

Исследование показало, что при загрязнении воздуха диоксидом серы, общее содержание макроэлементов в листьях снижалось.

Таблица 4. Теснота связи (коэффициенты корреляции Пирсона) между содержанием макроэлементов в листьях березы повислой и жизненного состояния дерева

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
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
Na	-0,34*	-0,19	-0,16
N+P+K	-0,46*	-0,40*	-0,46*

Примечание: * обозначены статистически значимые корреляции при $p < 0.05$.

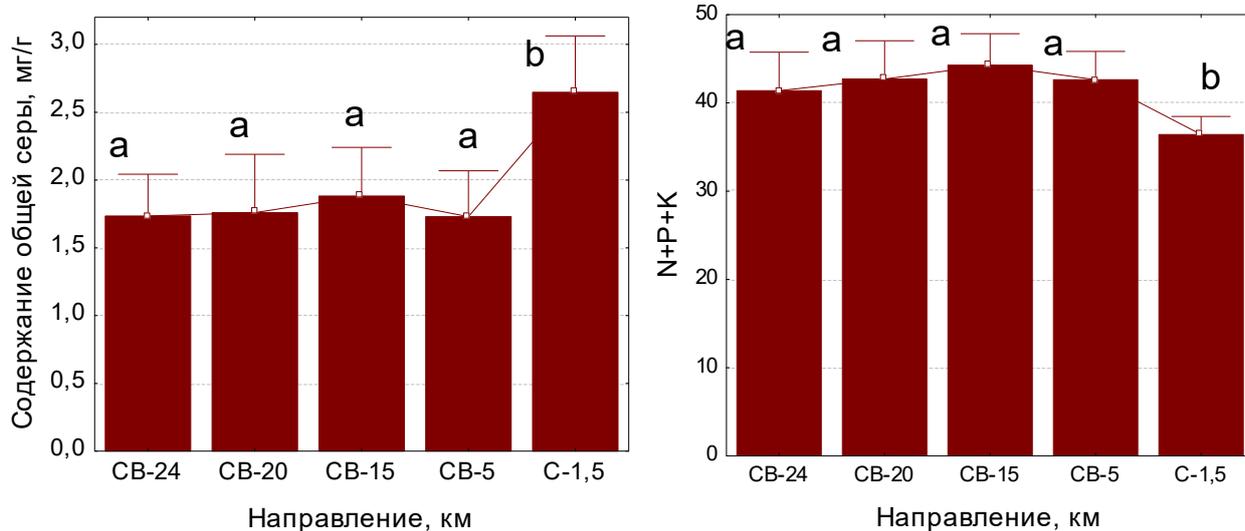


Рис 1. Содержание серы и суммы NPK в листьях *B. pendula* на различном расстоянии от Карабашского медеплавильного комбината. Разные буквы над столбцами обозначают статистически значимые отличия, F-критерии Фишера при 5%-м уровне значимости, $n=15$. Вертикальные линии обозначают стандартное отклонение (SD), индивидуальную изменчивость из 15 деревьев

При этом общее содержание азота значительно не менялось, а калия и фосфора снижалось. На сильное повреждение листьев березы диоксидом серы в зоне поражения АО «Карабашмедь» указывает повышенная концентрация серы в листьях - в полтора раза больше, чем на других ПП, а также ухудшение жизненного состояния древостоя (степень дефолиации и дехромации выше в 1,5-2 раза, ухудшение санитарного состояния в 1,5 раза). Вероятно, выброс диоксида серы вызвал ухудшение жизненного состояния древостоя березы повислой и отразился на химическом составе листьев – уменьшилось общее содержание биофильных элементов. В результате дисперсионного и

корреляционного анализом установлено, что снижение НРК может свидетельствовать о негативном воздействии техногенного загрязнения на березовый древостой. Ухудшение жизненного состояния древостоя березы повислой также может служить одним из диагностических признаков снижения НРК в листьях берез.

5. ОСОБЕННОСТИ АККУМУЛЯЦИИ МАКРОЭЛЕМЕНТОВ В ПОЧВЕ И ЛИСТЬЯХ БЕРЕЗ *BETULA PENDULA* ROTH И *BETULA PUBESCENS* EHRLH. ВДОЛЬ ВЫСОТНОГО ГРАДИЕНТА ЮЖНОГО УРАЛА

5.1 Содержание макроэлементов в листьях белых берез *Betula pendula* Roth и *Betula pubescens* Ehrh. в высотных поясах Южного Урала

Был изучен макроэлементный состав листьев *B. pubescens* и *B. pendula* в высотных поясах Южного Урала (г. Большой Ирмель), была дана оценка индивидуальной изменчивости концентрации макроэлементов, выявлены различия двух видов берез по концентрации макроэлементов, было оценено влияние факторов на содержание макроэлементов в листьях.

Береза пушистая в тундровом и подгольцовом поясах аккумулирует в среднем на 30% азота больше по сравнению с низинными популяциями (табл. 5). Концентрация общего азота варьировала в контроле от $19,5 \pm 0,55$ мг/г в 2007 году и $22,1 \pm 0,6$ мг/г в 2009 году, и увеличивалась до максимального содержания в подгольцовом и тундровом поясах – $28,4 \pm 2,5$ мг/г и $28,1 \pm 1,1$ мг/г в 2007 и до $29,3 \pm 0,76$ мг/г и $29,8 \pm 0,84$ мг/г в 2009 году в подгольцовом и тундровом соответственно. Содержание азота в листьях *B. pendula* также увеличивалось в высотном градиенте и достигало в горнолесном поясе максимальных значений и достоверно не отличалось от *B. pubescens*. У двух видов сумма азота, фосфора и калия увеличивалась в высотном градиенте, достигая максимальных значений в подгольцовом поясе.

Результаты трехфакторного дисперсионного анализа подтвердили влияние вида, года и пояса на содержание общего азота в листьях берез ($F > F_{0.05}$, $p < 0.005$) (горный пояс – $\eta^2 = 40,3\%$, год – $\eta^2 = 10,3\%$ и вид – $\eta^2 = 3,7\%$). Дисперсионный анализ не подтвердил влияние года и вида на содержание общего фосфора ($F < F_{0.05}$, $p > 0.005$), сила влияния горного пояса была оценена в 38,9%. Содержание калия не зависит от вида берез ($F < F_{0.05}$, $p > 0.05$), при этом наибольшее влияние оказала высотная поясность ($\eta^2 = 11,4\%$). Дисперсионный анализ подтверждает зависимость содержания магния от пояса и года ($F > F_{0.05}$, $p < 0.05$), сила влияния пояса – 7,8%, года – 3,1%. Результаты дисперсионного анализа подтвердили влияние года, пояса и вида на сумму азота, фосфора и калия в листьях берез, наибольшее влияние оказывала горная поясность – $\eta^2 = 42,9\%$.

Таким образом, были найдены некоторые закономерности изменения макроэлементного состава листьев березы пушистой и березы повислой в градиенте произрастания в горных поясах Южного Урала.

Электронный архив УГЛТУ

Таблица 5. Результаты статистического анализа содержания макро- и микроэлементов в листьях березы пушистой в высотных поясах Южного Урала (г.Б. Иремель)

Горные пояса	Параметры	Азот		Фосфор		Калий		Кальций		Магний		Натрий	
		2009	2007	2009	2007	2009	2007	2009	2007	2009	2007	2009	2007
Контроль	Среднее, мг/г	22,1	19,5	4,55	5,62	1,85	2,57	4,92	4,03	3,02	2,49	1,43	2,25
	Коэффициент вариации	0,11	0,11	0,25	0,37	0,32	0,55	0,33	0,17	0,25	0,37	0,73	0,61
	Ошибка среднего	0,60	0,56	0,34	0,65	0,15	0,45	0,42	0,21	0,19	0,29	0,27	0,44
Горно-лесной, нижняя граница	Среднее, мг/г	23,6	21,5	7,05	6,81	2,19	3,15	4,73	4,66	3,15	2,39	1,74	1,33
	Коэффициент вариации	0,08	0,11	0,11	0,21	0,32	0,47	0,15	0,11	0,25	0,09	0,94	0,54
	Ошибка среднего	0,50	0,60	0,24	0,46	0,18	0,46	0,18	0,16	0,21	0,07	0,42	0,23
Горно-лесной, верхняя граница	Среднее, мг/г	27,5	25,2	5,78	6,12	3,21	2,14	4,16	4,47	2,22	2,46	1,26	1,57
	Коэффициент вариации	0,09	0,10	0,24	0,10	0,25	0,43	0,37	0,13	0,26	0,17	0,66	0,37
	Ошибка среднего	0,65	0,68	0,35	0,16	0,21	0,24	0,39	0,15	0,15	0,11	0,22	0,15
Подгольцовый	Среднее, мг/г	29,3	28,4	6,90	7,67	2,91	5,69	3,73	4,68	1,14	1,83	1,53	1,88
	Коэффициент вариации	0,10	0,09	0,18	0,17	0,25	0,22	0,30	0,10	0,61	0,20	0,54	0,35
	Ошибка среднего	0,77	0,67	0,32	0,33	0,19	0,33	0,28	0,12	0,18	0,09	0,21	0,17
Горно-тундровый	Среднее, мг/г	29,8	28,1	6,06	7,78	1,83	3,62	3,94	4,40	2,04	1,88	2,15	1,35
	Коэффициент вариации	0,11	0,08	0,16	0,18	0,29	0,23	0,18	0,24	0,29	0,26	0,68	0,50
	Ошибка среднего	0,84	0,55	0,24	0,37	0,14	0,22	0,18	0,27	0,16	0,13	0,38	0,17

Полученные по обоим видам берез данные позволяют сделать вывод о том, что в условиях высокогорья содержание общего азота в листьях березы пушистой повышалось к верхнему пределу произрастания вида – к тундровому поясу, а березы повислой – к горно-лесному, к верхнему пределу произрастания березы повислой. Вероятно, увеличение концентрации азота в листьях вдоль высотного градиента было связано с адаптацией к экстремальным факторам высокогорья, что выражается на уровне химического состава. Анализ индивидуальной изменчивости показывает, что в естественном березовом древостое вариабельность химического состава высока, что дает хорошие возможности для адаптации популяций к различным воздействиям окружающей среды.

5.2. Характеристика основных агрохимических показателей почвы горных поясов Южного Урала

Анализ почвенных образцов показал, что обеспеченность почв азотом высокая во всех горных поясах (более 15 мг/100г) (Наставление по выращиванию посадочного материала, 1998), в горно-лесном поясе достоверно ниже ($28,8 \pm 2,4$ мг/100г и $27,7 \pm 1,9$ мг/100г), чем в вышележащих поясах (в подгольцовом – $43,8 \pm 2,7$ мг/100г и в тундре – $47,9 \pm 4,2$ мг/100г) (табл. 6). При этом содержание азота в контроле достоверно не отличалось ни от горно-лесного пояса, ни от тундрового и подгольцового. Достоверные отличия найдены только между горно-лесным поясом и верхними поясами. Анализ кислотности почвы показал, что почвы г. Б. Ирмель в контроле среднекислые (рН=4,6), в горно-лесном поясе сильнокислые (рН=4,5 и рН=4,4), в подгольцовом и тундре очень сильнокислые – рН=3,7 и рН=3,5 соответственно (рН<4). Степень обеспеченности почвы калием высокая во всех участках. Содержание калия в среднем около 17 мг/100 гр и колеблется от 13 до 20 мг/100гр в разных поясах. Обеспеченность фосфором низкая на верхней границе горно-лесного пояса ($8,1 \pm 1,4$ мг/100г), на нижней границе, подгольцовом и тундре на среднем уровне ($14 \pm 0,6$ мг/100г на нижней границе, в подгольцовом $17,5 \pm 3,2$ мг/100г, в тундре $12,2 \pm 3,3$ мг/100г), и в контроле высокая ($20,1 \pm 2,3$ мг/100г). Содержание магния в почве в контроле в несколько раз выше, чем в других поясах и уменьшается к тундровому поясу. В контроле содержание обменных форм магния 1434 ± 132 мг/кг и снижается к тундре до 94 ± 2 мг/кг. От контроля до верхних поясов содержание обменных форм кальция в почве снижается в 13-40 раз. В контроле – 4073 ± 384 мг/кг, в верхней границе горно-лесного пояса – 959 ± 193 мг/кг в тундре – $98,5 \pm 23$ мг/кг. Содержание натрия в почве в контроле выше, и достоверно отличается от других высотных поясов (в контроле – 174 ± 18 мг/кг, в тундре – 101 ± 9 мг/кг).

Таким образом, почвы в контроле среднекислые, характеризуются высоким содержанием азота, калия, фосфора, кальция, магния, натрия. С высотой, кислотность почв увеличивается, содержание магния, кальция снижается в несколько раз. При этом обеспеченность почв легкогидролизуемым азотом, фосфором и калием высокая на всех поясах.

Почвы тундрового пояса характеризуются очень сильной кислотностью, высокой обеспеченностью легкогидролизуемым азотом и калием, средней обеспеченность подвижными формами фосфора и низким содержанием кальция и магния.

Таблица 6. Основные агрохимические показатели почвы в высотных поясах Южного Урала (г.Б.Иремель)

Горные пояса	pH _{KCl}	N легкогидр., мг/100 гр	P, мг/100гр.	K, мг/100 гр.	Mg, мг/кг	Ca, мг/кг	Na, мг/кг
Контроль	4,58±0,06	38,0±3,2	20,1±2,3	20,31±2,35	1434±132	4073±384	174±18
Горно-лесной, ниж. гр.	4,50±0,03	28,9±2,4	14,0±0,6	13,15±2	577±17	3176±76	105±3
Горно-лесной, верх. гр.	4,44±0,07	27,8±1,9	8,1±1,4	16,82±1,8	276±48	959±193	71±3
Подгольцовый	3,74±0,03	43,8±2,7	17,5±3,2	16,65±1,1	157±46	319±105	85±4
Горно-тундровый	3,54±0,04	47,9±4,2	12,2±3,3	19,86±4,2	94±21	98±24	101±10

5.3 Связь содержания элементов в листьях берез в почве вдоль высотного градиента Южного Урала

По результатам корреляционного анализа не обнаружено зависимости между содержанием легкогидролизуемого азота, подвижного фосфора, подвижных форм магния, калия и натрия в почве и содержанием данных элементов в листьях берез ($p > 0.05$). Корреляционный анализ показал положительную зависимость содержания кальция в почве и в листьях ($r^2 = 0,95$, $p < 0.0005$) (рис. 2). Содержание кальция в листьях березы пушистой с высотой произрастания снижалось на 20%, в то время как концентрация подвижных форм кальция в почве снижалась более чем в 8-10 раз. Содержание азота в листьях березы пушистой в тундровом поясе было на 30% выше, чем в контроле, повышаясь вдоль высотного градиента к верхним поясам, при этом концентрация легкогидролизуемого азота в почве уменьшалась в горно-лесном поясе на 25% по сравнению с контролем и увеличивалось в верхних поясах на 20% по сравнению с контролем. Концентрация калия в почве из разных высотных поясов не изменялось, в то время как содержание калия в листьях увеличивалось на 36-40% в горно-лесном и подгольцовом поясах по сравнению с контролем. Содержание магния в листьях березы пушистой с высотой снижалось в 1,5-2 раза, а концентрация подвижных форм магния в почве в высоких поясах уменьшалась в 3,5-9 раз по сравнению с контролем. Корреляционный анализ не показал связь содержания магния в листьях и в почве ($r^2 = 0,47$, $p > 0.05$). Интенсивность поглощения макроэлементов двумя видами берез существенно варьировала. Самые низкие коэффициенты поглощения (КП) элементов обнаружены в контроле (КП азота – 58,1, КП

фосфора – 22,7, КП калия – 9,1, КП кальция – 1,2, КП магния – 2,1, КП натрия – 8,2). КП кальция в тундровом поясе – 40, магния – 21,7.

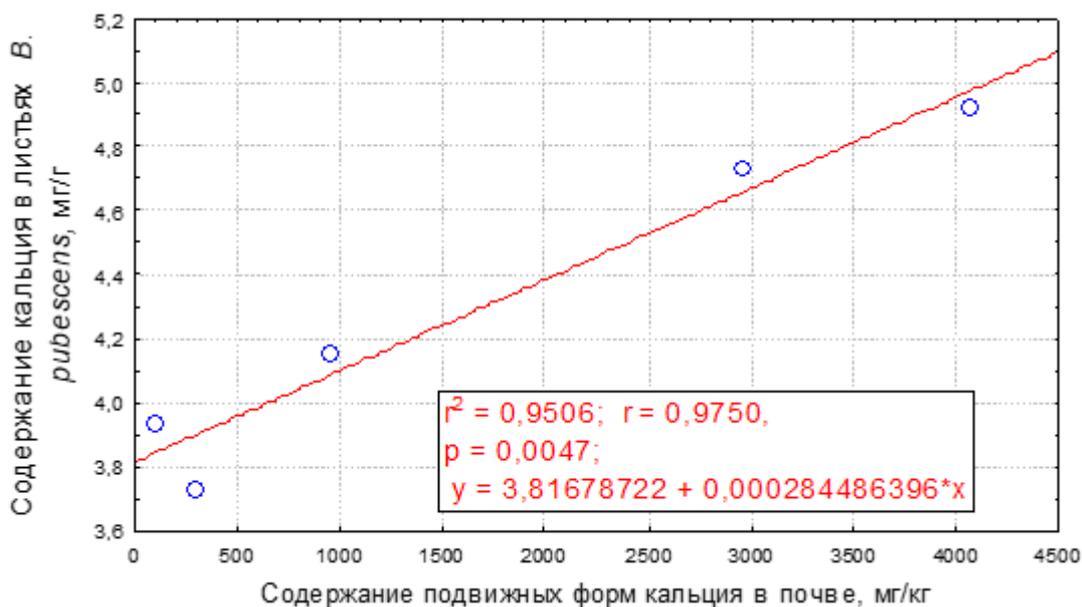


Рис 2. Зависимость содержания общего кальция в листьях от содержания подвижных форм кальция в почве

Таким образом, не обнаружено зависимости между содержанием легкогидролизуемого азота, подвижного фосфора, подвижных форм магния, калия и натрия в почве и содержанием данных элементов в листьях берез. Можно сделать вывод о наличии лимита поглощения азота, фосфора, магния и калия в листьях растений, не зависящих от содержания подвижных форм этих веществ в почве. Несмотря на значительное снижение содержания магния и кальция в почве (в несколько раз), содержание этих элементов в листьях берез снижается в гораздо меньшей степени. Вероятно, существует механизм избирательного поглощения элемента двумя видами берез, который позволяет накапливать элементы в определенном диапазоне независимо от количества в почве элемента, т.е. преобладание генетического фактора в накоплении элементов питательных веществ.

6. ВЛИЯНИЕ ВЫСОТНОГО И ШИРОТНОГО ФАКТОРОВ НА НАКОПЛЕНИЕ МАКРОЭЛЕМЕНТОВ В ЛИСТЬЯХ БЕРЕЗ *BETULA PENDULA* ROTH И *BETULA PUBESCENS* ENRH.

Был изучен макроэлементный состав листьев березы пушистой и березы повислой вдоль высотного градиента Северного и Приполярного Урала. Были выявлены отличия в широтном и в высотном градиенте, было оценено влияние высотного и широтного фактора на накопление макроэлементов в листьях, выявлены различия между двумя видами, изучена изменчивость между деревьями (индивидуальная) и выявлена разница в накоплении макроэлементов между двумя годами.

Содержание азота в листьях березы пушистой увеличивалось вдоль высотного градиента, достигая максимальных значений в верхних поясах Северного Урала ($39,1 \pm 1$ мг/г в 2008 г., $30,7 \pm 1,5$ мг/г в 2006 г.) и Приполярного Урала ($30,8 \pm 0,9$ мг/г). Двухфакторный дисперсионный анализ показал зависимость содержания общего азота от высотного ($\eta^2=25\%$) и широтного ($\eta^2=20,6\%$) факторов. Содержание общего фосфора в листьях берез Приполярного Урала в контроле повышено по сравнению с другими поясами, у березы пушистой – $7,75 \pm 0,35$ мг/г, у березы повислой – $7,47 \pm 0,38$ мг/г и достоверно не отличается между видами, снижается в горно-лесном поясе и тундре на 15%. Содержания общего калия в листьях берез Приполярного Урала выше в горно-лесном поясе на 33% по сравнению с контролем ($11,6 \pm 0,8$ мг/г и $7,8 \pm 0,4$ мг/г соответственно). В горах Северного Урала концентрация калия в листьях *B. pubescens* в 2006 году составляла 5-6 мг/г, в 2008 году – 6,2-7,8 мг/г. Двухфакторный дисперсионный анализ показал зависимость содержания калия в листьях от широтного фактора, сила влияния оценена в 40%. У двух видов содержание общего кальция снижалось с высотой произрастания, достигая минимума в тундровом поясе (с $8 \pm 0,4$ до $4,4 \pm 0,3$ мг/г в 2008 г. и с $6,6 \pm 0,3$ до $4,1 \pm 0,4$ мг/г в 2006 г.). Двухфакторный дисперсионный анализ показал зависимость содержания кальция в листьях, как от высотного ($\eta^2=14,6\%$), так и широтного ($\eta^2=20,3\%$) факторов. Дисперсионный анализ показал влияние широтного фактора на содержание магния в листьях, сила влияния оценена в 71,4%. Содержание общего натрия в листьях не изменялась, достоверные отличия не найдены ни между видами, ни между поясами и между годами ($p > 0.05$) и варьировало от 1,2 до 2,7 мг/г.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные исследования позволили изучить закономерности накопления биофильных элементов в листьях берез в результате воздействия экстремальных факторов среды – климатического и антропогенного. Полученные результаты подтверждают, что древесные виды способны развивать множество физиологических и биохимических механизмов адаптации к неблагоприятным условиям окружающей среды. Кроме того, эти результаты очень ценны как основа для практического применения при лесовосстановлении в экстремальных условиях, а также позволяют проводить комплексный анализ с точки зрения оценки экологической устойчивости древесных растений.

Полученные результаты показали следующее:

1. Была установлена зависимость содержания макроэлементов в листьях березы повислой (*Betula pendula* Roth.) от жизненного состояния древостоя в градиенте аэротехногенных выбросов Карабашского медеплавильного комбината. Выявлен наиболее важный параметр, отражающий жизненное состояние березового древостоя – суммарное содержание биофильных элементов – азота, фосфора и калия (NPK). На сильное повреждение листьев березы диоксидом серы в зоне сильного

поражения указывает повышенная концентрация серы в листьях - в полтора раза больше, чем в зонах слабого и среднего поражения, а также ухудшение жизненного состояния древостоя (степень дефолиации и дехромации выше в 1,5-2 раза, ухудшение санитарного состояния в 1,5 раза). В результате дисперсионного и корреляционного анализов установили, что снижение НРК может свидетельствовать о негативном воздействии техногенного загрязнения на березовый древостой. Ухудшение жизненного состояния древостоя березы повислой также может служить одним из диагностических признаков снижения НРК в листьях берез в условиях аэротехногенного загрязнения.

2. Были найдены изменения макро- и микроэлементного состава листьев березы пушистой и березы повислой в градиенте произрастания в горных поясах Южного Урала. Содержание общего азота в листьях березы пушистой повышалось к верхнему пределу произрастания вида – к тундровому поясу, а березы повислой – к горно-лесному, к верхнему пределу произрастания березы повислой. Вероятно, увеличение концентрации азота в листьях вдоль высотного градиента было связано с адаптацией к экстремальным факторам высокогорья, что выражается на уровне химического состава фотосинтетического аппарата.

3. Почвы тундрового пояса характеризуются очень сильной кислотностью, высокой обеспеченностью легкогидролизуемым азотом и калием, средней обеспеченность подвижными формами фосфора и низким содержанием кальция и магния. С высотой, кислотность почв увеличивается, содержание магния, кальция снижается в несколько раз. При этом обеспеченность почв легкогидролизуемым азотом, фосфором и калием высокая на всех поясах.

4. Проведенное исследование показывает, что у двух видов берез не обнаружена статистически значимая зависимость содержания общего азота, фосфора, калия и магния в листьях от содержания подвижных форм элементов в почве. Содержание кальция в листьях березы пушистой с высотой произрастания снижалось на 20%, в то время как концентрация подвижных форм кальция в почве снижалась более чем в 8-10 раз, а корреляционный анализ показал положительную зависимость содержания кальция в почве и в листьях. Несмотря на значительное снижение содержания магния и кальция в почве (в несколько раз), содержание этих элементов в листьях берез снижается в гораздо меньшей степени. Это говорит о способности растений регулировать химический состав независимо от количества в почве элемента, т.е. преобладания генетического фактора в накоплении питательных веществ.

5. Изучен макро- и микроэлементный состав листьев березы повислой и березы пушистой в горах Северного и Приполярного Урала. Были обнаружены изменения химического состава берез двух видов при увеличении высоты произрастания. Сходство между двумя видами проявилось в снижении концентрации кальция в листе растений с увеличением высоты произрастания. Виды отличаются друг от друга по содержанию макроэлементов. В листьях березы пушистой увеличивалось содержание азота, содержание фосфора и

калия не изменялось, а в листьях березы повислой содержание азота, фосфора и калия снижалось.

6. Содержание азота в листьях березы пушистой увеличивалось в верхних поясах Северного и Приполярного Урала. Двухфакторный дисперсионный анализ показал зависимость содержания общего азота от высотного и широтного факторов. Сила влияния высотного фактора – 25% и широтного – 20,6%. Содержание общего фосфора в контроле повышено по сравнению с другими поясами, двухфакторный дисперсионный анализ показал зависимость содержания калия в листьях от широтного фактора, сила влияния оценена в 40%. Содержание общего кальция снижалось с высотой произрастания, и достоверно отличалось от контроля. Двухфакторный дисперсионный анализ показал зависимость содержания кальция в листьях, как от высотного, так и широтного факторов. Сила влияния широтного фактора - $\eta^2=20,3\%$, высотного – $\eta^2=14,6\%$. Дисперсионный анализ показал влияние широтного фактора на содержание магния в листьях, сила влияния оценена в 71,4%.

7. Таким образом, можно сделать вывод, что изменения биохимического состава листьев подтверждают физиологическую пластичность двух видов берез, позволяющую справляться с локальными и временными изменениями окружающей среды. Полученные результаты подтверждают, что древесные виды способны развивать множество физиологических и химических механизмов адаптации к неблагоприятным условиям окружающей среды, что можно использовать для оценки устойчивости белых берез к экстремальным природным и техногенным факторам среды.

Список работ, опубликованных по теме диссертации

Публикации в журналах Scopus

1. **Gorbunova Viktoria D.** The effects of altitude on macronutrient concentration in birch leaves (*Betula pubescens* Ehrh. and *B. pendula* Roth) along high-altitude gradient in Northern Urals / Viktoria D. Gorbunova, Sergei L. Menschikov, Sezgin Ayan // *Forestry ideas*. –2020. – №1(26). – P. 15-29.

Публикации в журналах, рекомендованных ВАК РФ

2. Горбунова В.Д. Содержание элементов питания в листьях белых берез в интразональных условиях на Северном Урале / В.Д. Горбунова, С.Л. Менщиков // *Известия высших учебных заведений. Лесной журнал*. – 2019. – № 6. – С. 132–145.

3. **Горбунова В.Д.** Анализ содержания макроэлементов в листьях белых берез и в почве вдоль высотного градиента на Южном Урале / В.Д. Горбунова // *Известия Оренбургского государственного аграрного университета*. – 2012. – №6(38). – С. 193-196.

4. Махнев А.К. Особенности приспособления лесообразующих видов белых берез на пределах распространения на уровне биологических свойств семян и вегетативных органов ювенильных растений / А.К. Махнев, С.В.

Мигалина, **В.Д. Горбунова** // Аграрный вестник Урала. – 2009. – № 12(66). – С. 97-100.

Публикации в журналах, сборниках и материалах конференций

5. **Горбунова В.Д.** Соотношение элементов питания в листьях белых берез вдоль высотного градиента Северного Урала / В.Д. Горбунова, А.К. Махнев // Леса России и хозяйство в них. – 2017. – №4(63). – С. 48-55.

6. **Gorbunova V.D.** Nutrient concentration in the leaves of *Betula pendula* Roth и *Betula pubescens* Ehrh. along the altitude gradient of the Northern and Nether-Polar Urals / V.D. Gorbunova, A.K. Mahnev // *Climat change & Tree migration: International Forestry & Environment Symposium*. – Trabzon-Turkey, 2017. – P. 20.

7. **Горбунова В.Д.** Макроэлементный состав листьев *Betula pubescens* Ehrh. and *Betula pendula* Roth в зависимости от высоты произрастания на Северном Урале / В.Д. Горбунова // *Интродукция, сохранение биоразнообразия и зеленое строительство в горных территориях: сборник трудов конференции*. – Республика Алтай, село Камлак: Горно-Алтайский ботанический сад. Алтайский филиал ЦСБС СО РАН, 2014. – С. 38-41.

8. **Горбунова В.Д.** Соотношение макроэлементов в листьях белых берез вдоль высотного градиента Северного Урала / В.Д. Горбунова // *Ботанические сады: от фундаментальных проблем до практических задач: сборник трудов конференции*. – Екатеринбург: Ботанический сад УрО РАН, 2014. – С. 12-13.

9. **Горбунова В.Д.** Содержание азота в листьях белых берез вдоль высотного градиента Среднего и Приполярного Урала / В.Д. Горбунова // *Симбиоз-Россия 2013: сборник тезисов конгресса*. – Иркутск, ЛИН СО РАН, 2013. – С. 385-388.

10. **Горбунова В.Д.** Особенности накопления основных макроэлементов в листьях белых берез на Урале / В.Д. Горбунова // *Экология-2011: материалы докладов IV молодежной научной конференции: Посвящается 300-летию со дня рождения М.В. Ломоносова (1711-2011)*. - Архангельск, 2011. – С. 152-153.

11. **Горбунова В.Д.** Изменчивость содержания макроэлементов в листьях белых берез вдоль высотного градиента горы Большой Ирмель / В.Д. Горбунова // *Биоразнообразие растительного мира: сборник статей научных семинаров*. – Екатеринбург: Ботанический сад УрО РАН, 2010. - С.110-112.

12. **Горбунова В.Д.** Оценка интенсивности поглощения элементов минерального питания белых берез вдоль высотного градиента г. Ирмель / В.Д. Горбунова // *Эволюционная и популяционная экология (назад в будущее: сборник трудов конференции)*. – Екатеринбург: ИЭРиЖ УрО РАН, 2009. - С. 37-41.

13. **Горбунова В.Д.** Особенности накопления макроэлементов в листьях *Betula pubescens* Ehrh. and *Betula pendula* Roth в условиях высокогорья / В.Д. Горбунова // *Экология: от Арктики до Антарктики: материалы конференции молодых ученых*. – Екатеринбург: ИЭРиЖ, 2007. – С. 59-60.

14. Мигалина С.В. Стратегия выживания лесообразующих видов берез в условиях климатического стресса на Урале / С.В. Мигалина, **В.Д. Горбунова** //

Особь и популяция – стратегия жизни: сборник трудов всероссийского популяционного семинара. – Уфа, 2006. – С. 454-460.

15. Юдина П.К. Изменение содержания пигментов *Betula pubescens* and *Betula pendula* вдоль высотного и широтного градиентов на Урале / П.К. Юдина, С.В. Мигалина, **В.Д. Горбунова** // Экология: от генов до экосистем: сборник трудов конференции. – Екатеринбург: ИЭРиЖ, 2005. – С. 321-324.

Отзывы на автореферат просим направить в 3 экземплярах по адресу: 620100 г. Екатеринбург, Сибирский тракт, 37 УГЛТУ, ученому секретарю диссертационного совета Д212.281.01 Магасумовой А.Г. e-mail: dissovet.usfeu@mail.ru

Подписано в печать 20.07.2022. Объем 1.0 авт.л. Заказ № 75. Тираж 100.
620100, г. Екатеринбург, Сибирский тракт, 37. ФГБОУ ВО «Уральский государственный лесотехнический университет». Сектор оперативной полиграфии РИО